

7/79

UNIVERSITÉ D'ALGER

1 ex

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT ÉLECTRICITÉ

# PROJET DE FIN D'ÉTUDES

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية  
المكتبة  
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHÈQUE

## LES JEUX DE BARRES DANS LES INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES

PROPOSE ET DIRIGÉ PAR

المدرسة لوطنية للعلوم الهندسية  
المكتبة  
M. DOBARDZIC M. ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHÈQUE

ÉTUDE PAR :

W. GUERRI

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ D'ALGER

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT ÉLECTRICITÉ

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

**LES JEUX DE BARRES**

**DANS LES**

**INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES**

PROPOSE ET DIRIGÉ PAR

M. DOBARDZIC M.

ÉTUDE PAR :

W. GUERRI

PROMOTION JANVIER 1979





## Sommaire.

	Page
Introduction.	
Chapitre I. Distribution de l'énergie électrique.	
1. 1. Généralités . . . . .	3
1. 2. Jeux de barres dans les réseaux électriques. . . . .	3
1. 3. Schéma de distribution général d'un complexe industriel. . . . .	5
1. 4. Jeux de barres dans les armoires de distribution. . . . .	8
1. 5. Jeux de barres dans les canalis préfabriqués. . . . .	10
Chapitre II. Choix de schémas de jeux de barres.	
2. 1. Généralités. . . . .	11
2. 2. Schémas à simples jeux de barres. . . . .	11
2. 3. Schémas à double et triple jeux de barres. . . . .	13
2. 4. Sources autonomes. . . . .	18
2. 5. Diminution des courants de court-circuit de jeux de barres. . . . .	19
Chapitre III. Contraintes électriques et choix d'appareils de coupure.	
3. 1. Courant nominal et courant de court-circuit . . . . .	25
3. 2. Tension et fréquence nominales. Tension de court-circuit des transformateurs. . . . .	26
3. 3. Puissance de court-circuit. . . . .	28
3. 4. Résistance, inductances et capacités de jeux de barres. . . . .	28



3.5. Effet pelliculaire . . . . .	30
3.6. Choix d'appareils de coupe . . . . .	33
Chapitre IV. Contraintes thermiques et mécaniques.	
4.1. Généralités . . . . .	37
4.2. Choix de la section des conducteurs de jeux de barres en fonction de l'intensité maximale admissible . . . . .	38
4.3. Contraintes thermiques . . . . .	48
4.4. Contraintes mécaniques . . . . .	56
Conclusion . . . . .	67
Bibliographie . . . . .	68

## Introduction

Les jeux de barres sont utilisés dans les réseaux de distribution d'énergie à haute tension et à basse tension dans tous les cas où existent une dérivation ou répartition d'énergie électrique. Ils assurent la liaison des sources de production aux transformateurs, le couplage des transformateurs et lignes de transport, l'alimentation des postes de transformation, les liaisons entre transformateurs et armoires électriques, la distribution d'énergie électrique dans les armoires de puissances très variées, dans les ateliers d'usines où existe une forte consommation d'énergie à desservir, et dans les immeubles de grande hauteur. Dans tous les cas, la continuité de service est assurée en grande partie par le choix adéquat des jeux de barres et de leurs schémas fonctionnels.

Les jeux de barres constituent donc une partie importante des réseaux de distribution d'énergie électrique et doivent par conséquent résister aux contraintes électriques, thermiques et mécaniques dans les conditions de fonctionnement les plus critiques. Ces contraintes se manifestent surtout par des échauffements intenses qui peuvent

entraînent la dégradation des isolants, la déformation et la rupture des conducteurs, et par des vibrations des barres sous l'effet des forces électrodynamiques qui provoquent parfois l'amorçage entre phases.

Dans la présente thèse, on se propose d'étudier les jeux de barres du point de vue de leur choix et de leur application dans la distribution d'énergie électrique en fonction de toutes ces contraintes et du rôle qu'ils doivent assurer pendant l'exploitation.

L'influence de la tension et en particulier de l'effet de couronne ne fait pas partie de cette étude. Ce problème pourra être l'objet d'un autre projet de fin d'études.

En cours d'élaboration de cette thèse, une visite de l'usine de fabrication des armoires électriques de la SONELEC à DRARRIA m'a permis de voir de multiples aspects pratiques que l'on prend en considération pour la réalisation de ces armoires.



## Chapitre I. DISTRIBUTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE.

### 1.1. Généralités.

Les réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique constituent des ensembles interconnectés. D'une façon générale, les lignes de transport débitent sur les postes énergétiques de coupure ou de transformation, dont la partie la plus importante est constitué par les jeux de barres, qui assurent la distribution et la protection et commande de multiples départs.

Les jeux de barres se composent en général de plusieurs conducteurs dont le nombre et la disposition dépendent de différents facteurs.

Dans ce qui suit, d'après les documents consultés, seront donnés quelques renseignements sur la composition des jeux de barres, leurs schémas et leur utilisation dans les armoires électriques et canalisations préfabriquées.

### 1.2. Jeux de barres dans les réseaux électriques.

Les réseaux de distribution d'énergie électrique peuvent avoir des structures variées, selon le régime de travail et les diverses conditions d'exploitation.

En fonction du mode de couplage des différents

éléments, on distingue [1] trois structures de réseaux : radial, bouclé et maillé.

1.2.a. Réseau radial (Fig. 1.1). Les lignes d'alimentation de

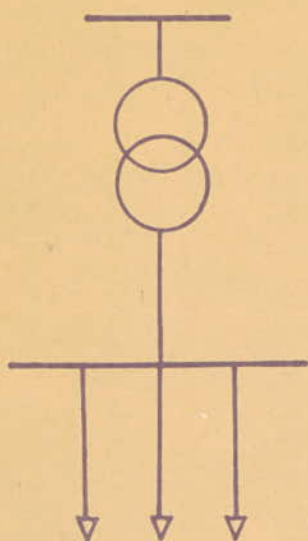


Fig. 1.1 - Réseau radial.

récepteurs rayonnent à partir des jeux de barres des postes de transformation correspondants qui sont alimentés par les réseaux de transport. Ce mode d'alimentation est le plus simple et le plus économique, mais du point de vue de sécurité d'alimentation et chutes de tension, il n'est pas convenable. En effet, en cas d'élimination d'une partie du circuit, l'alimentation totale est interrompue.

1.2.b. Réseau bouclé (Fig. 1.2). Ce type de réseau permet d'éviter

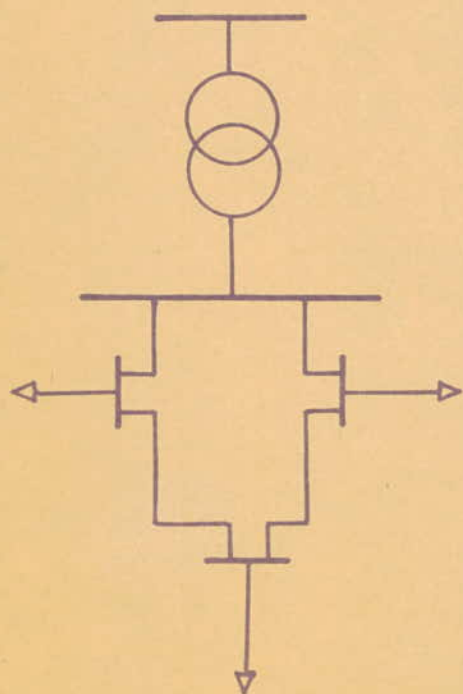


Fig. 1.2 - Réseau bouclé.

les inconvénients que présentent le réseau radial. Un réseau bouclé peut être fermé ou ouvert. Quand il est fermé, les courants de court-circuit sont importants. Quand il est ouvert, son exploitation est analogue à celle d'un réseau radial et les courants de court-circuit sont diminués. Les réseaux bouclés ouverts peuvent se fermer pour permettre une réalimentation en cas d'interruption de l'alimentation directe.

1.2.c. Réseau maillé (Fig. 1.3). Sur le plan de sécurité

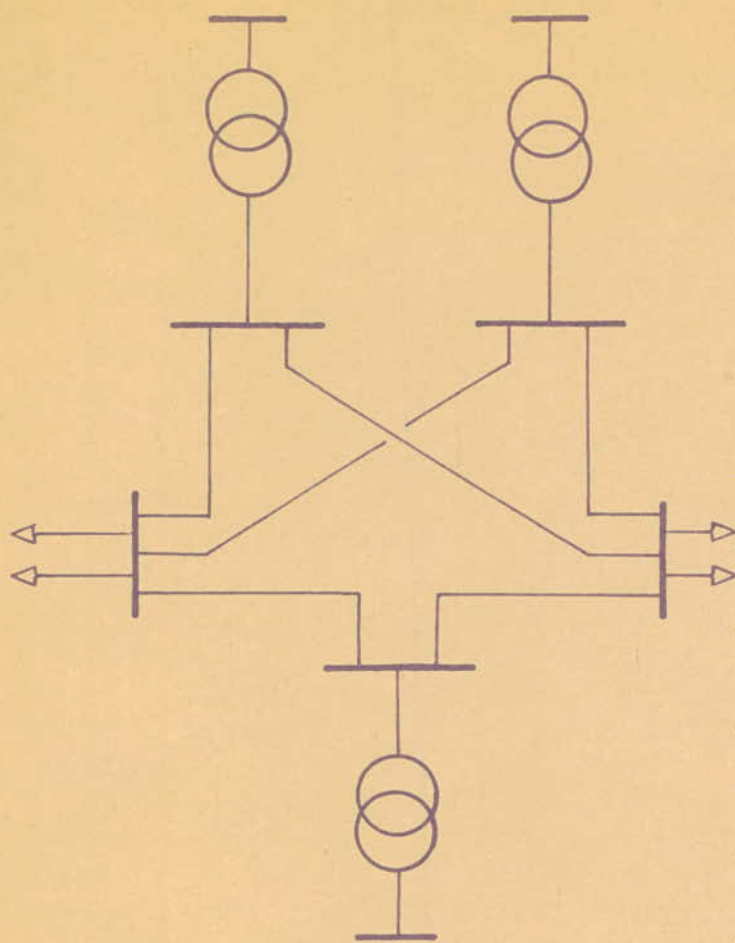


Fig. 1.3. Réseau maillé.

d'alimentation, la structure maillée permet d'éviter les inconvénients rencontrés dans les réseaux radial et bouclé, mais les courants de court-circuit sont très importants. D'autre part, l'exploitation des réseaux maillés est très compliquée et l'équipement nécessaire plus onéreux. Cette structure n'est employée que pour les réseaux à forte densité de consommation d'énergie comme c'est le cas des réseaux urbains.

