



Jean-Pierre Thierry

Ingénieur diplômé du CESI (Centre d'Etudes Supérieures Industrielles) et du CNAM (Conservatoire National des Arts et Métiers), il travaille d'abord dans la Sidérurgie (automatisme de laminoirs et contrôle de fluides). Après quelques années consacrées à l'élaboration et à la mise au point de moyens d'essais de vibrations mécaniques, il entre à la Telemecanique en 1969. Successivement, il est responsable de bureaux d'études, puis responsable technique de Projets de produits nouveaux. Il a maintenant la responsabilité du développement des canalisations électriques préfabriquées.



Christophe Kilindjian

Ingénieur diplômé en 1986 de l'Ecole Supérieure d'Energie et des Matériaux d'Orléans. Entré chez Merlin Gerin en 1986, il travaille au sein du Service Technique de l'unité Tableaux Basse Tension. Responsable des études de base, il s'est occupé en particulier des problèmes d'échange thermique et de tenue électrodynamique dans les équipements BT.

n° 162

les efforts électrodynamiques sur les jeux de barres en BT

les efforts électrodynamiques sur les jeux de barres en BT

sommaire

1. Introduction		p. 4
2. Efforts électrodynamiques entre deux conducteurs : origine et calculs	Remarques préliminaires	p. 4
	Origine et méthodes de calcul	p. 4
	Calcul pour deux conducteurs filiformes parallèles de longueur infinie	p. 6
	Influence de la forme des conducteurs	p. 6
	Conducteurs de longueur réduite	p. 7
	Conducteurs non rectilignes	p. 7
	Calcul dans le cas de configurations complexes	p. 8
3. Efforts électrodynamiques dans un JdB triphasé lors d'un défaut bi ou triphasé	Rappel sur l'établissement des courants de court-circuit	p. 9
	Effort maximal sur un JdB triphasé	p. 9
	Les phénomènes de résonance	p. 11
4. Application à des JdB triphasés BT	Cas des JdB dans les tableaux BT	p. 12
	Cas des canalisations préfabriquées de type Canalis et Victa Dis	p. 16
5. Conclusion		p. 20
6. Bibliographie		p. 20

L'importance prise par le concept de sûreté industrielle (sécurité des personnes et des biens, disponibilité de l'énergie électrique, fiabilité et maintenabilité des produits) rejaille de plus en plus sur la conception des matériels électriques utilisés dans l'industrie (process...) ou le tertiaire (hôpitaux ...). Ainsi leur sûreté de fonctionnement contribue, souvent dans une large proportion, à la sûreté de l'ensemble de l'installation, c'est le cas des tableaux basse tension - BT - et des liaisons préfabriquées transformateurs-tableaux.

Cette recherche de sûreté nécessite des études afin de maîtriser dès la conception le comportement de leurs constituants compte tenu de leur environnement et des sollicitations pouvant apparaître en fonctionnement. L'une de ces études a déjà fait l'objet d'un Cahier Technique (comportement thermique des tableaux BT). La tenue aux efforts électrodynamiques en est une seconde.

Les concepteurs trouveront dans le présent Cahier Technique les calculs imposés pour la prise en compte de ces efforts, en particulier pour la détermination des jeux de barres - JdB - en BT (préfabriqués sous gaine pour la distribution d'énergie, et dans les tableaux).

Mais le calcul seul ne suffit pas : les résultats doivent être validés par un essai en grandeur réelle, d'où une rapide présentation des essais normalisés.

1. introduction

Le problème de la tenue aux efforts électrodynamiques se situe sur les circuits de puissance BT de l'installation. Elle est fonction principalement de l'intensité du courant de défaut mais aussi de la forme des conducteurs, de leur agencement mutuel et de leur mode de fixation. Il peut être résolu par calcul. Mais seule la validation par un essai grandeur réelle permet de fournir un document reconnaissant la conformité aux exigences normatives et/ou du client.

Les intensités très élevées qui peuvent apparaître lors d'un court-circuit entre les différents conducteurs d'une installation BT (conducteurs massifs du type barres, câbles...) engendrent des efforts considérables (plusieurs milliers de daN par mètre).

Leur détermination est donc nécessaire afin de dimensionner mécaniquement

les conducteurs eux-mêmes et les structures qui les supportent pour qu'ils résistent à de tels efforts quelles que soient les protections placées en amont et en aval (les normes demandent des essais de tenue électrodynamique d'une durée d'une seconde).

Le calcul exact des efforts électrodynamiques est souvent complexe compte tenu de la géométrie des conducteurs et des structures associées.

Cependant, quelques approximations permettent d'obtenir, dans la plupart des cas, des résultats valables à partir de formules simples.

Après quelques rappels sur le calcul des efforts électrodynamiques dans des géométries simples, la suite du document aborde le cas des jeux de barres dans les tableaux et les canalisations préfabriquées en exploitant ces formules.

2. efforts électrodynamiques entre deux conducteurs : origine et calculs

Le problème de la résistance des conducteurs aux sollicitations électrodynamiques n'est pas un sujet nouveau comme en témoigne le nombre de publications dont il a fait l'objet. Cependant, pour un concepteur, il reste toujours d'actualité de par l'application de méthodes numériques modernes qui permettent de le résoudre dans le cas de configurations de conducteurs complexes : d'où cette nouvelle synthèse objet du présent chapitre.

remarques préliminaires

L'application des formules nécessite de respecter les points ci-après :

■ dans toutes les formules intervient le produit des intensités $I_1 \cdot I_2$ circulant dans chacun des deux conducteurs

réagissant l'un sur l'autre. Dans le cas où leurs valeurs sont identiques ce produit est remplacé par le terme I^2 .

■ les intensités apparaissant dans les formules correspondent à la valeur crête des courants véhiculés dans chacun des conducteurs.

Or les valeurs efficaces I_{eff} sont le plus souvent utilisées ; dans ce cas I_{eff} doit être multiplié par un coefficient défini dans le chapitre 3.

■ les efforts sont exprimés en valeur absolue sans précision de leur direction dépendant du sens des champs et courants.

Le plus souvent ce sont des efforts par unité de longueur.

■ les conducteurs sont en matériaux amagnétiques et suffisamment éloignés de tout élément magnétique susceptible de modifier la répartition du champ magnétique qu'ils créent.

■ les phénomènes d'effet de peau et de proximité qui peuvent modifier assez sensiblement la répartition du courant dans la section des conducteurs massifs ne sont pas pris en compte.

origine et méthodes de calcul

La mise en évidence et la compréhension, il y a une centaine d'années, des influences mutuelles que ce soit entre deux éléments de courant ou entre champ magnétique et courant électrique (travaux d'Oersted, d'Ampère...) ont permis de bâtir un cadre théorique qui intègre ces phénomènes dynamiques entre conducteurs parcourus par des courants électriques.

Le sens des efforts électrodynamiques est connu (répulsion si les courants

dans les conducteurs circulent dans des directions opposées, attraction dans le cas contraire) et leurs valeurs s'obtiennent par application des lois du magnétisme.

Il existe en fait deux grandes méthodes de calcul des efforts électrodynamiques : La première méthode consiste à calculer le champ magnétique créé par un courant puis d'en déduire l'effort résultant s'exerçant sur un conducteur

placé en ce point et parcouru par un courant électrique (éventuellement différent du premier).

Elle fait appel (cf. encadré fig. 1) pour le calcul du champ soit à la loi de Biot et Savart :

$$(1) \vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot i \cdot \frac{d\vec{\ell} \wedge \vec{u}}{r^2},$$

soit au théorème d'Ampère :

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 \cdot I,$$

et pour le calcul de l'effort électrodynamique à la loi de Laplace :

$$(3) d\vec{f} = i \cdot d\vec{\ell} \wedge \vec{B}.$$

La seconde méthode est basée sur le calcul de la variation d'énergie potentielle d'un circuit ; elle utilise le théorème de Maxwell (cf. encadré fig. 1) :

$$(4) F_x = i \cdot \frac{\delta\Phi}{\delta x}.$$

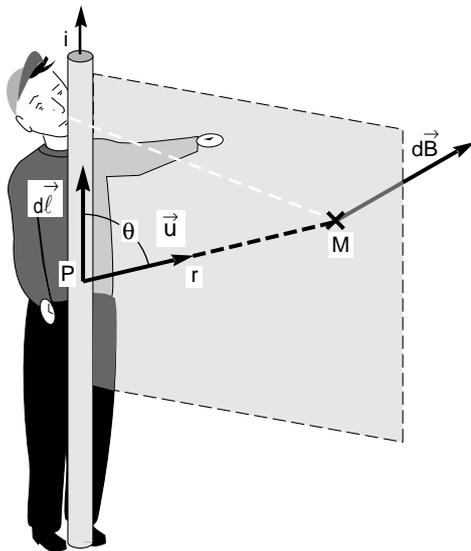
Loi de Biot et Savart

Chaque élément de circuit parcouru par un courant i , d'une longueur $d\vec{\ell}$, produit en un point M un champ $d\vec{B}$ tel que :

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot i \cdot \frac{d\vec{\ell} \wedge \vec{u}}{r^2}.$$

Ce champ est :

- perpendiculaire au plan défini par l'élément $d\vec{\ell}$ contenant le point P, et le point M,
- orienté vers la gauche d'un observateur placé sur l'élément, le courant circulant de ses pieds vers sa tête, son regard étant dirigé vers le point M (règle du bonhomme d'Ampère),
- de module $|d\vec{B}|$ avec \vec{u} vecteur directeur de \vec{PM} .



Théorème d'Ampère

Déduit de la formule de Biot et Savart, il s'énonce de la façon suivante :

soit I l'intensité qui parcourt un conducteur traversant une surface quelconque de contour C, la circulation du champ magnétique le long de C est donnée par l'équation :

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 \cdot I.$$

Loi de Laplace

Lorsqu'un circuit parcouru par un courant d'intensité i est placé dans un champ magnétique \vec{B} , chaque élément $d\vec{\ell}$ du circuit est soumis à une force égale à $d\vec{f} = i \cdot d\vec{\ell} \wedge \vec{B}$

Lorsque \vec{B} a pour origine un circuit électrique, la loi appliquée à chacun d'eux traduit l'effort qui s'exerce entre eux :

$$d\vec{f} = i_1 \cdot d\vec{\ell} \wedge \vec{B}_2 = i_2 \cdot d\vec{\ell} \wedge \vec{B}_1.$$

Théorème de Maxwell

Le travail des forces électromagnétiques exercé au cours du déplacement d'un conducteur indéformable parcouru par un courant invariable et placé dans un champ magnétique a pour expression :

$w = i \cdot \Phi$ où Φ est le flux du champ magnétique balayé pendant le déplacement.