1.3. Schéma de distribution général d'un complexe industriel.

Les schémas de distribution d'énergie électrique dans les usines dépendent de plusieurs facteurs tels que :

- Charge à desservir,
- Intérêt que porte le client à la continuité de l'alimentation,
- Dimensions des usines,
- Implantation géographique des usines par rapport au réseau de distribution d'énergie électrique,
- Eventuelles extensions.



Les usines étant différentes les unes des autres, il n'existe pas de schéma-type de distribution. Cependant, il est recommandé par les normes (Norme NFC-15-100 par exemple) de diviser l'installation en plusieurs circuits afin de limiter les courants de court-circuit d'une part et d'autre part, en cas de défaut sur une partie du réseau, seul le circuit correspondant est mis hors service.

Examinons, à titre d'exemple, le schéma général de distribution d'une usine à forte consommation d'énergie, composée de [%] :

- Sept unités de fabrication,
- Des services communs dits "Utilités" destinés à fournir aux unités de fabrication les éléments dont elle a besoin.

La puissance globale installée est de l'ordre de 30 MW.

**Alimentation générale (Fig. 1-4).** Deux lignes à 63 kV fonctionnant l'une en secours de l'autre, débitent sur un système de jeux de barres sectionnables 63 kV. A partir de ces jeux de barres sont alimentés quatre transformateurs de 12,5 MVA chacun. En aval de ces transformateurs, se trouve un tableau général de répartition 5,5 kV à double jeux de barres.

En régime permanent, les jeux de barres 63 kV sont découplés de sorte que seulement deux transformateurs débitent simultanément sur chaque jeu de barres 5,5 kV.

La puissance de court-circuit est ainsi limitée à 250 MVA.

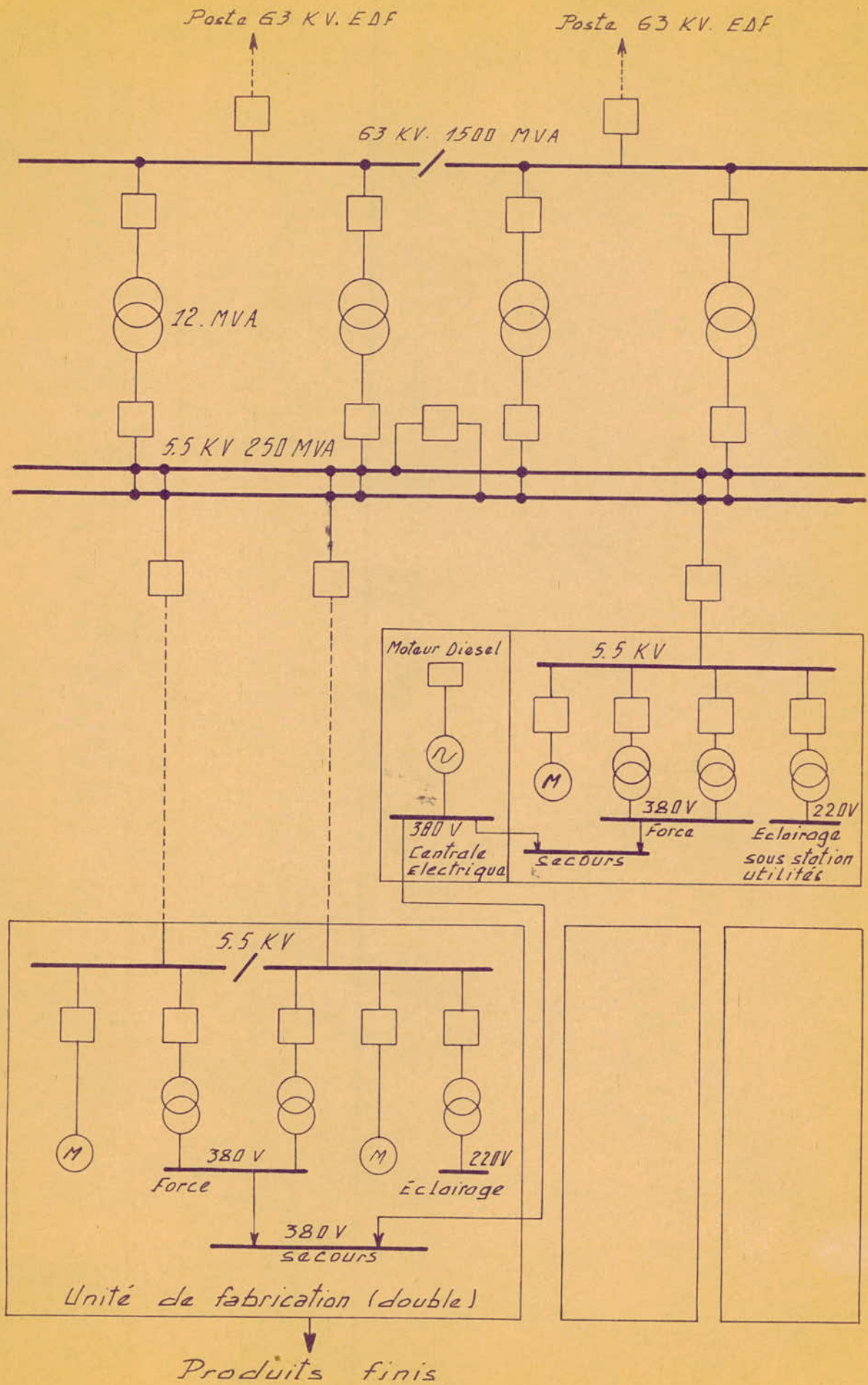


Fig. 1-4. Schéma de distribution d'un complexe industriel [8].



Alimentation des usines (Fig. 1.4.). Cette figure ne représente que les schémas d'alimentation des utilités et d'une unité de fabrication représentative. Toutes les unités sont alimentées de la même façon et indépendamment l'une de l'autre. Un jeu de barres sectionnable 5500 V alimente des moteurs à Haute Tension et des transformateurs abaisseurs 5500/380 V et 5500/220 V. Les unités reçoivent une alimentation de secours pour la mise à l'arrêt de l'usine. Dans le cas des utilités, un simple jeu de barres 5500 V alimente des moteurs à Haute Tension et des transformateurs abaisseurs. Les utilités consistant en des ensembles bien distincts, chacun de ceux-ci est alimenté par un tableau particulier, raccordé sur un tableau divisionnaire central. Les utilités comprennent en outre une centrale électrique pour la fourniture de l'énergie de secours.

Les schémas représentés dans les figures 1.1 à 1.4 permettent d'apprécier l'importance du rôle donné aux jeux de barres dans les installations électriques énergétiques et industrielles.

#### 1.4. Jeux de barres dans les armoires de distribution.

Les armoires électriques se composent en général de plusieurs cellules préfabriquées dont chaque type correspond à une fonction électrique bien déterminée comme par exemple: alimentation générale, protection de transformateur, départs vers divers récepteurs HT ou BT.



Les appareils de coupure et de protection ainsi que les jeux de barres sont prévus capables de supporter les contraintes électriques, thermiques et mécaniques apparaissant dans les conditions d'exploitation les plus critiques.

Les conducteurs de jeux de barres sont de formes et de matériaux variés. Dans le cas des armoires à BT, les barres sont des conducteurs en cuivre ou aluminium de section droite rectangulaire. Dans le cas des armoires à HT, les conducteurs sont, soit ronds, soit rectangulaires selon la valeur de la tension. Le cuivre est couramment utilisé mais on emploie également d'autres matériaux tels que l'aluminium.

Les dispositions des conducteurs de barres dans les armoires électriques sont aussi variables. On dispose les conducteurs de phase dans un plan vertical ou dans un plan horizontal. Une barre peut être composée d'un ou de deux à quatre conducteurs selon l'importance du courant qui les traverse.

En BT [3] l'isolement des barres est un problème très délicat car le danger d'amorçage est d'autant plus fréquent et d'autant plus redoutable que la tension est faible parce que d'une part, les distances entre conducteurs sont plus petites, et que d'autre part, à puissance égale, les courants de court-circuit sont en rapport inverse de la tension, alors que les forces électrodynamiques sont proportionnelles au carré de ces courants.

La température maximale admissible dans les armoires étant en général fixée par les normes à  $75^{\circ}\text{C}$  en service normal,

la densité du courant dans les barres dépendra des conditions de refroidissement résultant des dispositions adoptées pour les barres.

### 1.5. Jeux de barres dans les canalis préfabriqués.

Les canalis préfabriqués sont des canalisations constituées de jeux de barres maintenus rigidement par des isolateurs à l'intérieur d'une gaine métallique. Suivant leur fonction, on distingue [4] deux types de canalisations : canalisations industrielles et colonne montante pour les bâtiments de grande hauteur.

Les canalisations industrielles sont des "jeux de barres" constitués en général de méplats et capables de transporter des courants intenses, jusqu'à plusieurs milliers d'ampères. Le système de distribution par barres omnibus est le plus indiqué lorsque l'on a une forte concentration de puissance à desservir. Dans les ateliers, les barres forment des lignes de répartition d'énergie disposées parallèlement aux rangées des machines.

Les colonnes montantes sont constituées de conducteurs méplats ou ronds qui transportent des courants variant de 20 A jusqu'à 2000 A environ.



## Chapitre II. CHOIX DE SCHEMAS DE JEUX DE BARRES. DE BARRES.

### 2.1. Généralités.

En fonction de l'importance d'un poste énergétique ou d'une armoire, les jeux de barres peuvent être réalisés, en général, sous forme de simples jeux de barres, de doubles ou de triples, avec ou sans source d'énergie de secours. Ces schémas seront discutés dans les paragraphes suivants.

### 2.2. Schémas à simples jeux de barres.

Dans ce type de schéma, la liaison de chaque départ au jeu de barres peut être assurée par un sectionneur et un interrupteur en série (Fig. 2.1).

Les simples jeux de barres sont utilisés dans les cas de répartitions d'énergie vers les relativement faibles consommateurs comme par exemple: les armoires générales dont la puissance nominale n'atteint que 1000 kVA et les armoires divisionnaires d'éclairage et de force motrice. Ils sont surtout utilisés dans le domaine de haute tension, aux postes de livraison ou de transformation.

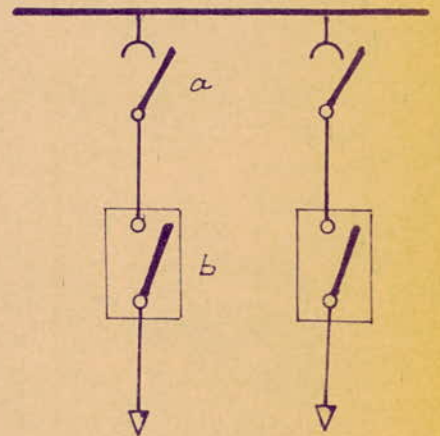


Fig. 2.1 - Connexions de départs sur simples jeux de barres [14]

a = sectionneur.  
b = disjoncteur.



Les schémas à simples jeux de barres peuvent être également appliqués dans les cas où les barres sont alimentées par deux ou plusieurs transformateurs. En général, ces derniers

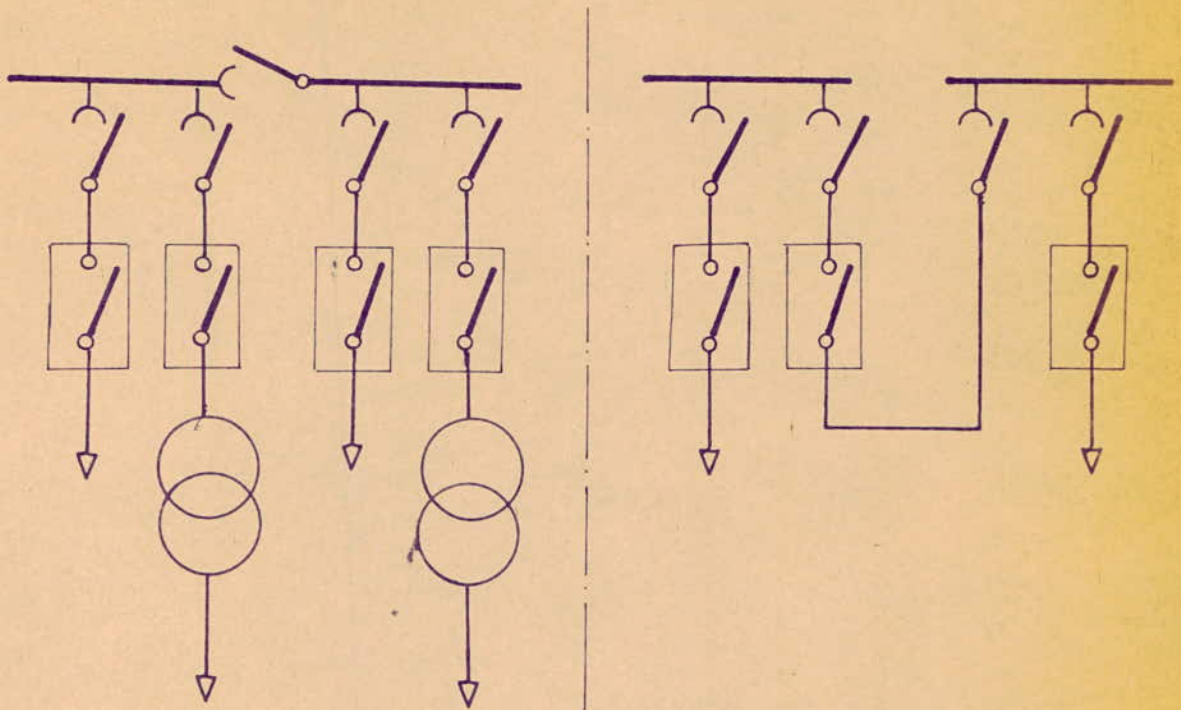


Fig. 2.2 - Simples jeux de barres connectés par un sectionneur ou par deux sectionneurs et un interrupteur. [4]

débitent en parallèle sur le jeu de barres si leur puissance totale n'est pas trop importante. Si au contraire leur puissance totale est importante, la marche en parallèle est évitée : les jeux de barres sont divisés en plusieurs sections, chacune d'elles étant alimentée par un seul transformateur (fig. 2.2).

Les schémas à simple jeu de barres ne conviennent pas aux installations très étendues, même si la puissance installée est faible car dans ce cas, les barres ont des longueurs considérables ; la répartition du courant vers les divers départs peut alors conduire à une très

mauvaise utilisation des sections de conducteurs, et à un surdimensionnement des appareils de coupure. D'autre part, en cas de défaut sur une partie du jeu de barres, l'alimentation totale est interrompue.

Une évolution, du point de vue de sécurité d'alimentation, des schémas à simple jeu de barres, est l'introduction des barres auxiliaires (Fig.2.3.) : si l'un des éléments du circuit de distribution est avarié, les barres auxiliaires permettent de combiner ensemble les éléments sains.

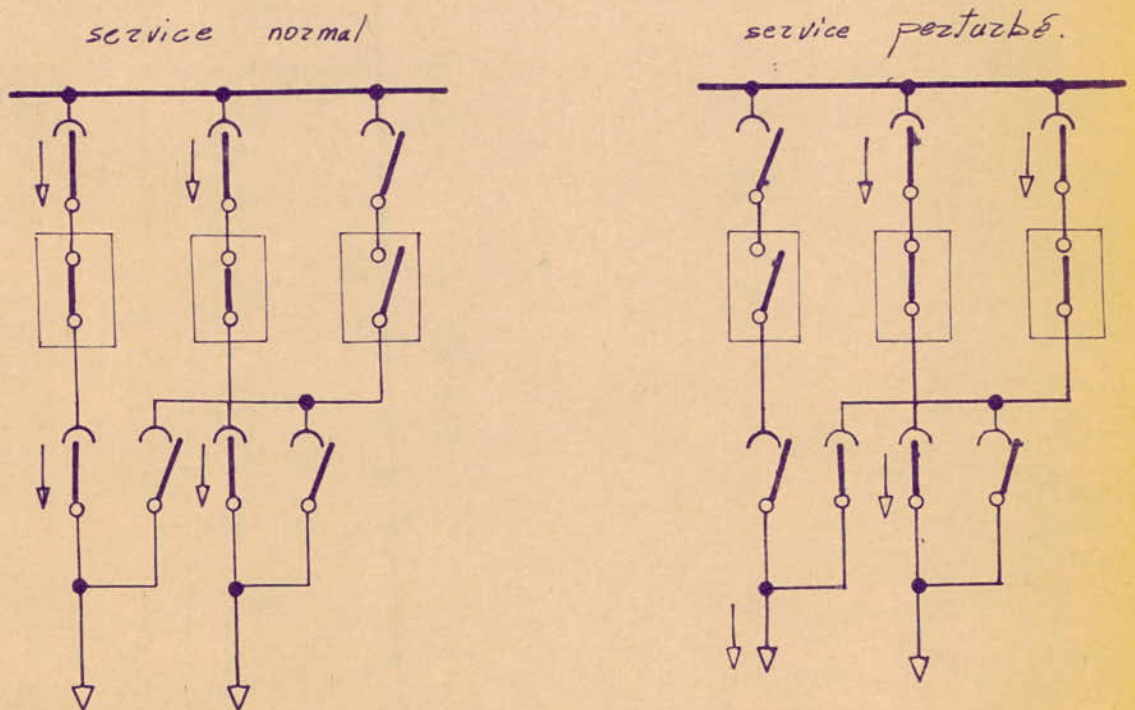


Fig. 2.3 - Introduction des barres auxiliaires dans un système de simple jeu de barres [14].

### 2.3. Schémas à double ou triple jeu de barres.

Dans les postes à double jeu de barres, chaque



départ est connecté sur les deux jeux de barres mais n'est alimenté qu'à partir d'un seul. La liaison des appareils aux barres peut être assurée de différentes façons :

- Un interrupteur et deux sectionneurs dont un par jeu de barres (Fig. 2.4.a).
- Un interrupteur et un sectionneur pour chacun des jeux de barres (Fig. 2.4.b).
- Un interrupteur et deux sectionneurs pour chacun des jeux de barres (Fig. 2.4.c).

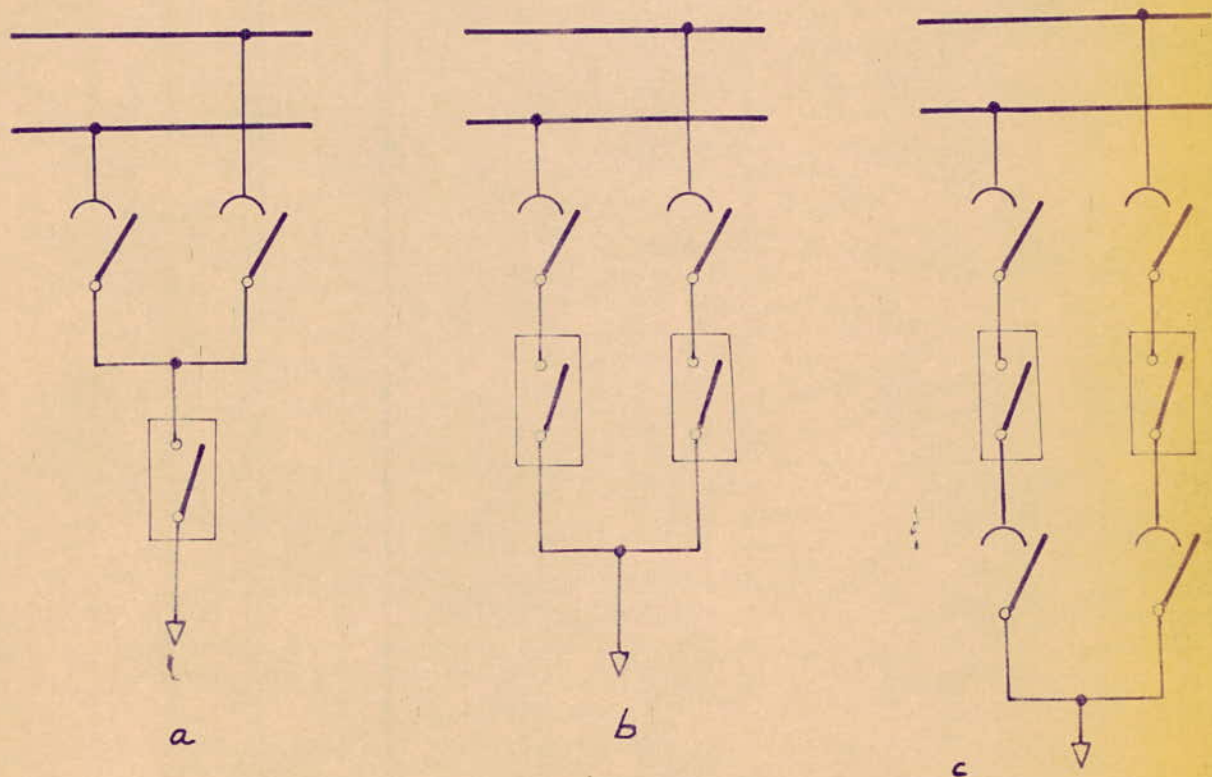
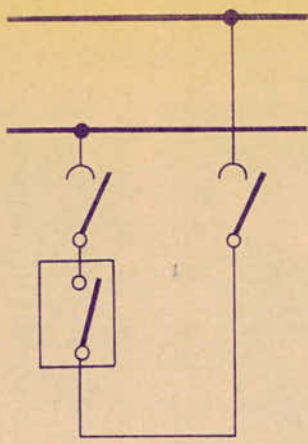