Exploitée sous la forme du travail élémentaire, elle permet d'obtenir facilement les composantes F_x , F_y et F_z de la résultante \vec{F} des forces électromagnétiques :

$$\begin{aligned} dw &= i \cdot d\Phi \\ &= \int d\vec{f} \cdot d\vec{\ell} \\ &= \vec{F} \cdot d\vec{\ell} \text{ d'où} \end{aligned}$$

$$F_x = i \cdot \frac{\delta\Phi}{\delta x}$$

et de même pour F_y et F_z .

fig. 1 : rappel de lois physiques.

En fonction de la géométrie du système de conducteurs considéré, et selon la difficulté des calculs, l'une de ces trois démarches (1)+(3), (2)+(3), (4) est utilisable.

Toutefois les résultats obtenus peuvent différer légèrement selon la démarche utilisée par le fait que les hypothèses d'établissement de ces lois ne sont pas les mêmes.

calcul pour deux conducteurs filiformes parallèles de longueur infinie

Pour les géométries simples comme les conducteurs rectilignes filiformes l'application des lois de Biot et Savart et de Laplace conduit à la **formule classique de l'effort électrodynamique entre deux lignes de courant** :

$$F/\ell = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I_1 \cdot I_2 / d$$

avec :

F/ℓ en **N/m**,
 I_1 et I_2 en **A**,
 d en **m**,

(Le coefficient 2×10^{-7} résulte du rapport $\mu_0/4 \cdot \pi$).

Comme cette formule sert de base tout au long de cette étude il est important de préciser les hypothèses pour lesquelles cette expression est valable.

- les conducteurs sont réduits à une ligne de courant et donc leur section réduite à un point. En pratique cette condition est jugée comme acceptable pour des conducteurs de section quelconque si la distance entre ces deux conducteurs est beaucoup plus grande que la plus grande dimension transversale des conducteurs (par exemple 10 fois).

- les conducteurs sont considérés comme rectilignes et infiniment longs. En pratique cette condition peut être considérée comme satisfaite si leur longueur est supérieure d'au moins 15 à 20 fois leur espacement. Chaque fois que l'une de ces hypothèses n'est pas vérifiée, il y a lieu d'appliquer un coefficient correcteur.

influence de la forme des conducteurs

Cette formule de F/ℓ n'est applicable que pour des lignes de courant, or dans le cas de conducteurs massifs cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée. Dans ce cas l'influence de la forme du conducteur peut être déterminée en considérant la section du conducteur comme une superposition de lignes de courant qui interagissent entre elles. Une telle approche a été faite par Dwight dans le cas d'un conducteur à section rectangulaire.

Le coefficient correcteur qu'il a obtenu, classiquement noté k , peut être déterminé par calcul. Cependant l'expression de k étant relativement complexe sa valeur est le plus souvent déterminée sur les courbes en forme de S selon la figure 2.

L'équation est alors de la forme :

$$F/\ell = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I_1 \cdot I_2 (k/d)$$

avec :

F/ℓ en **N/m**,
 I_1 et I_2 en **A**,
 d en **m**.

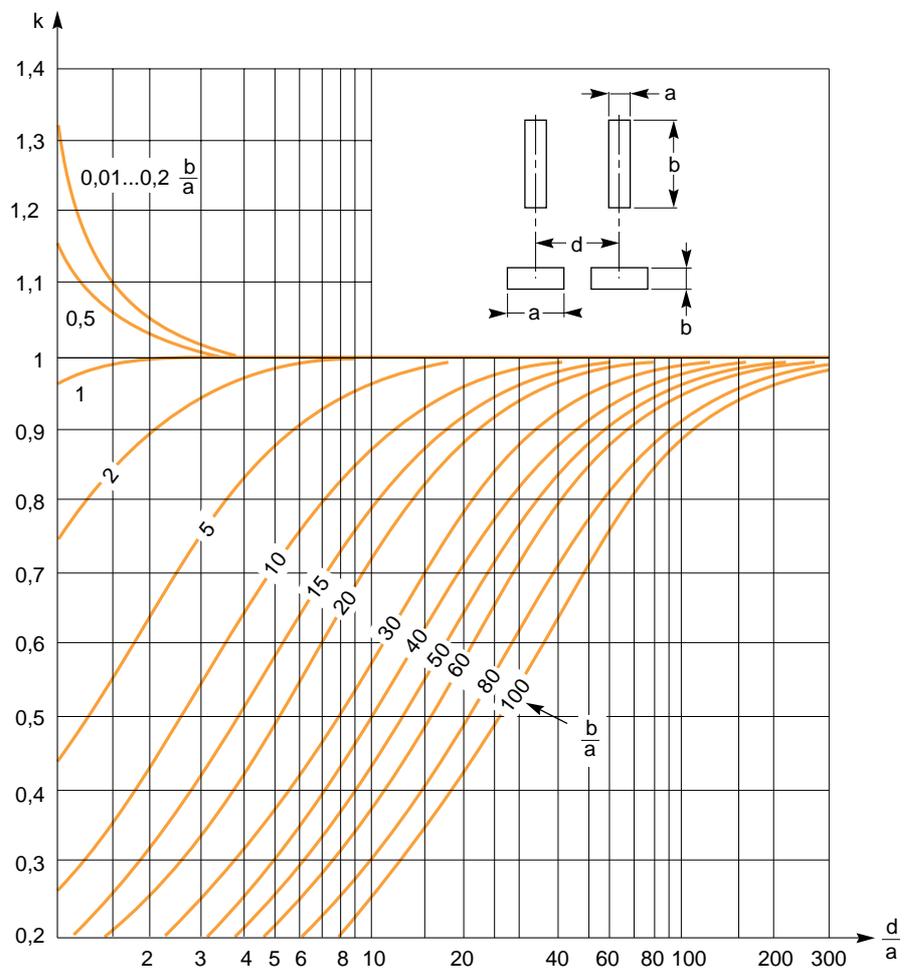


Fig. 2 : variation de k en fonction des rapports b/a et d/a (abaque de Dwight).

Des exemples d'efforts supportés par deux barres parallèles lors d'un court-circuit sont donnés dans le tableau de la figure 3.

La même démarche peut être suivie pour n'importe quelle forme de conducteur. Mais elle conduit rapidement à des calculs fastidieux. Souvent, dans l'équation précédente, le terme (k/d) est remplacé par $1/D$, où D représente la distance entre les conducteurs corrigée de l'influence de leur forme. Ces coefficients sont également utiles dans le cas d'un ensemble de conducteurs triphasé comprenant plusieurs conducteurs par phase ; ce cas fait l'objet du chapitre 3.

conducteurs de longueur réduite

■ conducteurs de longueur identique
Lorsque les conducteurs sont de même longueur ℓ inférieure de 15 à 20 fois leur entraxe d , la force résultante est :

$$F = 2.10^{-7} \cdot I^2 \cdot \frac{\ell}{D} \left[\sqrt{1 + \frac{d^2}{\ell^2}} - \frac{d}{\ell} \right]$$

■ conducteurs de longueur inégale (cf. fig. 4)

Dans ce cas l'effort résultant est :

$$F = 2.10^{-7} \cdot I^2 \cdot \frac{\ell}{D} [C_1 + C_2]$$

avec

$$C_1 = \sqrt{\left(1 + \frac{c_1}{\ell}\right)^2 + \frac{d^2}{\ell^2}} - \sqrt{\frac{c_1^2}{\ell^2} + \frac{d^2}{\ell^2}}$$

et

$$C_2 = \sqrt{\left(1 + \frac{c_2}{\ell}\right)^2 + \frac{d^2}{\ell^2}} - \sqrt{\frac{c_2^2}{\ell^2} + \frac{d^2}{\ell^2}}$$

Les valeurs de C_1 et C_2 peuvent se lire sur l'abaque de la figure 5.

Si les conducteurs ne sont pas en vis-à-vis sur toute la longueur, l'un dépassant l'autre, la formule est applicable avec c_1 ou c_2 négatif.

Remarque

Dans le cas où $c/\ell = 0$, on retrouve l'équation F du paragraphe précédent. La valeur de l'expression entre [] est donnée directement par la lecture de la courbe correspondante sur l'abaque de la figure 5.

conducteurs non rectilignes

C'est par exemple le cas des conducteurs présentant un coude (cf. fig. 6). Chaque branche pouvant interagir l'une sur l'autre lors du passage d'un courant important.

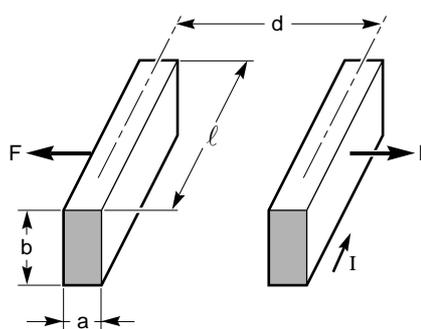
Le conducteur b peut pivoter autour du point O du conducteur fixe a .

La force F a pour valeur :

$$F = 2.10^{-7} \cdot I^2 \cdot \frac{a}{b} \cdot \ell \left[\frac{b}{a} + \sqrt{1 + \frac{b^2}{a^2}} \right] \cdot \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha}$$

Cette formule ne peut être exploitée que pour des valeurs de a et de b

telles que : $1 < \frac{a}{b} < 10$



caractéristiques					efforts	
a	b	d	ℓ	k	I	F
mm	mm	mm	m		kA	daN/m
5	80	100	1	0,91	35	224
5	80	100	1	0,91	50	1170

fig. 3 : caractéristiques nécessaires au calcul des efforts F entre deux conducteurs de même longueur.

Exemples d'efforts supportés par deux barres parallèles lors d'un court-circuit.

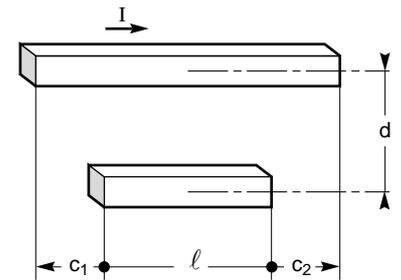


fig. 4 : dessin de deux conducteurs de longueur inégale.

$$C = \sqrt{\left(1 + \frac{c}{\ell}\right)^2 + \frac{d^2}{\ell^2}} - \sqrt{\frac{c^2}{\ell^2} + \frac{d^2}{\ell^2}}$$

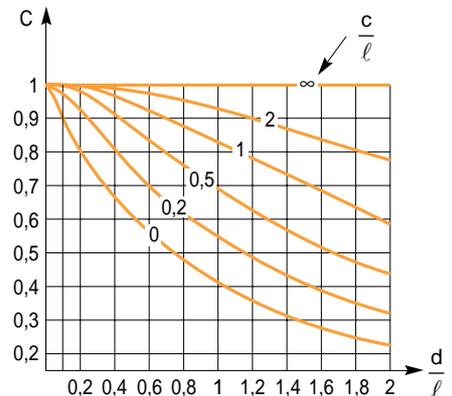


fig. 5 : calcul et variation de C en fonction des rapports c/ℓ et d/ℓ .