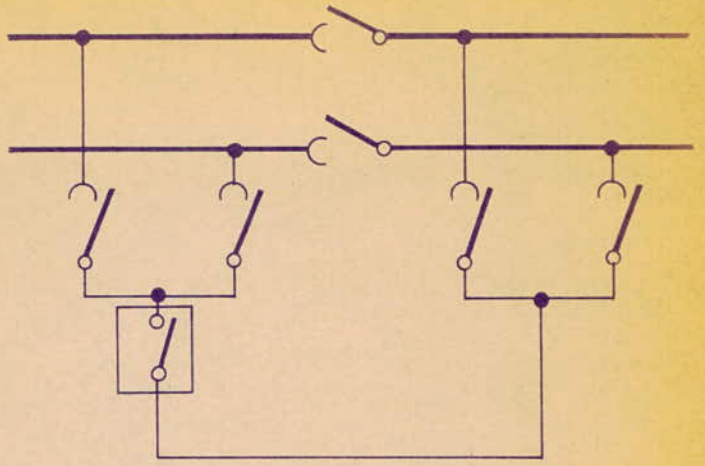
Fig. 2-4 - Connexions d'un départ sur un système de double jeux de barres [14].

Un ensemble d'appareils de coupure, ouverts en service normal, permettent la connexion des systèmes de double ou triple jeu de barres (Fig. 2.5 et 2.6). La sécurité, du point de vue de continuité, d'alimentation des départs et la possibilité d'entretien des appareils de coupure



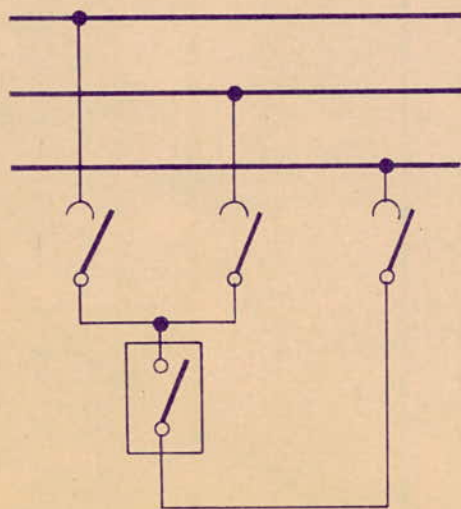


a

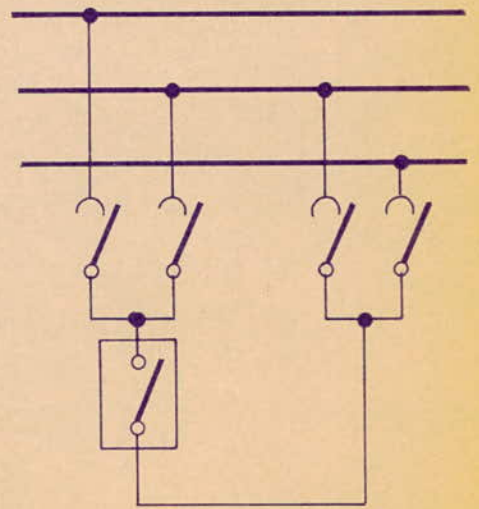


b

Fig. 2.5- Principes de connexions d'un système de double jeu de bazzes [14]



a



b

Fig. 2.6 - Principes de connexions d'un système de triple jeu de bazzes [14]

sont ainsi assurées (Exemple Fig. 2.7).

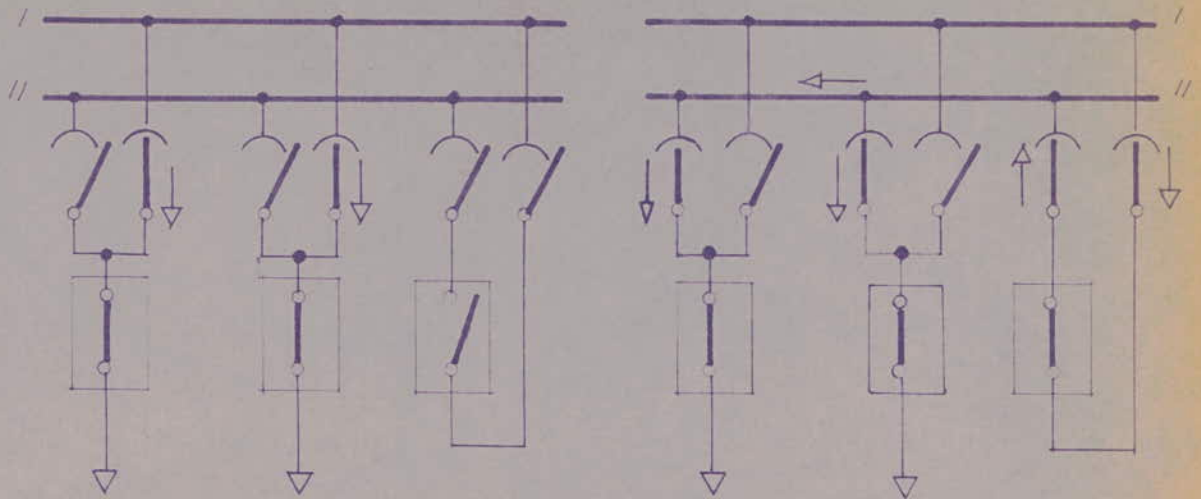


Fig. 2.7. Utilisation des appareils de connexion des jeux de barres pour entretien du jeu de barres I [14].

La Fig. 2.8 représente deux solutions principales pour la disposition des systèmes de double jeu de barres. La

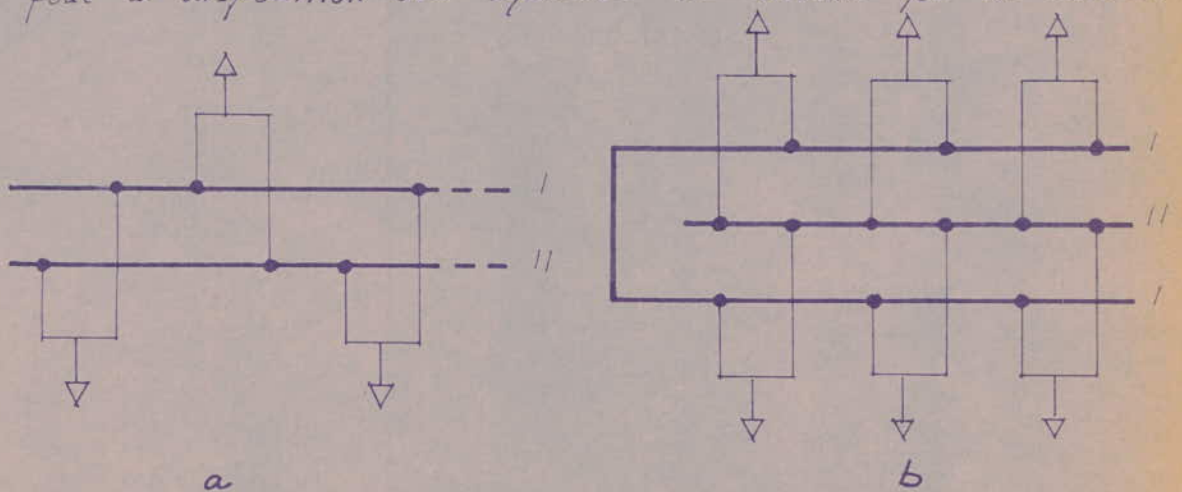


Fig. 2.8. Deux solutions principales de disposition de double jeu de barres [14].

disposition "back to back" (cas b) permet de réduire la



longueur totale de l'armoire de distribution.

D'une façon générale, les schémas à double et triple jeu de barres sont souvent utilisés dans les postes énergétiques et armoires de distribution où la puissance installée est importante et où la continuité d'alimentation des récepteurs est nécessaire.

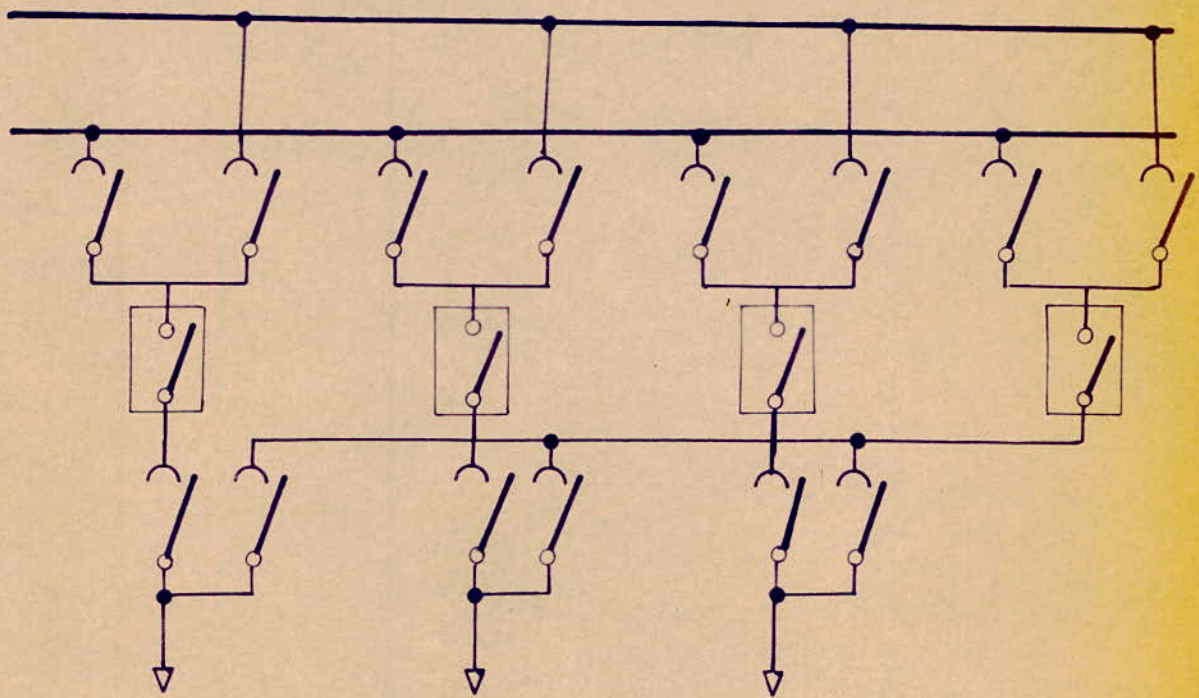


Fig. 2.9. Introduction des barres auxiliaires dans un système de double jeu de barres [14]

Comme pour les systèmes à simples jeux de barres, les barres auxiliaires (Fig. 2.9) permettent de combiner ensemble les éléments sains en cas d'avarie d'une partie du circuit. Les barres auxiliaires facilitent également les inspections et entretiens des appareils de coupure et des barres.



## 2-4. Source autonome. [2].

Certaines usines sont alimentées par une source autonome qui fonctionne en parallèle avec le secteur. Le schéma

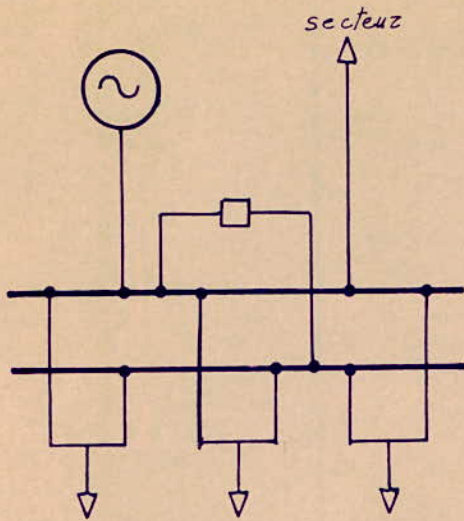


Fig. 2.10. Alimentation par une source autonome en parallèle avec le secteur.

de distribution est alors à double jeu de barres dont l'un est alimenté par la source autonome, l'autre est connecté au secteur (Fig. 2.10). La marche en parallèle est en général couplée. Le découplage des barres se produit à la moindre perturbation constatée sur l'une ou l'autre source.

Si celle-ci conduit au déclenchement, seul le jeu de barres correspondant est mis hors service.

Dans d'autres cas, l'alimentation autonome assure le secours en cas de panne sur le secteur. Toutefois, les générateurs de secours utilisés en général, ne permettent pas d'assurer le secours total et absolu : ils alimentent seulement les départs dits "prioritaires" et permettent aux usines d'arrêter le fonctionnement des machines dans des conditions convenables. En basse tension, les schémas utilisés sont souvent à double ou triple jeu de barres dont l'un est alimenté par les générateurs de secours. En service normal, le couplage des barres est ouvert. Des inverseurs renouillés mécaniquement permettent d'éviter d'envoyer le courant débité par la génératrice de secours dans le transformateur



d'alimentation, et la mise en parallèle de la tension du secteur et du générateur de secours, lors du retour de l'alimentation normale.

Le fonctionnement des générateurs de secours [5] est différent quand la durée maximale admissible d'interruption de l'alimentation est très faible. Le générateur de secours débite à puissance réduite sur les jeux de barres, en parallèle avec le réseau. En cas de défaillance de l'alimentation normale, le générateur est connecté automatiquement sur les différents récepteurs. La continuité de service est ainsi assurée.

## 2.5- Diminution des courants de court-circuit de jeux de barres.

Pour limiter les courants de court-circuit de jeux de barres, diverses solutions sont possibles, entre autres :

- augmentation de l'impédance des circuits situés en amont des jeux de barres.

- fractionnement des jeux de barres.
- choix d'appareils de coupure limiteurs de courant de court-circuit.

Examinons successivement ces procédés :

a) Pour augmenter l'impédance des circuits, on peut interposer des réactances en série avec les transformateurs d'alimentation ( Fig. 2. 11. ) ou entre les sections de jeux de barres ( Fig. 2. 12. ). On peut également augmenter la réactance



de fuite des transformateurs d'alimentation.

L'utilisation de réactances en série avec les transformateurs n'est pas très répandue car les grands courants de défaut dus aux transformateurs impliquent de grandes chutes de tension dans les réactances, ce qui réduit la tension de service des jeux de barres.

Quand les réactances sont intercalés entre sections de jeux de barres, les chutes de tension sont moins importantes.

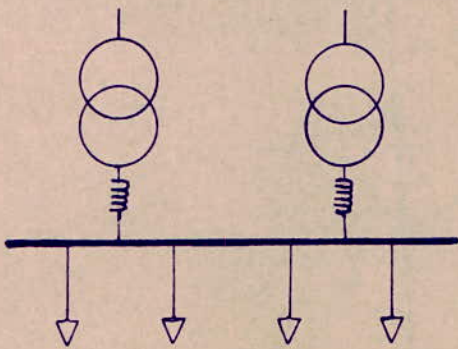


Fig. 2.11

Intéposition de réactances en série avec les transformateurs.[6]

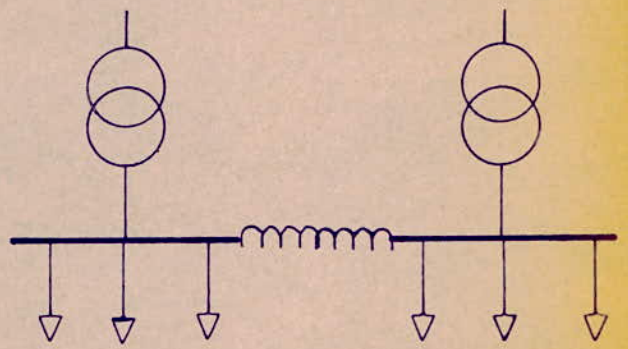


Fig. 2.12. a

Intéposition de réactances entre sections de jeux de barres.[6]

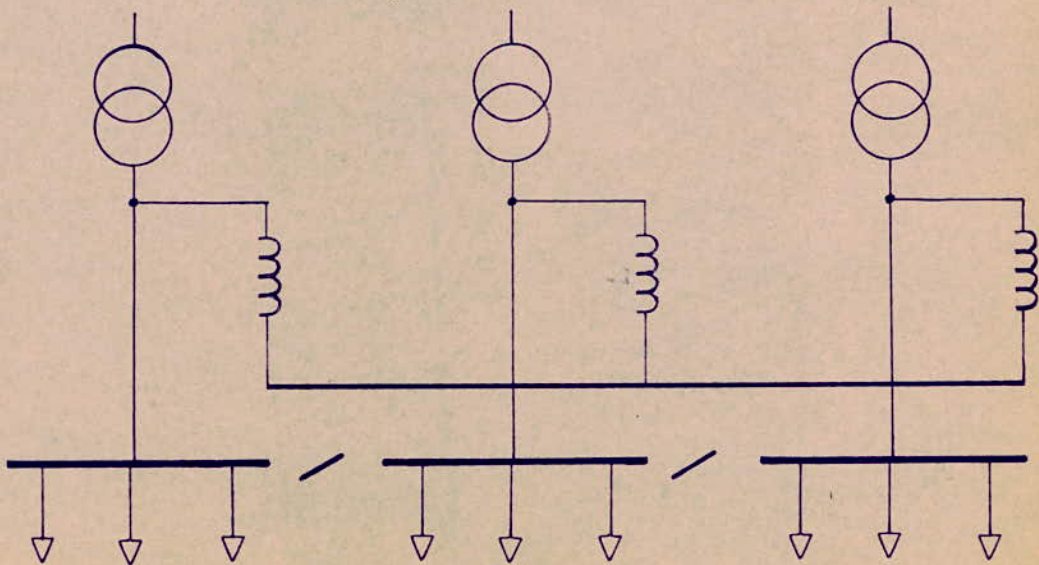


Fig. 2.12. b

Intéposition de réactances entre sections de jeux de barres par l'intermédiaire de barres auxiliaires.[6]



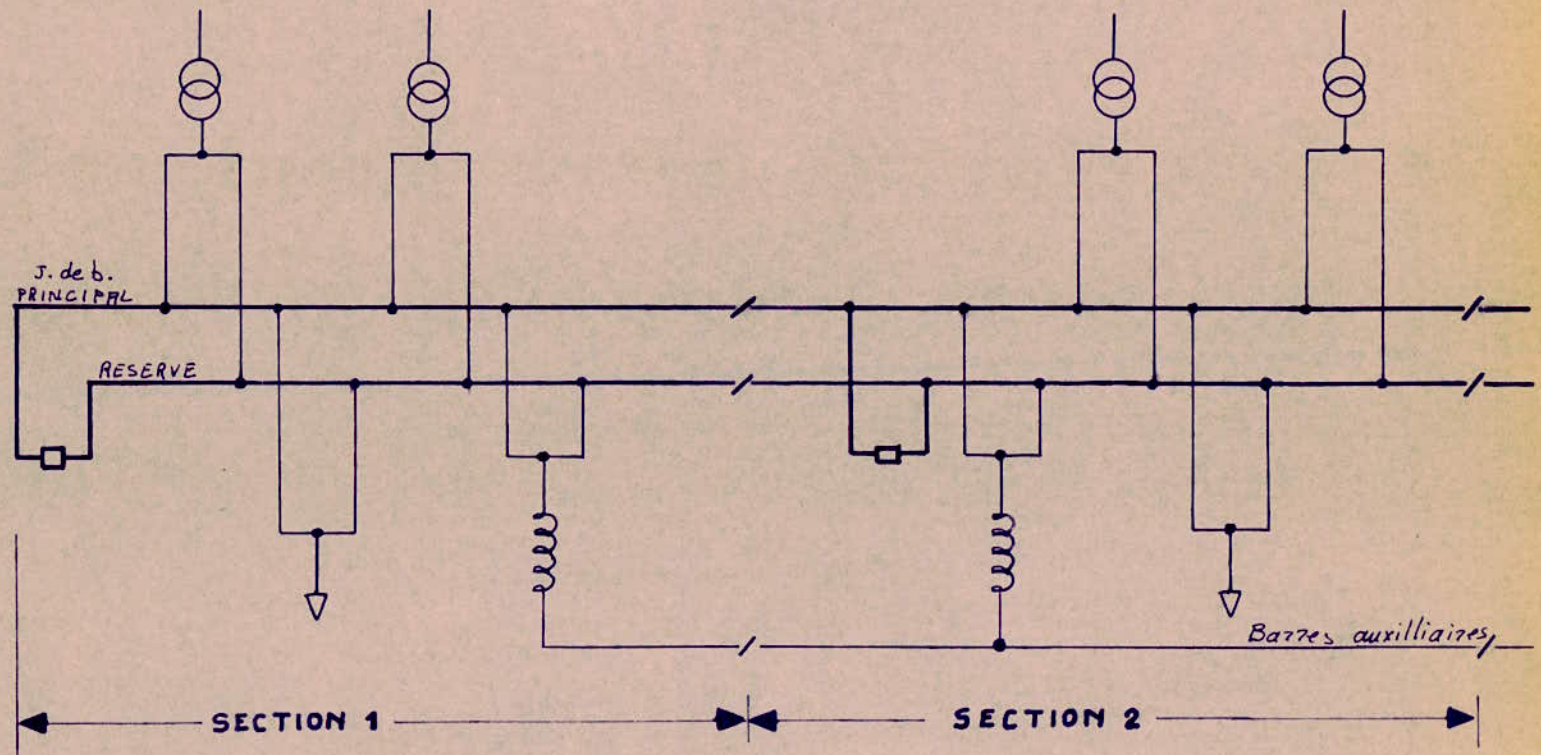


Fig. 2.11. Intezposition de réactances dans les jeux de barres doubles. [5]