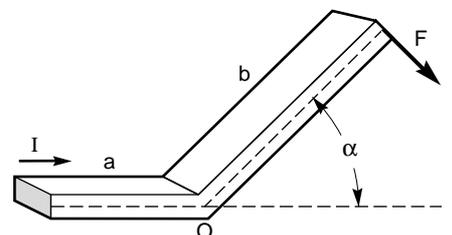


fig. 6 : dessin de deux conducteurs présentant un coude.

calcul dans le cas de configurations complexes

Les configurations de JdB considérées jusqu'ici dans cette étude étaient essentiellement mono-dimensionnelles voire bi-dimensionnelles dans le cas de conducteurs formant un angle. Dans ces cas, les méthodes de calcul des efforts électrodynamiques conduisent à des formules relativement simples.

Mais, il existe de nombreuses façons d'agencer des conducteurs ou de leur associer un environnement «perturbant» pour lesquelles les formules précédentes ne sont plus applicables.

Ces agencements sont désignés sous le terme de configurations complexes.

Trois types de problèmes peuvent alors se rencontrer séparément ou non :

- les conducteurs en regard ne sont pas tous dans un même plan, d'où un problème tridimensionnel ;
- les conducteurs sont à proximité de masses métalliques susceptibles de modifier la répartition du champ magnétique autour d'eux ;
- les conducteurs sont agencés de telle manière qu'il peut être nécessaire de prendre en compte les phénomènes d'effet de peau et de proximité. Ces derniers pouvant modifier de façon importante la répartition du courant dans la section des conducteurs massifs.

Le calcul des efforts électrodynamiques pour les trois types de problèmes cités précédemment suit la démarche générale mentionnée dans le paragraphe «origine et méthode de calcul» ; à savoir le calcul dans un premier temps de la valeur et de la répartition du champ magnétique en chaque point du système, puis des contraintes dans les conducteurs. Le problème est donc dissocié en deux, un problème magnétique et un mécanique.

Les lois physiques de base utilisées sont donc les mêmes mais la difficulté, par rapport aux cas simples, réside dans la conduite des calculs. En effet l'aspect tridimensionnel impose une approche numérique.

De nombreuses méthodes ont été développées ces dernières années pour résoudre numériquement des problèmes décrits par des équations différentielles. En particulier la méthode des éléments finis, initialement

développée pour des problèmes de mécanique a été étendue à de nombreux domaines notamment celui de l'électromagnétisme.

Sommairement, pour définir le domaine de calcul, cette méthode consiste à décomposer le système étudié en un certain nombre d'éléments constitués et reliés entre eux par des points appelés nœuds. Les grandeurs qui nous intéressent (champ magnétique, contraintes) sont déterminées numériquement en chaque nœud en discrétisant les équations (de Maxwell et de l'élasticité) qu'elles vérifient.

Ainsi la valeur de chaque grandeur étudiée n'est pas connue exactement en tous les points du système mais seulement au niveau des nœuds. D'où l'importance d'avoir une bonne correspondance entre ces nœuds et le système réel, et donc d'avoir un bon maillage. Pratiquement la conduite d'un calcul avec cette méthode comporte les étapes suivantes :

- choix du type d'analyse (ex : magnétisme...);
- choix du type d'éléments pour décrire le système ;
- définition de la géométrie du système et du domaine de calcul à l'aide de points clés ;
- choix des paramètres de maillage et maillage du domaine de calcul avec le type d'éléments retenus ; à ce stade le système étudié n'est qu'un ensemble de nœuds ;
- définition des conditions limites pour résoudre les équations ;
- exécution du calcul ;
- exploitation des résultats.

De nombreux logiciels de calcul existent sur le marché. Ils diffèrent par les catégories de problèmes qu'ils peuvent résoudre, et par la fiabilité des résultats qu'ils fournissent... Par exemple Merlin Gerin a choisi le logiciel ANSYS et Telemecanique a choisi Flux 2D car :

- ils permettent de traiter des problèmes très différents (thermique, mécanique, électromagnétisme ...),
- ils sont évolutifs, ainsi leurs dernières versions permettent de coupler différents problèmes (magnétique et mécanique ou mécanique et thermique...).

Il est vrai que ces méthodes peuvent paraître lourdes et demander un investissement important. Mais avec

une bonne maîtrise des problèmes liés aux techniques de modélisation, elles permettent rapidement d'évaluer le comportement d'un système ou d'une de ses parties autrement que par des essais. Ceci est particulièrement appréciable lors des phases de conception et de mise au point compte tenu du coût d'une campagne d'essais.

3. efforts électrodynamiques dans un JdB triphasé lors d'un défaut bi ou triphasé

La prise en compte des spécificités des JdB triphasés lors de la conception des JdB des tableaux BT et des canalisations préfabriquées, ainsi que celles liées à l'établissement et à la nature du défaut se fait par l'intégration de coefficients dans les formules présentées dans le chapitre 2.

Ces spécificités sont :

- la disposition des phases les unes par rapport aux autres (conducteurs en nappe, en quinconce...),
- le déphasage des courants dans chaque phase, l'un par rapport à l'autre,
- le type de court-circuit (biphasé ou triphasé),
- les caractéristiques d'établissement du court-circuit (régime symétrique ou asymétrique),
- la valeur crête de l'intensité,
- l'aspect alternatif des courants et donc vibratoire des phénomènes qu'ils engendrent.

Dans la suite de ce paragraphe l'étude ne porte que sur des jeux de barres en nappe, où les phases 1,2,3 sont disposées dans un même plan et avec le même écartement entre phases.

L'objectif recherché est de déterminer, à partir de l'analyse de l'évolution des

efforts électrodynamiques en fonction du temps et des différents paramètres ci-dessus, la valeur maximale de ces efforts et le conducteur le plus sollicité mécaniquement.

Les effets électrodynamiques du courant étant proportionnels au carré de son amplitude maximale une étude des courants de court-circuit s'impose.

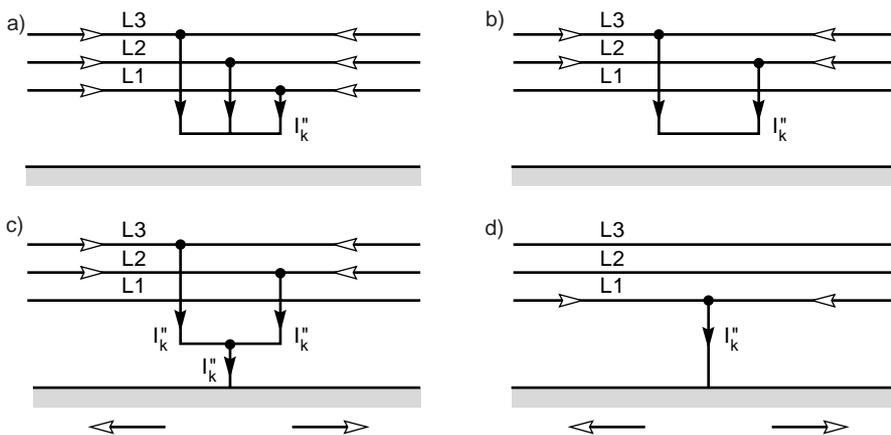
rappel sur l'établissement des courants de court-circuit

L'objectif de ce paragraphe est de rappeler et de préciser :

- les différents types de court-circuit qui peuvent se produire dans un système triphasé,
- les notions de régime symétrique et asymétrique,
- la démarche à suivre pour déterminer l'expression des courants de court-circuit ainsi que les paramètres dont ils dépendent.

Les types de court-circuit

Sur un réseau triphasé, ils sont au nombre de quatre, et sont représentés sur la figure 7.



- a) court-circuit triphasé symétrique.
b) court-circuit entre phases, isolé, ou biphasé.

- c) court-circuit entre phases, avec mise à la terre.
d) court-circuit phase-terre.

fig. 7 : les différents courts-circuits et leurs courants. Le sens des flèches figurant les courants est arbitraire (cf. CEI 909).

Expression des courants de court-circuit dans le cas d'un défaut triphasé

Dans la suite ne sont traités que les défauts triphasés symétriques et biphasés isolés qui présentent l'avantage, lorsqu'ils sont en régime équilibré, de se comporter comme un ou deux réseaux monophasés indépendants.

Soit un défaut apparaissant sur le schéma monophasé de la figure 8, dans lequel R et L.ω sont les éléments de l'impédance du réseau ; en fixant comme origine des temps l'instant où le court-circuit se produit, la f.e.m. (e) du générateur a pour valeur :

$$e = \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha)$$

avec α appelé angle d'enclenchement (cf. fig. 9), correspondant au décalage dans le temps, entre un zéro de la f.e.m. et l'instant d'établissement du court-circuit.

La loi d'Ohm appliquée au circuit donne :

$$e = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt}$$

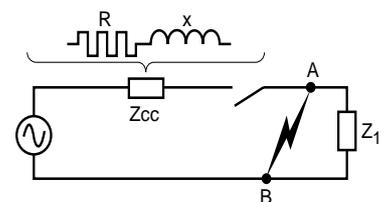


fig. 8 : schéma monophasé équivalent lors d'un défaut triphasé (cf. CEI 909).

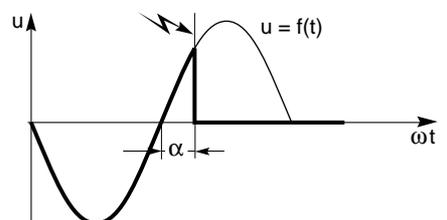


fig. 9 : représentation de α appelé angle d'enclenchement.

Si le courant est nul avant l'établissement du court-circuit, la solution de cette équation est :

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot [\sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi) + \sin(\varphi - \alpha) \cdot e^{-t/\tau}]$$

avec :

$$\varphi = \arctg \frac{L \cdot \omega}{R} \text{ (angle d'impédance)}$$

$$\tau = \frac{L}{R}$$

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + L^2 \cdot \omega^2}}$$

L'ensemble des facteurs représentant la variation du courant en fonction du temps se trouve alors réuni par l'équation suivante :

$$\kappa = [\sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi) + \sin(\varphi - \alpha) \cdot e^{-t/\tau}]$$

Le terme κ peut être aussi calculé à l'aide de la formule approchée définie par la CEI 909 :

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-\frac{3 \cdot R}{L \cdot \omega}}$$

L'écart par rapport à la valeur exacte est inférieure à 0,6%.