En service normal, les sections de jeux de barres sont interconnectées par les réactances et barres auxiliaires seulement. Le courant de court-circuit produit par l'un des transformateurs d'alimentation sera limité par les deux réactances en série.



L'augmentation des réactances des transformateurs d'alimentation, donc de leur tension de court-circuit, permet de réduire les courants de court-circuit de jeux de barres d'une proportion notable. Par exemple, une tension de court-circuit de 5% conduit, pour un transformateur de 1250 kVA sous une tension de 400V à un courant de court-circuit permanent de 36 kA. Ce courant serait égal à 30 kA si la tension de court-circuit était de 6%.

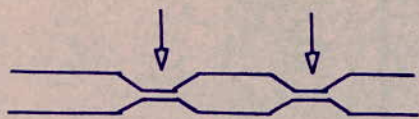
Mais, d'une façon générale, l'augmentation des réactances des circuits s'accompagne d'augmentation de consommation d'énergie réactive [7], cette solution n'est donc pas la plus efficace.

b) Le fractionnement des jeux de barres est possible quand les jeux de barres sont alimentés à partir de deux ou plusieurs transformateurs, comme il a été déjà dit précédemment. Les sections de jeux de barres sont interconnectées par des appareils de coupure qui sont fermés en service normal [6]. En cas de défaut sur le circuit d'alimentation, les appareils de couplage s'ouvrent et les sections de jeux de barres sont isolées l'une de l'autre, chacune d'elles n'est alimentée que par le courant de court-circuit débité par un seul transformateur. Il en résulte un allègement de l'appareillage et des jeux de barres.



c) Les appareils de coupure limiteurs de courants de court-circuit, coupe-circuit à fusibles et disjoncteurs limiteurs agissent en écarteurs de la première onde de courant.

La fonction de limiteur du coupe-circuit à fusible est obtenue [8]



strictions dans les lames fusibles.

en réalisant des strictions sur les lames fusibles de manière à constituer des échauffements par réduction de section.

La fusion du fusible sur court-circuit est très rapide et le courant de défaut n'a pas le temps d'atteindre sa valeur maximum. Néanmoins pour les courants de court-circuit importants, les crêtes qui subsistent sont élevées et peuvent atteindre des niveaux dangereux pour les matériels. D'autre part, la coupure des circuits par fusible est accompagnée dans certains cas d'une surtension et peut entraîner, si un dispositif de sécurité n'est pas prévu (déclencheur automatique des phases voisines), le fonctionnement sur deux phases des récepteurs situés en aval du coupe-circuit intéressé. L'emploi du coupe-circuit comme limiteur des courants de court-circuit de jeux de barres sans autre dispositif de protection conduit donc à un résultat incomplet. C'est pourquoi, dans les installations importantes ils sont associés aux disjoncteurs ou contacteurs. Le fusible n'intervient alors que pour les courants de court-circuit supérieurs à leur pouvoir de coupure.

Les disjoncteurs, et disjoncteurs - contacteurs limiteurs de courants de court-circuit sont construits de telle sorte qu'ils réduisent



les valeurs de crête des courants de court-circuit en un temps très court. Grâce à leurs déclencheurs électromagnétiques ou électrodynamiques rapides, les disjoncteurs insèrent une impédance d'arc qui limite la valeur du courant de court-circuit. Les contacts de ces appareils sont conçus de telle sorte que leur soudage ne puisse survenir [9].



### Chapitre III - CONTRAINTES ELECTRIQUES et CHOIX D'APPAREILS DE COUPURE.

#### 3-1 - Courant nominal et courant de court-circuit.

Le courant nominal transité par un système de jeux de barres triphasé est défini par :

$$I_n = \frac{S_n}{U_n \cdot \sqrt{3}}$$

avec  $S_n$  = puissance nominale apparente.

$U_n$  = tension nominale entre phases.

Le courant de court-circuit permanent [1] en un point quelconque du réseau est donné par la relation :

$$I_{cp} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \left[ \sum x_d \cdot 100 \cdot \frac{U_n^2}{P_n} + \sum Z' \left( \frac{U_n}{U_n'} \right)^2 \right]}$$

avec  $x_d$  = impédance en valeur réduite des alternateurs et transformateurs.

$Z = Z' \left( \frac{U_n}{U_n'} \right)^2$  = impédance du circuit ramené à la tension  $U_n$ .

On remarque que ce calcul est très compliqué dans le cas de réseaux complexes. Dans ce cas, on utilise de préférence des modèles de réseaux (calcul analogique).  
Mais si l'on veut calculer le courant de court-circuit à



partir d'un point où le pouvoir de coupure  $P$  est déjà connu, il suffit de donner au réseau amont une impédance:

$$Z = \frac{U_n^2}{P}$$

Le courant de court-circuit permanent est alors:

$$I_{cp} = \frac{U_n}{Z + Z''}$$

Pour déterminer l'amplitude maximale de la première onde de courant,  $I_s$ , une étude particulière a donnée [10]:

$\cos \varphi_{cc}$	0,15	0,30	0,50	1,00
$k$	2,5	2,1	1,7	1,41

$\cos \varphi_{cc}$  étant le facteur de puissance en court-circuit, et  $k$  la valeur du coefficient tel que:

$$I_s = k \cdot I_{cp}$$

### 3-2 - Tension nominale, fréquence nominale, et tension de court-circuit des transformateurs.

La tension nominale [11] des jeux de barres est égale à la tension de régime sous laquelle l'installation est alimentée. Le choix de la tension d'alimentation est fonction de



la puissance nominale installée. En général, cette dernière peut dépasser quelques centaines de kw en basse tension.

Les jeux de barres prévus pour fonctionner sous une fréquence nominale ne doivent être alimentés que sous cette fréquence. La fréquence des réseaux de distribution d'énergie électrique est en général de 50 Hz.

La tension de court-circuit des transformateurs définie par [18] :

$$U_{cc} = \sqrt{U_{\sigma}^2 + U_p^2}$$

avec  $U_{\sigma}$  = composante réactive de la tension de court-circuit

$U_p$  = composante active de la tension de court-circuit  
(ou chute de tension ohmique)

augmente avec la tension et la puissance nominales.

La valeur de la tension de court-circuit des transformateurs influe sur l'intensité des courants de court-circuit : la puissance nominale apparente étant définie par

$$S_n = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n = \sqrt{3} \cdot U_{cc} \cdot I_{cc}$$

le courant de court-circuit est :

$$I_{cc} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{cc}} \quad \text{ou} \quad I_{cc} = \frac{100}{u_{cc}} \cdot \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

avec  $u_{cc}$  : tension de court-circuit relative.



### 3.3 - Puissance de court-circuit. [7]

La puissance de court-circuit est une grandeur fictive, homogène à une puissance, définie par la relation :

$$S_{cc} = \sqrt{3} \cdot U_n I_{cc}$$

où  $U_n$  est la tension nominale entre phases,

et  $I_{cc}$  est le courant de court-circuit triphasé par phase.

La puissance de court circuit permet de dimensionner les appareils de coupure. Le pouvoir de coupure des interrupteurs par exemple, est fonction de divers facteurs définis par les normes entre autres, l'intensité maximale du courant de court-circuit et de la valeur de la tension de rétablissement, qui est proche de la tension nominale. La puissance de court-circuit influe donc sur la conception des réseaux électriques (choix du niveau de tension, du palier technique du matériel, structure du réseau, ...) et sur leur exploitation.

### 3.4. Résistance, inductance et capacités des jeux de barres.

Dans le cas où la répartition du courant est uniforme dans toute la section droite du conducteur, la résistance linéique est donnée par :

$$R = \frac{\rho}{s} \quad (\Omega / m.)$$

avec  $\rho$  = résistance spécifique ou résistivité électrique

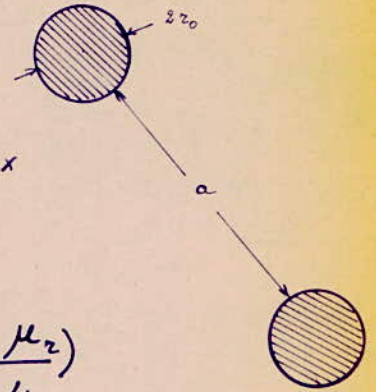
$s$  = section droite du conducteur.



Les coefficients d'inductance dépendent en général de la forme des barres.