L'analyse de cette fonction permet de définir les régimes, symétrique et asymétrique, d'un défaut (cf. Cahier Technique n° 158).

Dans le cas d'un système triphasé le courant dans chacune des phases est de la forme :

$$i_1(t) = \sqrt{2} \cdot I_{\text{eff},3\text{ph}} \cdot [\sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi) + \sin(\varphi - \alpha) \cdot e^{-t/\tau}]$$

qui peut aussi s'écrire :

$$i_1(t) = \sqrt{2} \cdot I_{\text{eff},3\text{ph}} \cdot \kappa$$

où $I_{\text{eff},3\text{ph}}$ représente l'intensité efficace symétrique dans les trois phases en régime établi.

Compte tenu de leur déphasage relatif :

■ i_2 idem i_1 en remplaçant α par $\alpha + 2\pi/3$

■ i_3 idem i_1 en remplaçant α par $\alpha - 2\pi/3$.

En définitif, les efforts électrodynamiques dépendent donc :

- de l'instant initial du court-circuit (par l'intermédiaire de la valeur de α) ;
- des caractéristiques du circuit (par l'intermédiaire de la valeur de φ) ;
- du déphasage des phases ($2\pi/3$).

effort maximal sur un JdB triphasé

Un JdB triphasé comporte habituellement trois conducteurs placés côte à côte. Aussi chacun d'eux subit à un instant t un effort qui résulte de l'addition algébrique des interactions qu'il a avec les deux autres. Ces conducteurs ne peuvent avoir que deux situations, extérieure ou centrale :

■ position extérieure, par exemple la phase 1 :

$$F_1(t) = F_{2 \rightarrow 1}(t) + F_{3 \rightarrow 1}(t)$$

$$F_1(t) = \text{cste} \cdot [i_1(t) \cdot i_2(t) + i_1(t) \cdot i_3(t)/2]$$

■ position centrale, par exemple la phase 2 :

$$F_2(t) = F_{1 \rightarrow 2}(t) - F_{3 \rightarrow 2}(t)$$

$$F_2 = \text{cste} \cdot [i_1(t) \cdot i_2(t) - i_2(t) \cdot i_3(t)]$$

Or comme le laisse prévoir le paragraphe précédent de nombreux cas sont à envisager pour l'expression des courants selon la valeur de α , φ , et de la nature du court-circuit.

En fait, seule la valeur des efforts maximaux est nécessaire au dimensionnement des JdB, et elle correspond au courant le plus élevé qui se produit lorsque $\alpha = 0$.

Nota :

$F_{a \rightarrow b}$ = action (force) du (des) conducteur(s) de la phase a sur le(s) conducteur(s) de la phase b.

Cas d'un court-circuit triphasé

Les effets sur les conducteurs sont de la forme :

$$F_1 = \text{cste} \cdot [i_1(t) \cdot i_2(t) + i_1(t) \cdot i_3(t)/2]$$

$$F_2 = \text{cste} \cdot [i_1(t) \cdot i_2(t) - i_2(t) \cdot i_3(t)]$$

L'effort maximal sur les conducteurs au cours du temps est déterminé par les valeurs du temps qui annulent les dérivées de ces expressions par rapport au temps :

$$dF_1/dt = 0 \text{ et } dF_2/dt = 0.$$

D'où après quelques calculs, avec

$$I_{\text{max},3\text{ph}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{eff},3\text{ph}} \cdot \kappa$$

les deux équations :

$$\text{■ } F_{1\text{max},3\text{ph}} =$$

$$2 \cdot 10^{-7} \cdot \mathbf{0,808} \cdot (\sqrt{2} \cdot I_{\text{eff},3\text{ph}} \cdot \kappa)^2 \cdot 1/d$$

(cas d'un des conducteurs extérieurs au JdB triphasé)

$$\text{■ } F_{2\text{max},3\text{ph}} =$$

$$2 \cdot 10^{-7} \cdot \mathbf{0,866} \cdot (\sqrt{2} \cdot I_{\text{eff},3\text{ph}} \cdot \kappa)^2 \cdot 1/d$$

(cas du conducteur central au JdB triphasé).

A noter :

■ par rapport à la formule de référence rappelée dans le chapitre 2

$$F/\ell = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I_1 \cdot I_2/d$$

le coefficient correctif supplémentaire qui, selon la position du conducteur considéré, vaut 0,808 ou 0,866. L'effort maximal se produit donc sur le conducteur central.

■ en pratique, le coefficient κ permet de tenir compte des caractéristiques du circuit (R et L) ; sa valeur est comprise entre 1 et 2 (cf. fig. 10).

Cas d'un court-circuit biphasé

Dans ce cas $i_1 = -i_2$ et en utilisant les formules précédentes, il est possible de démontrer que les efforts électrodynamiques maximaux sont atteints quand $\alpha = 0$ (régime asymétrique) :

$$F_{2\text{max},2\text{ph}}$$

$$= 2 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot (\sqrt{2} \cdot I_{\text{eff},2\text{ph}} \cdot \kappa)^2 \cdot 1/d$$

Remarques

L'effort maximal ne se manifeste pas en biphasé, comme il est souvent admis mais en triphasé.

En effet

$$\frac{F_{2\text{max},3\text{ph}}}{F_{2\text{max},2\text{ph}}} = \frac{0,866 \cdot I_{\text{eff},3\text{ph}}^2}{I_{\text{eff},2\text{ph}}^2}$$

or en régime de distribution triphasé

$$I_{\text{eff},2\text{ph}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{eff},3\text{ph}}$$

d'où le rapport

$$\frac{F_{2\text{max},3\text{ph}}}{F_{2\text{max},2\text{ph}}} \approx 1,15.$$

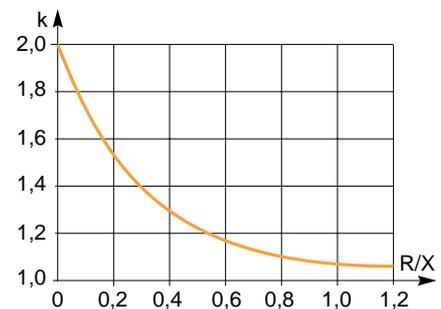


fig. 10 : variation du facteur κ en fonction du rapport R/X .

Souvent les organismes de contrôle exigent des essais bi et triphasés avec des courants de valeurs identiques. De telles conditions d'essais ne correspondent pas à des caractéristiques de distribution réelle et conduisent à des efforts biphasés supérieurs aux efforts triphasés.

les phénomènes de résonance

Les forces apparaissant lors d'un court-circuit ne constituent nullement un phénomène statique. Il s'agit en effet de grandeurs vibratoires d'une fréquence double de celle du réseau, ou de ses multiples. Les conducteurs possédant toujours une certaine élasticité peuvent, alors, se mettre à vibrer. Si la fréquence de vibration correspond à une fréquence naturelle de l'ensemble des conducteurs, des phénomènes de résonance peuvent apparaître. Dans ce cas les contraintes résultantes dans les conducteurs peuvent être beaucoup plus importantes que celles créées par les forces dues à la valeur crête du courant. Il convient donc de déterminer le rapport entre les efforts réel et statique subis par le conducteur. Ce rapport noté classiquement V_{σ} est appelé facteur de contrainte. En plus des caractéristiques mécaniques des conducteurs il faut tenir compte de la façon dont ils sont fixés dans l'équipement qui les reçoit (tableau BT, gaine...). Il est donc nécessaire de raisonner sur «la structure JdB».

Il existe deux modes classiques de fixation des JdB : l'encastrement et l'appui simple. Mais dans la réalité ce sont des éléments isolants qui supportent les conducteurs, d'où un mixte de ces deux modes (cf. fig. 11). Le nombre de paramètres à considérer est important et rend complexe l'étude complète de ces phénomènes. Le point de départ d'une telle étude est l'équation générale appliquée à un

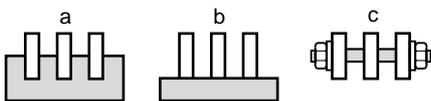


fig. 11 : les différents modes de fixation des JdB, par encastrement (a) par appui simple (b), et mixte (c).

conducteur supposé avoir un comportement élastique :

$$F(t) = M \frac{\delta y^2}{\delta t^2} + \lambda \frac{\delta y}{\delta t} + E \cdot J \frac{\delta y^4}{\delta x^4}$$

avec :

M = masse du conducteur par unité de longueur,

J = moment d'inertie de la section perpendiculaire à l'axe du conducteur, E = module d'élasticité,

λ = coefficient d'amortissement,

y = écartement d'un point du

conducteur par rapport à sa position d'équilibre, ou déflexion,

x = distance d'un point du conducteur par rapport à un appui fixe,

t = temps.

$$\text{où } F(t) = F_0 \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t)$$

avec :

F₀ = amplitude de l'effort,

ω = la pulsation du réseau ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$).

Les solutions sont de la forme :

$$y = \text{cste} \cdot F_k(t) \cdot G_k(x)$$

où les fonctions $F_k(t)$ et $G_k(x)$

dépendent respectivement du temps et de la variable espace, mais aussi :

■ des modes de fixation,

■ de l'effort électrodynamique lié au régime de court-circuit (symétrique ou asymétrique).

L'étude complète a été réalisée par Baltensperger, elle conduit à une expression des fréquences propres de résonance du conducteur :

$$\omega_{ok} = \frac{S_k^2}{p^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{M}}$$

avec

S_k = coefficient fonction des modes de fixation, par exemple pour une barre encastrée à ses extrémités :

$$S_k = (4 \cdot k - 1) \cdot \pi / 2 ;$$

k = rang de la fréquence de résonance ;

p = espacement entre les supports.

En pratique on constate que les fréquences propres des conducteurs, pour une section donnée, dépendent de l'espacement longitudinal des supports.

Le calcul a donc pour but d'examiner si le facteur de contrainte, résultant de l'espacement choisi pour les supports, est admissible pour la fréquence propre du conducteur ou de l'ensemble de conducteurs, d'où un coefficient R, homogène avec une longueur :

$$R = \sqrt[4]{\frac{E \cdot J}{M \cdot \omega^2} \cdot 10^3}$$

Le graphique de la figure 12 indique le facteur de contrainte V_{σ} à prévoir en fonction du rapport p/R, donc de la distance p entre les supports ; cette distance p devant être choisie pour que le rapport soit en dehors de la zone hachurée pour le facteur V_{σ} admis.

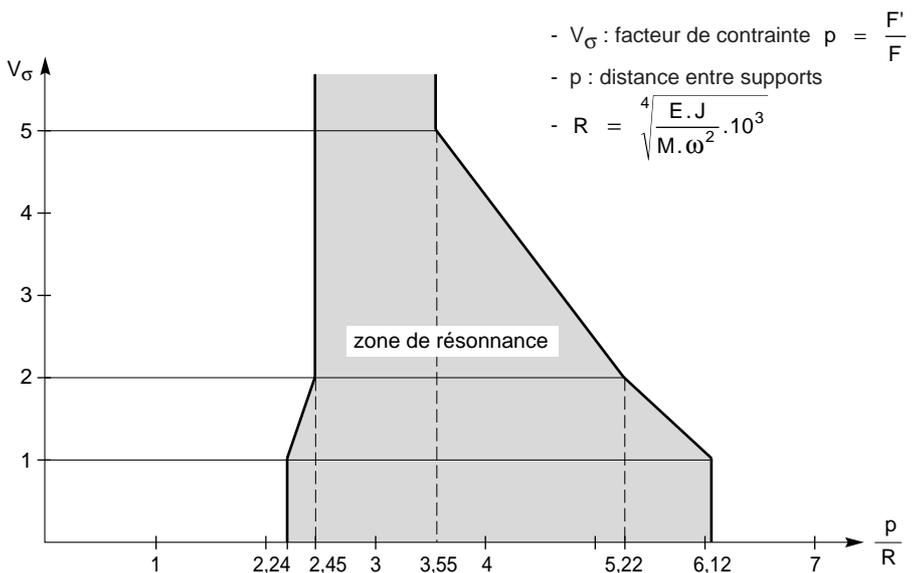


fig. 12 : facteur de contrainte V_{σ} à prévoir en fonction du rapport p/R.

4. application à des JdB triphasés BT

Dans ce chapitre les auteurs précisent comment les considérations théoriques précédentes sont prises en compte dans le cas de deux équipements BT que sont les tableaux BT et les canalisations électriques préfabriquées de type Canalis et Victa Dis.

cas des JdB dans les tableaux BT

Le JdB triphasé d'un tableau électrique BT est constitué par un ensemble de conducteurs regroupés par phases et maintenus en place par des supports. Il est caractérisé par :

- la forme des conducteurs,
- la disposition des phases les unes par rapport aux autres,
- l'agencement des conducteurs dans une même phase,
- le type de support et le mode de fixation des conducteurs (barreaux isolants, peignes, tiges isolantes...).

Les différents éléments qui constituent le système de jeu de barres doivent être dimensionnés de telle façon qu'ils puissent résister aux efforts électrodynamiques apparaissant lors d'un court-circuit (cf. fig. 13).

L'aspect pratique d'un tel dimensionnement étant de déterminer la distance entre les supports, donc leur nombre, pour une technologie donnée de JdB et de supports.

Conduite pratique du calcul

La méthodologie à suivre est résumée sur le diagramme ci-dessous :

I. Définition des données de base.

II. Calcul des efforts.

III. Calcul de la distance entre supports à partir des contraintes sur le conducteur le plus sollicité.

IV. Calcul de la distance entre supports à partir des contraintes sur les supports.

V. Détermination de la distance maximale entre supports, et vérification du comportement en vibration du JdB.

Les détails de chaque étape sont présentés ci-dessous dans le cas d'un JdB constitué de plusieurs barres à section rectangulaire par phase.

I - données de base pour conduire le calcul

■ dimension et forme d'un conducteur : (par exemple pour une barre son épaisseur a et sa largeur b en **m**).

■ nombre de conducteurs par phase : n .

■ valeur efficace du courant de court-circuit : I_{cc} en **kA** .

■ nature du défaut : bi ou triphasé.

■ distance entraxe de phase : d_{ph} en **m**.

■ mode de fixation des conducteurs dans les supports (encastrement ou appui simple).

Cette donnée est prise en compte par un coefficient β :

$\beta = \beta_1$ pour l'ensemble des conducteurs d'une phase,

$\beta = \beta_2$ pour un conducteur appartenant à 1 phase,

■ limite élastique du conducteur : $R_{p0,2}$ en **N/m²**

($R_{p0,2} = 125 \times 10^6$ N/m² pour l'aluminium type 1050 et

$R_{p0,2} = 250 \times 10^6$ N/m² pour le cuivre).

■ caractéristiques des supports : résistance mécanique R_m (en **N/m²**) selon la nature des sollicitations, et section du support sollicitée S_m (en **m²**).

II - calcul des efforts

Chaque conducteur d'une phase subit un effort dû aux actions entre phases et à celles des autres conducteurs de la même phase. L'effort maximal s'exerce sur les conducteurs les plus externes de la phase centrale.

Ce conducteur est soumis :

■ d'une part à la force résultant des deux autres phases :

$$F_1 / \ell$$

$$= \text{cste} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot k_1 \cdot (2,2 \cdot I_{cc})^2 \cdot 1/d_{ph}$$

(force par unité de longueur du JdB en **N/m**)

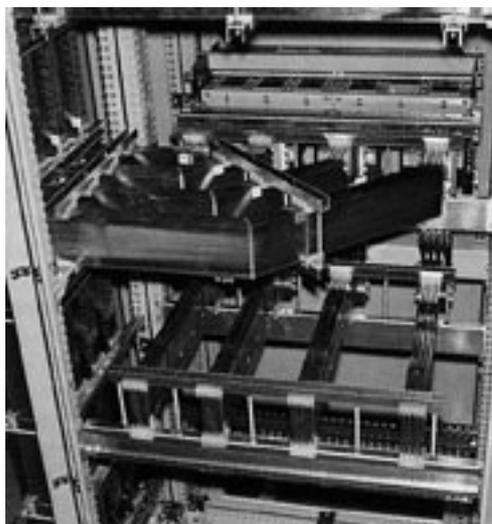


fig. 13 : JdB d'un tableau BT Masterbloc, prévu pour supporter les effets d'un courant de court-circuit de 80 kA. (Merlin Gerin).

cste = 1 ou 0,87 selon qu'il s'agit d'un défaut bi ou triphasé.

k_1 = coefficient de Dwight qui prend en compte la forme de l'ensemble des conducteurs de la phase.

Ce coefficient, paramétré par les rapports hauteur (h) / largeur d'une phase (l') et d_{ph} / largeur d'une phase, peut être calculé ou lu sur des abaques.

Icc = valeur efficace du courant de court-circuit en kA.

d_{ph} = distance entraxe de phases en m.

Le coefficient multiplicateur 2,2 permet de calculer la valeur crête du courant de court-circuit.

■ d'autre part à la force attractive (courant dans le même sens) résultant des autres conducteurs de la phase considérée (cf. fig. 14), si ceux-ci sont liés mécaniquement :

$$F2 / \ell = \sum_i F2_{1 \rightarrow i} / \ell \text{ (en N/m)}$$

Equation de la même forme que la précédente mais prenant en compte les trois paramètres suivants :

$d_{1 \rightarrow i}$ = entraxe du conducteur 1 au conducteur i en m,

n = nombre de conducteurs par phases,

k_2 = coefficient de Dwight pour le conducteur de la phase.

III - calcul de la distance entre supports à partir des contraintes sur le conducteur le plus sollicité

Le conducteur le plus sollicité doit supporter la contrainte :

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = \frac{\beta_1 \cdot (F1 / \ell) \cdot d1^2}{8 \cdot Z} + \frac{\beta_2 \cdot (F2 / \ell) \cdot d1^2}{8 \cdot Z_0}$$

$F1 / \ell$ et $F2 / \ell$ = forces en N/m,

$d1$ = distance entre deux supports en m,

Z_0 = module résistant d'une barre en m^3 ,

Z = module résistant d'une phase en m^3 ,

$\beta_1 = 0,73$ (coefficient d'appui simple),
 $\beta_2 = 0,5$ (coefficient d'encastrement).

Ces valeurs sont indicatives pour une configuration de JdB donnée : les barres d'une même phase encastrées, les trois phases étant posées (cf. fig. 15).

ici $b = h$

$$k_1 = f(h, l', d_{ph})$$

$$k_2 = f(a, b, d')$$

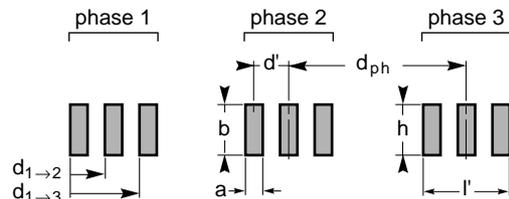


fig. 14 : paramètres pris en compte dans l'établissement de l'équation de la force attractive entre les conducteurs d'un JdB.

Critère «déformation du JdB» :

La barre la plus contrainte ne doit pas se déformer. Cependant, une légère déformation résiduelle est acceptée selon un coefficient q défini par la norme CEI 865.

Dans la formule précédente apparaît $d1$. Cette distance entre les supports peut être déterminée à partir d'un niveau de contrainte maximal au niveau des conducteurs à ne pas dépasser telle que $\sigma = q \cdot R_{p0,2}$ (par exemple $q = 1,5$).

IV - calcul de la distance entre supports à partir des contraintes sur les supports

Les supports doivent donc résister aux contraintes liées à l'effort $F1$.

Critère «casse du support» :

$$d2 = \frac{R_m \cdot S_m}{\alpha \cdot F1 / \ell}$$

avec

α = constante dont la valeur dépend du mode de fixation et du nombre de supports.

V - détermination de la distance maximale entre supports, et vérification du comportement en vibration du JdB

Pour résister aux efforts électrodynamiques, les supports doivent être placés à une distance d égale à la valeur la plus petite de $d1$ et de $d2$:

$$d \leq \min(d_1, d_2).$$

De plus il faut vérifier que cette distance n'entraîne pas de phénomènes de résonance.

Cette démarche de calcul suit les recommandations de la norme CEI 865 (1986) qui traite du calcul des effets des courants de court-circuit aussi bien sur les aspects thermiques que mécaniques.

Ces calculs ne remplacent pas les essais en grandeur nature, mais restent indispensables lors de la conception de nouveaux produits et pour répondre à des cas spécifiques.