L'inductance intérieure d'un conducteur cylindrique [13] est donnée par :

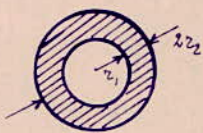
$$L_i = \frac{\mu \cdot L}{8 \cdot \pi}$$



L'inductance mutuelle totale entre deux conducteurs cylindriques est :

$$M = \frac{\mu_0 \cdot L}{2 \pi} \left( \text{Log} \frac{a}{r_0} + \frac{\mu_r}{4} \right)$$

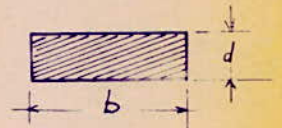
Dans le cas d'un conducteur cylindrique creux, l'inductance intérieure est donnée par la relation [13] :



$$L = \frac{\mu \cdot L}{2 \pi (r_2^2 - r_1^2)} \cdot \left[ \frac{r_2^4}{r_2^2 - r_1^2} \text{Log} \frac{r_2}{r_1} - \frac{3 r_2^2 - r_1^2}{4} \right]$$

Dans le cas d'un conducteur de section droite rectangulaire, l'inductance est :

$$L = \mu \frac{S \cdot \lambda}{\pi (d+b) \chi}$$



avec  $\chi = f(d)$

$$\text{et } d = \frac{-d+b}{d+b}$$

d	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\chi$	1,0025	1,0100	1,0226	1,0404	1,0635	1,0922	1,1269	1,1679	1,2162

De la même façon, les coefficients de capacités dépendent de la géométrie des conducteurs. On admet en général que la capacité d'un système de jeux de barres cylindriques de rayon  $r$  est :

$$C = \frac{\pi \cdot \epsilon_0}{\log \frac{a-r}{r}}$$

dans le cas d'un système monophasé avec  $a =$  distance entre conducteurs.

et  $C = \frac{2\pi \epsilon_0}{\log \frac{a-r}{r}}$  dans le cas d'un système triphasé avec  $a = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{23} \cdot a_{31}}$ .

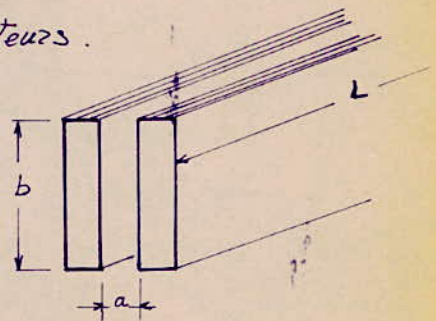
Dans le cas d'un système de jeux de barres de section rectangulaire, la capacité équivalente est :

$$C = \frac{C'}{n}$$

avec  $C' = \frac{\epsilon_0 \cdot S}{a}$  où  $S = b \cdot L =$  surface latérale d'une barre.

$a =$  distance entre conducteurs

et  $n =$  nombre de conducteurs.



### 3.5 - Effet pelliculaire [13].

La distribution du courant dans une section droite d'un conducteur est perturbée par des courants induits qui repoussent le courant vers la surface; c'est :



l'effet pelliculaire. Cet effet, dû aux variations du champ magnétique dans le conducteur, se traduit par une augmentation de la résistance du conducteur.

Résistance ( $R$ ) en courant alternatif et Inductance intérieure ( $L_i$ ) d'un conducteur cylindrique de rayon  $r_0$ :

en posant  $\alpha = \frac{1}{2} r_0 \sqrt{\pi f \gamma \mu}$  avec  $f =$  fréquence en Hz  
 $\gamma =$  conductivité électrique  
 $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m.

et  $R_0 = \frac{L}{\pi r_0^2 \gamma} =$  résistance en courant continu.

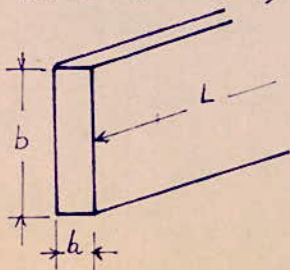
si  $\alpha < 1$ ,  $\frac{R}{R_0} = 1 + \frac{\alpha^4}{3}$ .

$$\frac{L_i W}{R_0} = \alpha^2 \left( 1 - \frac{\alpha^4}{6} \right).$$

si  $\alpha > 1$ ,  $\frac{R}{R_0} = \alpha + \frac{1}{4} + \frac{3}{64\alpha}$

$$\frac{L_i W}{R_0} = \alpha - \frac{3}{64\alpha} + \frac{3}{128\alpha^2}$$

Résistance ( $R$ ) en courant alternatif et Inductance intérieure ( $L_i$ ) d'un conducteur de section rectangulaire:



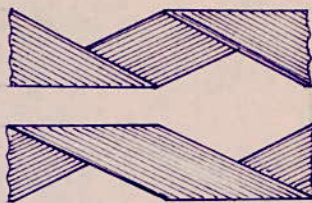
$$R = \frac{\beta}{2\gamma} \cdot \frac{\text{sh} \beta d - \sin \beta d}{\text{ch} \beta d + \cos \beta d}$$

avec  $\beta^2 = \pi f \gamma \mu$ .

$$L_i W = \frac{\beta}{2\gamma} \cdot \frac{\text{sh} \beta d + \sin \beta d}{\text{ch} \beta d + \cos \beta d}$$



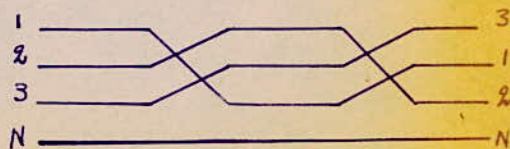
Pour limiter l'augmentation de la résistance, on subdivise les barres conductrices en conducteurs plus fins, isolés les uns des autres. Ces conducteurs sont transposés régulièrement dans la barre, de telle sorte que les flux embrassés par deux conducteurs quelconques se compensent.



Transposition dans une barre.

L'effet de couronne [13], qui se manifeste en haute tension seulement par une augmentation des dimensions effectives des conducteurs, donne lieu à des impulsions de courant de faibles durées (quelques microsecondes) mais d'amplitude et de fréquence élevées qui produisent un échauffement de l'espace environnant le conducteur, et entraînent donc une dissipation d'énergie. La densité de ce courant dépend exclusivement des propriétés de la surface des conducteurs. Pour une valeur donnée de l'intensité du champ périphérique, les pertes par effet couronne sont proportionnelles au carré du rayon de ceux-ci. Malgré que cet effet ne fasse pas partie de cette étude, il constitue une contrainte importante pour le calcul et le choix de jeux de barres des installations à H.T.

Pour équilibrer les tensions entre phases, lorsque la longueur des barres est importante, les éléments de phases sont transposés



Transposition des phases.



régulièrement. Les effets de peau, de proximité et de couronne sont ainsi réduits. La transposition des barres consiste à déplacer la position de chaque phase en conservant l'ordre de succession des phases.

### 3.6. Choix des appareils de coupure.

Le choix des appareils de coupure [11], disposés dans les éléments d'alimentation ou dans les éléments de dérivation, dépend des fonctions qu'ils sont capables d'assurer: protection, commande et sectionnement. Ce choix s'effectue conformément aux règles imposées par les normes. Il faut tenir compte :

- des conditions d'alimentation : tension, nature du courant, fréquence en courant alternatif et intensité du courant,
  - des conditions d'installation : température ambiante, altitude, risques divers auxquels pourraient être soumis les équipements.
- En outre, le choix des appareils de protection tient compte de leur pouvoir de coupure et de leurs caractéristiques de fonctionnement qui doivent être telles que la sélectivité des protections reste assurée dans tous les cas.

Examinons sommairement les utilisations et fonctions des appareils de coupure classiques [9] : coupe-circuit à fusible, contacteur et rupteur, interrupteur et sectionneur.

Les coupe-circuits à fusible assurent la protection des jeux de barres contre les courts-circuits résultant



de la détérioration des transformateurs ou contre les défauts qui peuvent survenir, soit sur les circuits à haute tension, soit sur les circuits à basse tension, en cas de défaillance des protections basse tension ou en cas de défaut en amont de ces dernières.

Les contacteurs et rupteurs déterminent l'ouverture et la fermeture des circuits. Ils sont surtout utilisés pour les mises en marche et arrêt automatiquement des moteurs importants, transformateurs, ... Leur association avec des coupe-circuits à fusible à haut pouvoir de coupure leur permet d'assurer la manœuvre et la protection des récepteurs contre les courants de court-circuit importants.

Les interrupteurs dans lesquels le déclenchement peut s'effectuer manuellement et automatiquement (disjoncteurs) assurent la protection et commande des réseaux de distribution d'énergie contre les surintensités et les courants de court-circuit. Ils sont parfois munis de fusibles d'accompagnement lorsque les courants de court-circuit sont susceptibles de dépasser leur pouvoir de coupure. Les disjoncteurs différentiels assurent une triple protection contre les défauts d'isolement, les surcharges, et les courts-circuits importants.



Les sectionneurs permettent de fermer ou d'ouvrir les circuits à haute et basse tension qui peuvent être sous tension ou non mais qui ne sont pas traversés par des courants. Ils réalisent la mise hors et en circuit de l'appareil qu'ils encadrent et n'ont pas de pouvoir de coupure. Ils sont donc souvent employés dans les installations à haute tension avant chaque appareil qui nécessite un entretien tel que disjoncteur (Fig. 3.1 et 3.2).

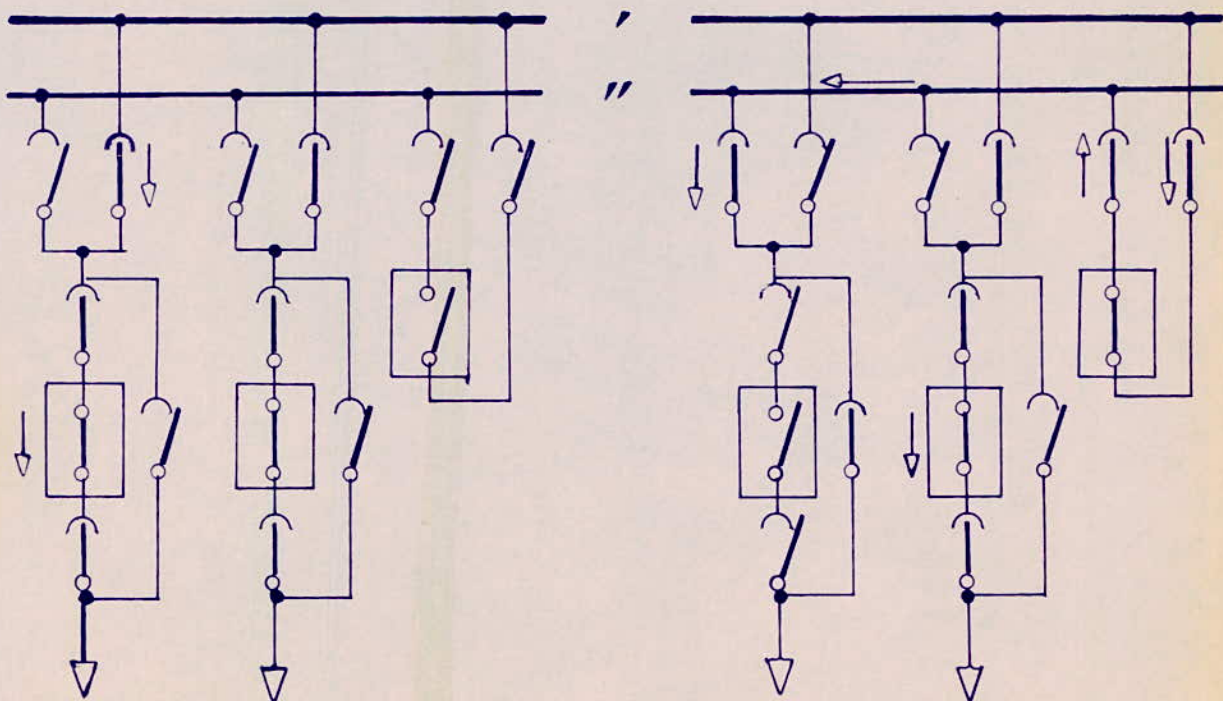


Fig. 3.1. Isolement d'un disjoncteur par sectionneurs (cas I).