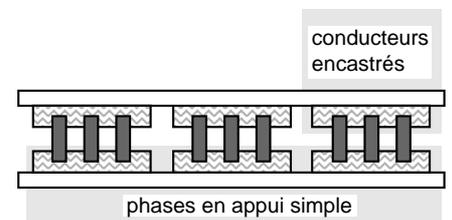


fig. 15 : configuration de JdB pour les coefficients $\beta_1 = 0,73$ (appui simple) et $\beta_2 = 0,5$ (encastrement).

Exemple de calcul

I. définition des données de base

- conducteurs
barres méplates en cuivre
épaisseur **a = 5 mm**
largeur **b = 100 mm**
fixation : **barres encastrées**
- chaque phase est constituée de
n = 3 barres espacées de 5 mm (d' = 10 mm)
- distance entraxe de phase
d_{ph} = 95 mm
- défaut triphasé **I_{cc} = 80 kA eff**
- limite élastique du cuivre
R_{p0,2} = 250 x 10⁶ N/m²
- résistance mécanique du support
R_m = 100 x 10⁶ N/m²
- section du support sollicitée en traction
S_m = 150 x 10⁻⁶ m²

II. calculs des efforts

■ entre phases

- $F1/\ell = 2 \cdot 10^{-7} \cdot cste \cdot k1 \cdot (2,2 \cdot I_{cc})^2 \cdot 1/d_{ph}$
 $cste = 0,87$ défaut triphasé
 $k1$: coefficient de Dwight fonction des rapports $b/(2n - 1) \cdot a$
 et $d_{ph}/(2n - 1) \cdot a$
 $k1 (100/5 \cdot 5, 95/5 \cdot 5) = 0,873$

■ entre barres d'une même phase

- en particulier sur la barre extérieure de la phase centrale
 $F2/\ell = \sum_i F2_{1,i}/\ell$
 1 indice de la première barre
 $i = 2$ et 3 indice des deux autres barres de la phase
 $F2_{1,i}/\ell = 2 \cdot 10^{-7} \cdot k2_{1,i} \cdot (2,2 \cdot I_{cc}/n)^2 \cdot 1/d$
 $d_{1 \rightarrow i}$: distance entre l'axe barres 1 et i
 $k2_{1,i}$: coefficient de Dwight fonction des rapports b/a et $d_{1 \rightarrow i}/a$
 $k2_{1,2} (100/5, 10/5) = 0,248$
 $k2_{1,3} (100/5, 20/5) = 0,419$

$$F1/\ell = 2 \times 10^{-7} \times 0,87 \times 0,873 \times (2,2 \times 80 \times 10^3)^2 \times 1/95 \times 10^{-3}$$

$$F1/\ell = 49\,530 \text{ N/m} = \mathbf{4\,953 \text{ daN/m}}$$

$$F2/\ell = 2 \times 10^{-7} \times (2,2 \times 80 \times 10^3/n)^2 \times [0,248/10 \times 10^{-3} + 0,419/20 \times 10^{-3}]$$

$$F2/\ell = 31\,490 \text{ N/m} = \mathbf{3\,149 \text{ daN/m}}$$

III. calcul de la distance entre supports à partir des contraintes sur le conducteur le plus sollicité (limite élastique du conducteur)

- $\sigma = \beta_1 \cdot (F1/\ell) \cdot d_1^2/8 \cdot Z + \beta_2 \cdot (F2/\ell) \cdot d_1^2/8 \cdot Z_0$
 $\sigma = 1,5 \cdot R_{p0,2}$
 $d_1^2 = 1,5 \cdot R_{p0,2} / [\beta_1 \cdot (F1/\ell)/8 \cdot Z + \beta_2 \cdot (F2/\ell)/8 \cdot Z_0]$
 $\beta_1 = \beta_2 = 0,5$
 $Z_0 = b \cdot a^2/6 = 4,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$
 $Z = n \cdot Z_0 = 3 \cdot Z_0 = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

$$d_1^2 = 1,5 \times 250 \times 10^6 / [0,5 \times (49\,530)/8 \times 1,25 \times 10^{-6} + 0,5 \times (31\,490)/8 \times 4,2 \times 10^{-7}]$$

$$d_1 = 0,229 \text{ m} = \mathbf{229 \text{ mm}}$$

IV. calcul de la distance entre supports à partir des contraintes sur les supports (limite élastique des supports)

- $d_2 = R_m \cdot S_m / (F1/\ell)$
 $\alpha = 0,5$

$$d_2 = 100 \times 10^6 \times 150 \times 10^{-6} / (0,5 \times 49\,530)$$

$$d_2 = 0,604 \text{ m} = \mathbf{604 \text{ mm}}$$

V. détermination de la distance maximale entre les supports

- $d = \text{minimum entre } d_1 \text{ et } d_2$

$$d < \mathbf{229 \text{ mm}}$$

Normes et essais

Pour les équipements BT, il existe deux catégories d'essais :

- des essais de mise au point aidant à leur conception,
- des essais de certification.

Dans le dernier cas ces essais font partie d'un ensemble d'essais appelés «essais de type» dont les rapports sont très souvent exigés pour un produit défini comme un «Ensemble de Série» (E.S.).

Cette appellation nécessite donc des essais et devient ainsi une garantie supplémentaire pour les utilisateurs. Mais malgré cette contrainte, les fabricants développent de tels produits qui leur permettent de mettre en valeur leur savoir faire.

Les essais de type définis par les normes CEI 439-1 (1992) et 2 (1987) ou NF 63-421 (1991) sont respectivement au nombre de 7 (439-1) et 10 (439-2).

En ce qui concerne la tenue aux courts-circuits, objet de ce document, ces normes précisent les conditions d'essai à respecter ainsi que la valeur normalisée du coefficient reliant la valeur crête à la valeur efficace du courant de court-circuit (cf. fig. 16).

Dans le cas où le système considéré diffère peu du système de référence (E.S.), il est appelé «Ensemble Dérivé de Série» (E.D.S.) et sa qualification peut se faire par calcul à partir d'une structure E.S.

Pour la tenue au courant de court-circuit une méthode d'extrapolation pour les E.D.S. est

valeur efficace du courant de court-circuit (kA)	cos φ	n
I ≤ 5	0,7	1,5
5 < I ≤ 10	0,5	1,7
10 < I ≤ 20	0,3	2
20 < I ≤ 50	0,25	2,1
50 < I	0,2	2,2

fig. 16 : valeur normalisée du coefficient n reliant la valeur crête à la valeur efficace du courant de court-circuit ; n correspond au coefficient $\sqrt{2} \cdot \kappa$ défini dans le chapitre 3 (cf. CEI 439-1).

définie par le rapport technique CEI 1117 (1992).

Une certification complète à la tenue aux courants de court-circuit nécessite trois essais :

- un essai de tenue à un courant de court-circuit triphasé ;
- un essai de tenue à un courant de court-circuit entre le neutre et la phase la plus proche. A noter que si le neutre a la même section que les autres phases et si la distance entre le neutre et la phase la plus proche est identique à la distance entre phases, cet essai correspond à un court-circuit biphasé ;
- un essai de tenue à un court-circuit entre une phase et le conducteur de protection.

Pour chacun d'eux le constructeur doit préciser la valeur efficace du courant de court-circuit et sa durée, généralement 1s (pour vérifier la contrainte thermique liée au courant de court-circuit).

En ce qui concerne la valeur du courant de court-circuit pour l'essai triphasé il faut distinguer deux valeurs : **la valeur présumée et la valeur réelle ou traversante.**

Leur différence est due, à la prise en compte ou non de l'impédance du JdB, lors de l'étalonnage, en pratique :

- étalonnage réalisé, sous une tension égale à la tension d'emploi, à l'entrée du tableau ⇒ valeur présumée de l'I_{cc} ;
- étalonnage fait, à très basse tension, à extrémité du JdB au point de court-circuit ⇒ valeur réelle.

Il est clair que pour une même valeur annoncée de l'intensité du courant de court-circuit le second cas est beaucoup plus contraignant. La différence pouvant être selon le circuit de 20 à 30 %.

Dans le cas de l'essai phase-neutre la valeur du courant de court-circuit correspond à 60 % de celle du courant (présumé ou réel) de l'essai triphasé.

Une tendance actuellement prise par de nombreux constructeurs (dont Merlin Gerin et Telemecanique) est de réaliser ces essais en courant réel. De plus pour que ces essais soient représentatifs des effets les plus défavorables possibles pendant un

court-circuit, les points suivants doivent être respectés :

- présence d'un régime asymétrique au moins sur une des trois phases ;
 - présence d'au moins un joint ou éclisse sur le jeu de barres testé ;
 - réalisation d'un court-circuit boulonné ;
 - prise en compte des phénomènes vibratoires en maintenant le défaut pendant au moins dix alternances soit 200 ms en 50 Hz ; cette durée est souvent portée à 1s pour vérifier en même temps la tenue thermique (CEI 439-1).
- Les différentes étapes de ces essais sont :
- étalonnage du circuit en court-circuitant les sorties du transformateur ;
 - raccordement du JdB au transformateur de la plate-forme ;
 - montage du court-circuit (pièce spécifique reliant toutes les barres) sur le JdB ;
 - essai en temps court (environ 10 ms) pour déterminer l'impédance du JdB ;
 - essai de tenue 1 s sur l'ensemble.

cas des canalisations préfabriquées de type Canalis et Victa Dis

La construction des jeux de barres triphasés préfabriqués - du type Canalis et Victa Dis - destinés au transport et à la distribution du courant (cf. fig. 17) se fait selon les règles de l'art et en accord avec les normes spécifiques dont les principales sont les CEI 439-1 et 2 (International) et UL 857 (États-Unis).

Conception

Les techniques mises en œuvre diffèrent en fonction des plages d'intensité considérées, plus particulièrement pour les courants forts au-delà de 100 A.

Actuellement il existe principalement trois conceptions de canalisations :

classique,

□ sandwich,

□ plaquée.

■ conception classique (de 100 à 800 A)

Les conducteurs sont placés dans une enveloppe métallique et tenus à intervalles réguliers par des isolateurs en forme de peigne (cf. fig. 18).

Les efforts électrodynamiques, qui se développent lors des courts-circuits,

suivent les lois précédemment développées et se traduisent par une déflexion des conducteurs entre isolateurs, et une mise en vibration de l'ensemble.

La forme et la section des conducteurs résultent d'un optimum à trouver entre :

□ l'échauffement des conducteurs ;

□ la chute de tension admissible ;

□ le coût de réalisation.

Avec pour impératifs, en ce qui concerne la tenue mécanique, que la déflexion des conducteurs reste dans le domaine élastique (pas de déformation permanente après un court-circuit) et ne réduise pas de façon anormale le niveau d'isolement (entre phases ou entre phases et terre) lors de la période transitoire du court-circuit pendant laquelle les phénomènes électrodynamiques prennent naissance.

Pratiquement cela s'obtient en ajustant la portée entre isolateurs.

■ conception sandwichée et ventilée (de 1 000 à 5 000 A)

Au-delà d'une certaine intensité - 1000 A - et pour rester dans des dimensions et des conditions d'échanges thermiques acceptables pour la canalisation, le courant d'une même phase est réparti sur plusieurs

conducteurs. Il existe des canalisations sandwichées jusqu'à cinq conducteurs / phase.

Deux possibilités s'offrent alors aux concepteurs :

□ soit laisser regroupés les conducteurs d'une même phase,

□ soit intercaler les conducteurs élémentaires de phases de manière ordonnée (1-2-3) + (1-2-3) + (1-2-3) pour aboutir à la configuration dite sandwichée (cf. fig. 18).

Ce type de conception est très bien adapté à la distribution de courant horizontale.

■ conception plaquée et non ventilée (de 1 000 à 5 000 A)

Dans cette disposition, les conducteurs à section rectangulaire revêtus d'une gaine isolante sont maintenus en contact tout au long de la canalisation, comme dans un câble (cf. fig. 18). Le serrage des conducteurs permet d'assurer l'échange thermique nécessaire.

Pour une facilité de fabrication, les conducteurs sont généralement à épaisseur constante, et seule leur largeur varie selon l'intensité nominale des JdB (jusqu'à environ 250 mm). Pour les intensités élevées,

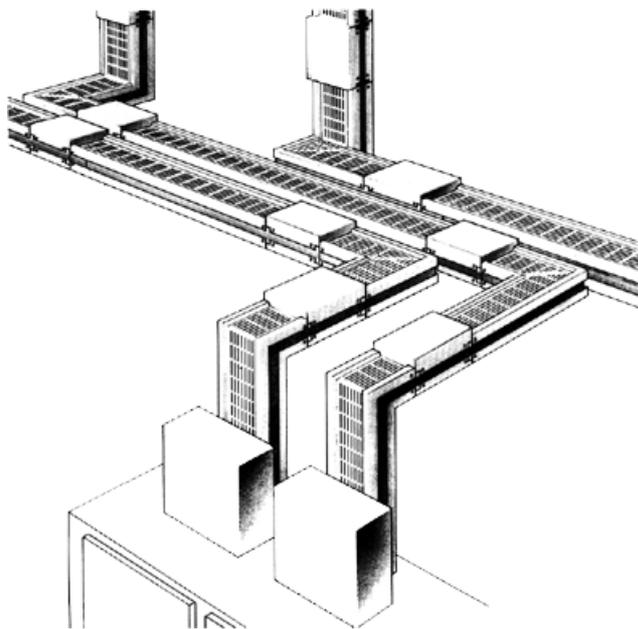


fig. 17 : JdB préfabriqué de distribution électrique 3000 A Canalis (Telemecanique).

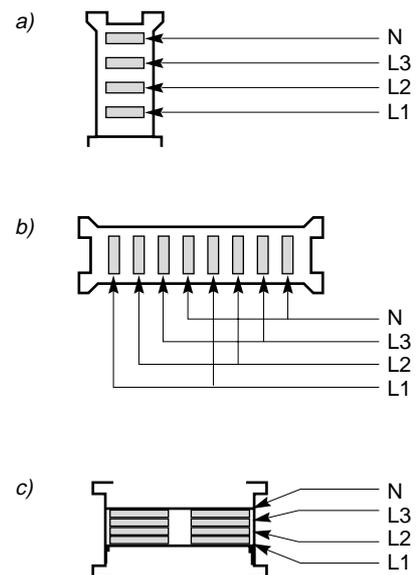


fig. 18 : les différentes conceptions de JdB triphasés préfabriqués : classique (a), sandwichée (b), et plaquée (c).

deux voire trois conducteurs par phase, mais non sandwichés, sont nécessaires.

Les efforts électrodynamiques (charges réparties) lors d'un court-circuit sont, dans ces JdB, équilibrés par la réaction de la tôle de l'enveloppe.

De par son comportement thermique, ce type de conception est très bien adapté au transport de courant horizontal, ou vertical.

Répartition des efforts électrodynamiques

Ce paragraphe, à partir d'un exemple simple et concret permet de visualiser et de quantifier les différents efforts subis par les conducteurs.

La structure étudiée a pour caractéristiques :

- $I_n = 3000 \text{ A}$,
- trois conducteurs / phase, soit $1000 \text{ A / conducteur}$,

- section des conducteurs = $90 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,
- matière = aluminium ou cuivre,
- entraxe des conducteurs = 18 mm .

Les calculs présentés sous forme d'encadré (cf. fig. 19) chiffrent la sollicitation mécanique des conducteurs élémentaires (selon le sens du courant) des phases 1 et 2 dans le cas d'un court-circuit biphasé phase 1 / phase 2, avec correction de l'incidence géométrique suivant l'abaque de Dwight.

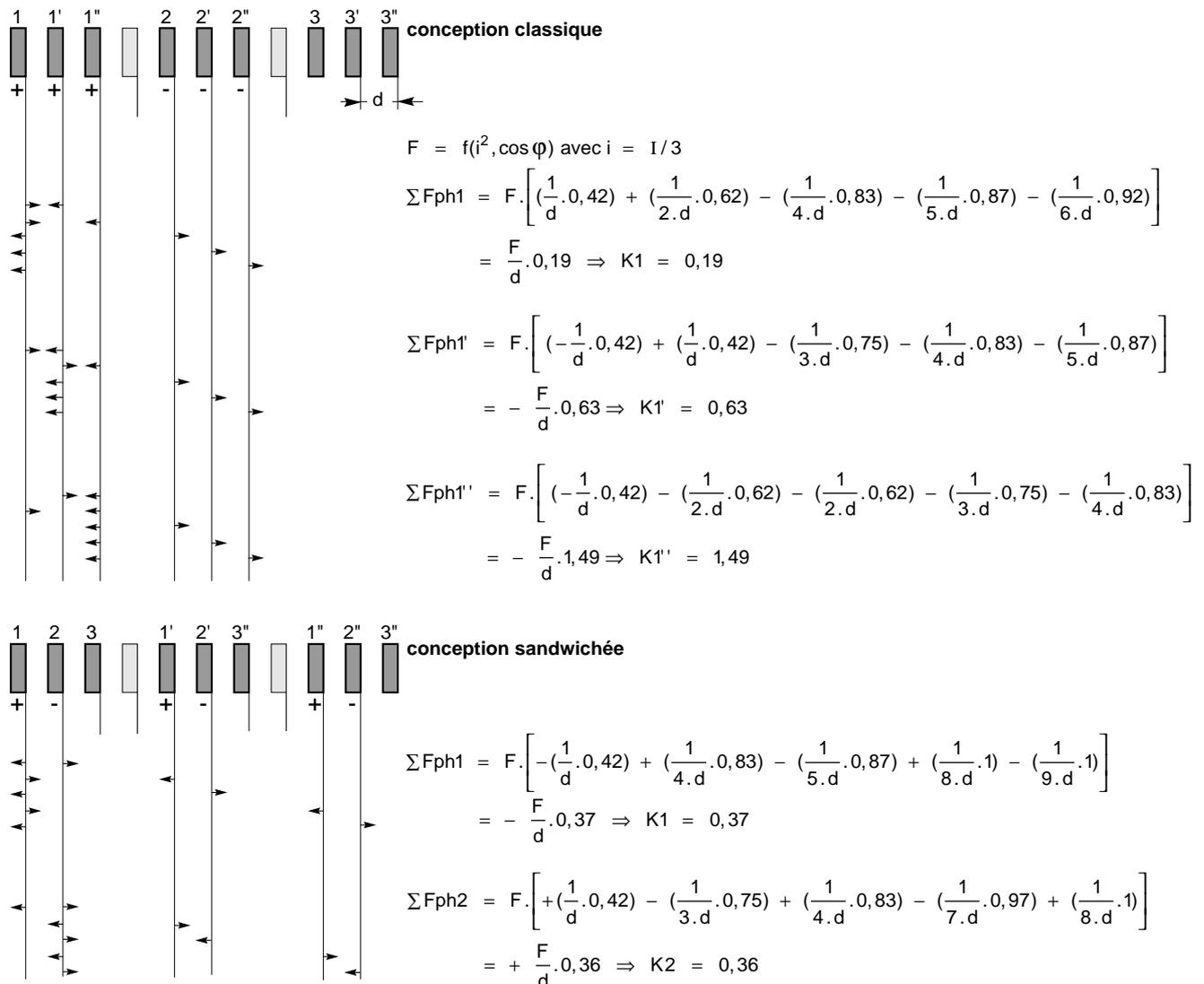


fig. 19 : sollicitation mécanique des conducteurs élémentaires des phases 1 et 2.

Conclusions partielles :

Avec la disposition classique, une majoration et une grande dispersion des efforts appliqués aux conducteurs élémentaires sont constatées, alors que pour la disposition sandwichée, les efforts restent sensiblement identiques sur chaque conducteur élémentaire.

Dans cet exemple, la différence de sollicitation mécanique est dans un rapport de 1 à 5 en faveur de la disposition sandwichée.

D'autre part, cette disposition bénéficie d'un autre avantage sur le plan de la chute de tension : le « sandwichage » des phases entraîne une diminution de la résultante de l'induction magnétique, et par voie de conséquence de la réactance..., donc de la chute de tension.

Dérivations et éclissages

Deux technologies sont généralement retenues pour prélever le courant au niveau des dérivations, ou pour le conduire au niveau des éclissages d'une ligne préfabriquée de transport et de distribution : la technologie « boulonnée » ou la technologie « à contact ».

■ technologie « boulonnée »

Les connections se font à partir de plages boulonnées spéciales prévues dès la conception des matériels.

Les lois précédemment développées s'appliquent parfaitement pour le dimensionnement des plages et des isolateurs.

L'application de cette technologie, a pour limites pratiques :

- 1250 A, en dérivation,
- jusqu'à 6000 A en éclissage.

Nota :

Certaines réalisations de coudes articulés dans un seul plan reprennent ce principe de la technologie « boulonnée ».

■ technologie « à contact »

Le prélèvement ou la conduction de courant se fait à partir de doigts de contact placés en parallèle.

En première approche le courant se répartit au prorata du nombre de contacts en parallèle. Chaque point de contact est le siège d'un effort statique F (développé par un ressort extérieur) dont le dimensionnement résulte d'un compromis entre le niveau

de la résistance de contact désiré pour assurer le passage du courant nominal sans échauffements anormaux, et la tenue aux efforts de frottement lors des dilatations des conducteurs.

A ce sujet, on peut noter l'intérêt de lubrifier les contacts élastiques ou d'utiliser dans le cas de pastilles de contact rapportées, des mélanges du type argent/graphite.

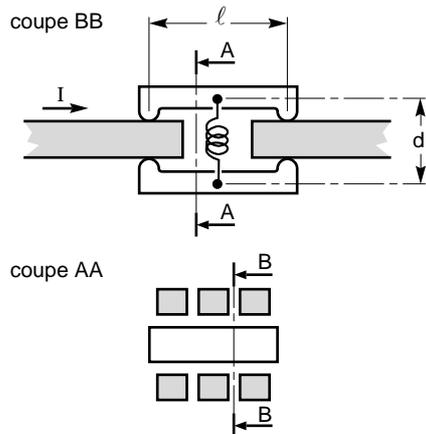
Cette technologie est plutôt exploitée dans les plages de courant suivantes :

- de 16 à 400 A en dérivation,
- de 40 à 1000 A en éclissage.

■ tenue aux efforts électrodynamiques

Alors que la technologie « boulonnée » impose aux différents éléments de la structure concernée les mêmes contraintes d'efforts électrodynamiques que pour les JdB en tableaux BT, la technologie « à contact » exploite ces efforts.

La disposition généralement retenue pour les doigts de contact ou « linguets » est présentée par le dessin de la figure 20 sur laquelle il est aisé de constater que les courants circulant dans les linguets opposés sont de même sens. Les efforts électrodynamiques (charges réparties) développés le long des linguets et calculés selon les méthodes précédemment décrites vont alors dans le sens du rapprochement. Ils renforcent ainsi l'effort de contact et s'opposent à l'effort de répulsion des contacts qui a pour origine la striction des lignes de courant au voisinage de la tâche de contact (cf. fig. 21) : c'est le **principe autocompenseur** (cf. fig. 20).



k est le coefficient de forme, à lire sur l'abaque de la figure 2, pour un conducteur de section globale a x b.

En écrivant que $F_a \geq F_r$ pour qu'il y ait compensation, il résulte que :

$$\frac{l}{d} \geq \sqrt{\left(\frac{3}{n \cdot k} + 1\right)^2} - 1.$$

Par exemple, pour $k = 0,8$, le rapport l/d doit atteindre :

4,6	pour	1 pince	(n = 1)
2,7	"	2 pincettes	(n = 2)
1,4	"	5 "	(n = 5)
0,95	"	10 "	(n = 10).

Il apparaît intéressant d'augmenter le nombre n de pincettes en parallèle mais on est vite limité par des considérations technologiques et aussi par les différences de résistance et de réactance entre les pincettes voisines ; celles-ci ne permettent pas une égale répartition du courant entre elles telle que suppose la valeur calculée de l/d .

Il faut donc prendre une marge de sécurité sur la valeur calculée de l/d d'autant plus grande que le nombre de pincettes en parallèle est élevé. En pratique il existe des applications allant jusqu'à 2 x 12 contacts en parallèle qui peuvent supporter des courants de courte durée admissibles de l'ordre de 50 kA RMS - 1 s.

Dans le calcul, on considère les efforts sur chaque demi-pince, de section transversale a x b, regroupant l'ensemble des pincettes élémentaires.

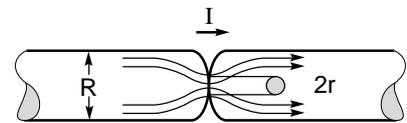
Si n est le nombre de pincettes en parallèle, l'effort de répulsion total sur la demi-pince est :

$$F_r = 2 \cdot n \cdot 3 \cdot 10^{-7} \cdot (I/2n)^2$$

L'effort d'attraction qui doit le compenser est :

$$F_a = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{I}{2}\right)^2 \cdot k \cdot \frac{l}{d} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{d^2}{l^2}} - \frac{d}{l}\right)$$

fig. 20 : principe autocompenseur.



Une force F de répulsion s'exerce entre ces deux conducteurs :

$$F = 10^{-7} \cdot \ln \frac{R}{r} \cdot I^2$$

(ln = logarithme népérien, et r rayon de la tâche de contact calculé avec la formule de R. Holm).

fig. 21 : exemple de la striction des lignes de courant au voisinage de la tâche de contact entre deux éléments conducteurs cylindriques.

Essais aux efforts électrodynamiques

Les essais de type, propres aux canalisations, sont définis par les normes CEI 439-2 et NF C 63-411.

La différence notable par rapport aux «tableaux BT» réside dans les conditions d'essais au court-circuit. Ces conditions précisent que les essais doivent être réalisés sur une ligne installée de longueur maximale de six mètres comportant au moins un joint d'éclissage et un coude (cf. croquis de la figure 22).

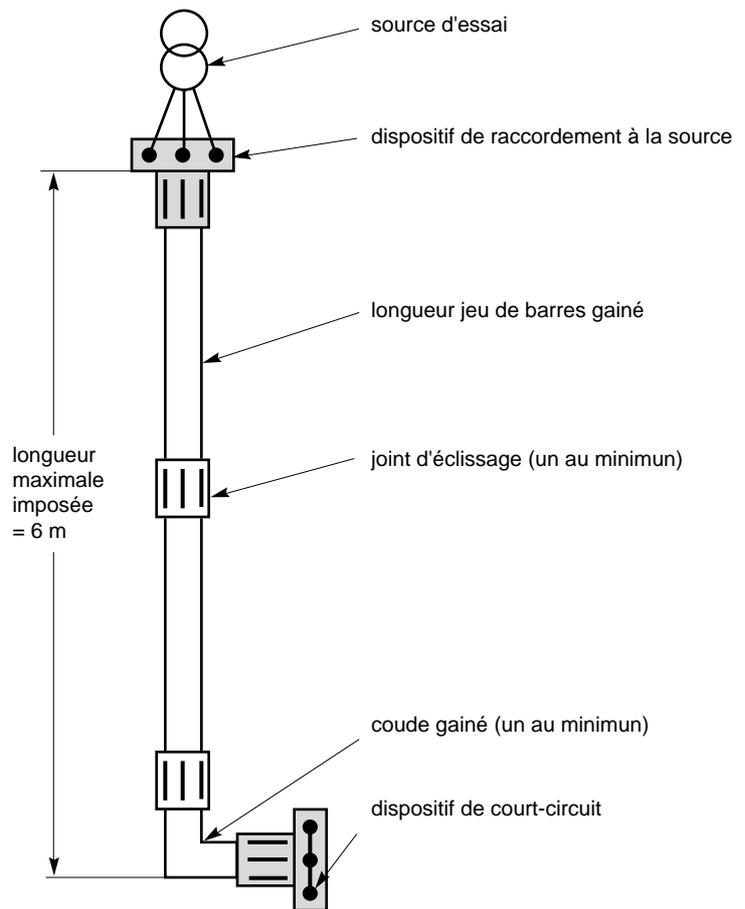


fig. 22 : croquis d'une ligne de JdB préfabriquée telle que définie par les normes pour les essais de type.

5. conclusion

Les efforts électrodynamiques élevés apparaissant en cas de court-circuit et les dégâts matériels qu'ils peuvent engendrer justifient l'importance apportée à la tenue mécanique des jeux de barres. Importance d'autant plus grande qu'une non tenue de ceux-ci nécessite au minimum leur remplacement et donc un arrêt de l'installation.

D'où l'intérêt pour les installateurs et / ou utilisateurs de choisir des équipements présentant une garantie maximale (E.S.), ou constitués d'éléments standards modifiés, montés en usine et testés (E.D.S.).

Dans les deux cas l'importance des essais est évidente. Mais ces essais imposent de lourds investissements. Investissements que seuls d'importants

fabricants peuvent supporter compte tenu de l'infrastructure qu'ils demandent et de leurs propres coûts.

A partir des cas types testés, des modifications de conception sont malgré tout possibles ; c'est alors que, dans une certaine mesure, l'approche calcul et le savoir faire du constructeur peuvent relayer l'approche expérimentale.

6. bibliographie

Normes

- CEI 439-1 : Ensemble d'appareillage à basse tension. Règles pour les ensembles de série et les ensembles dérivés de série.
- CEI 439-2 : Ensemble d'appareillage à basse tension. Règles particulières pour les canalisations préfabriquées. (NF C 63-411)
- CEI 865 : Calcul des effets des courants de court-circuit.
- CEI 909 : Calcul des courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif.
- CEI 909-1 : Rapport technique Suite de CEI 909.
- CEI 1117 : Rapport technique. Méthode pour déterminer la tenue aux courts-circuits des ensembles d'appareillage dérivés de série (EDS).

Cahiers Techniques Merlin Gerin

- Etude thermique des tableaux électriques BT. Cahier Technique n° 145 - C. KILINDJIAN.
- Sûreté de fonctionnement et tableaux électriques BT. Cahier Technique n° 156 - O. BOUJU.
- Calcul des courants de court-circuit Cahier Technique n° 158 - R. CALVAS, B. DE METZ-NOBLAT, A. DUCLUZAUX, et G. THOMASSET.

Publications diverses

- Elektodynamische Beanspruchung von parallelen Leitern. ou Effets électrodynamiques sur des lignes parallèles. P. BALTENSBERGER. Bulletin Schweiz Elektotechn Verein n° 25, 1944.
- Les jeux de barres en profilés dans les installations de première et deuxième catégories. R. ROLS. Article en quatre parties paru dans la Revue de l'Aluminium n° 212 - 213 - 214 - 215, 1954.
- Transport de fortes intensités en courant alternatif BT et MT. - 2^e partie - P. BEIGBEDER. Bulletin Etudes et Réalisations n° 43, 1957.
- Calcul des installations de jeux de barres triphasés en vue de la résistance aux efforts électrodynamiques. R. MASCARIN. Revue générale de l'Electricité RGE, août 1957.

- Sur l'établissement de formules permettant de déterminer l'effort linéique en cas de court-circuit affectant un jeu de barres triphasé disposé en nappe. R. MASCARIN. Revue générale de l'Electricité RGE, mars 1959.
- Über den Einfluß von Resonanzerscheinungen auf die mechanische Kurzschlußfestigkeit von biegesteifen Stromleitern. P. SIEBER. AEG Mitteilungen n° 49, 1959.
- Mechanical forces on current-carrying conductors. E.D. CHARLES. Proceedings IEE, vol. 110, n° 9. septembre 1963.
- Forces électrodynamiques apparaissant dans les postes électriques lors de court-circuit. G. SCHAFFER. Revue Brown Boveri, 1970.