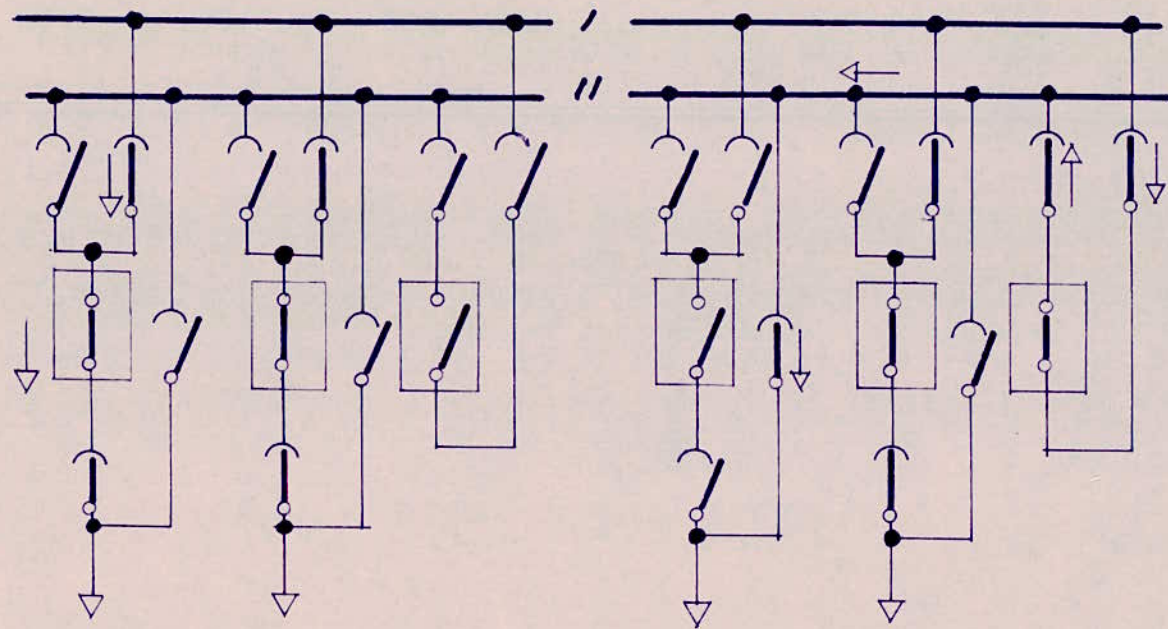


Fig. 3. 2. Isolation d'un disjoncteur par sectionneurs.  
(cas II).



## Chapitre IV. Contraintes thermiques et mécaniques

### 4.1. Généralités.

Comme différentes parties des réseaux électriques, les jeux de barres sont le siège de pertes d'énergie qui engendrent un échauffement des matériaux. Leur propriétés électriques, diélectriques chimiques et mécaniques sont modifiées en conséquence.

D'autre part, les jeux de barres, traversés par des courants sont soumis aux forces électrodynamiques, dues au champ magnétique, qui pour des courants de même sens s'attirent et pour des courants de sens inverse se repoussent. Ces effets se traduisent par des déplacements des conducteurs et par des efforts de traction, flexion et torsion sur les supports. Dans le cas de court-circuit, ces forces peuvent conduire aux destructions des supports et des isolateurs.

Pour préserver la durée de vie des installations électriques, les sections et formes des conducteurs sont choisies afin que la température maximale atteinte en régime normal ou de court-circuit reste compatible avec les matériaux constitutifs qui doivent conserver leurs caractéristiques mécaniques et autres. Les contraintes de flexion des jeux de barres et de leurs supports doivent rester inférieures aux contraintes admissibles par les matériaux utilisés. Les distances



comprises entre supports (portée) et les distances entre conducteurs sont déterminées de telle sorte que l'amorçage entre phases soit évité dans tous les cas.

En général, les conducteurs de jeux de barres sont dimensionnés en fonction de l'intensité maximale de service nominal, par la suite les sections choisies sont vérifiées en fonction des contraintes thermiques et mécaniques.

#### 4-2. Choix de la section en fonction de $I_{max}$ .



Le choix des sections des conducteurs de jeux de barres en fonction de l'intensité maximale admissible  $I_{max}$  en régime permanent doit être telle que [11] l'échauffement qui en résulte ne provoque pas un dépassement de la température maximale admissible par le matériau utilisé. On suppose que les jeux de barres sont chargés uniformément au maximum, le courant considéré étant pris égal au courant débité par les transformateurs d'alimentation.

Les tableaux T. 4.1 à T. 4.6 [16] donnent l'intensité maximale admissible dans les jeux de barres lorsque l'échauffement qui en résulte n'excède pas  $30^{\circ}\text{C}$  en fonction de la forme, section, matériau, nombre et état de surface (peinte ou nu) des conducteurs.

On remarque (Fig. 4.1) que pour une même section des conducteurs de jeux de barres, la charge



T. 4 . 1. Caractéristiques électriques et mécaniques de conducteurs en aluminium de section rectangulaire [16].

Largeur x épaisseur mm	Section mm <sup>2</sup>	Poids linéique kg/m	I <sub>30</sub> en A																Valeurs statiques pour une barre			
			Alternatif $f = 40 \div 60$ Hz								Continu								 $W_x$ cm <sup>3</sup> $J_x$ cm <sup>4</sup>		 $W_x$ cm <sup>3</sup> $J_x$ cm <sup>4</sup>	
			Conducteurs peints				conducteurs nus				Cond. peints				cond nus							
			nombre de barres				nombre de barres				nombre de barres				nombre de barres							
12 x 2	24	0,21	125	225				110	200				130	230			120	210	0,048	0,0288	0,008	0,0008
15 x 2	30	0,27	155	270				140	240				160	280			145	255	.075	.0562	.010	.001
20 x 2	40	0,36	205	350				185	315				210	370			190	330	.133	.133	.0133	.0013
25 x 3	75	0,67	300	510				270	460				310	530			275	485	.312	.390	.037	.005
30 x 3	150	1,34	450	780				400	700				475	800			425	725	.750	1.125	.125	.031
40 x 5	200	1,78	600	1000				520	900				600	1030			550	935	1.333	2.666	.166	.042
40 x 10	400	3,56	835	1500	2060	2800	750	1350	1850	2500	870	1550	2180	800	1395	1950	2.666	5.333	.666	.333		
80 x 5	400	3,56	1060	1800	2450	3300	950	1650	2200	2900	1150	2000	2800	3500	1000	1800	2500	3200	5.333	21.33	.333	.0833
80 x 10	800	7,12	1540	2600	3450	4600	1400	2300	3100	4200	1650	2800	4000	5100	1450	2600	3600	4500	10.66	42.60	1.333	.666
100 x 10	1000	8,90	1880	3100	4000	5400	1700	2700	3600	4800	2000	3600	4900	6200	1700	3200	4400	5600	16.66	83.3	1.666	.833



T.4.2. Caractéristiques électriques et mécaniques pour conducteurs en cuivre de section rectangulaire [16].

Largeur x épaisseur mm.	section mm <sup>2</sup>	Poids linéique. kg/m	$I_{30}$ en Ampère.																Valeurs statiques pour une barre			
			courant alternatif à $f = 50 \div 40$ Hz								courant continu.								↑ F		↑ F	
			Cond. peints				Cond. nus				Cond. peints				Cond. nus				$W_x$ cm <sup>3</sup>	$J_x$ cm <sup>4</sup>	$W_x$ cm <sup>3</sup>	$J_x$ cm <sup>4</sup>
nombre de cond.				nbre. de cond.				nbre. de cond.				nbre. de cond.										
12x2	24	.065	100	180			80	140			105	185			80	145			.048	.0288	.008	.0008
20x3	60	.162	195	340			145	270			200	350			150	280			.200	.200	.030	.0045
25x3	75	.202	240	410			180	330			245	430			185	340			.312	.390	.037	.005
30x3	90	.243	280	480			205	385			290	500			220	400			.450	.675	.045	.007
30x5	150	.405	360	625			270	500			380	645			275	520			.750	1.125	.125	.031
40x10	400	1.08	670	1200	1650	2250	515	975	1350	1800	700	1240	1750		540	1000	1420		2.666	5.333	.666	.333
80x10	800	2.16	1230	2100	2760	3680	930	1650	2300	3100	1300	2300	3200	4100	985	1840	2640	3400	10.66	42.6	1.333	.666
100x10	1000	2.70	1500	2450	3200	4300	1100	1950	2700	3700	1580	2800	3900	5000	1200	2240	3200	4200	16.66	83.3	1.666	.833





T. 4. 3 - Intensités du courant pour conducteurs tubulaires en Al [16]

Diamètre			Section mm <sup>2</sup>	Poids linéique Kg/mm	I <sub>30</sub> en A.				Valeurs statiques pour une barre	
d <sub>1</sub> mm	d <sub>2</sub> mm	s mm			courant continu et alternatif. cond. d'intérieur		courant alternatif. f = 40 à 60 Hz. cond. d'extérieur.		V cm <sup>3</sup>	J cm <sup>4</sup>
					Cond. peints	Cond. nus	Cond. peint	Cond. nus		
20	16	2	113,1	0,305	280	330	350	270	0,463	0,463
	14	3	160,2	0,43	350	285	430	340	0,597	0,597
	12	4	201,0	0,54	385	320	475	375	0,684	0,684
30	26	2	175,9	0,475	430	350	530	420	1,15	1,73
	24	3	254,5	0,69	520	420	640	500	1,56	2,35
	22	4	326,7	0,88	580	470	720	560	1,89	2,83
50	44	3	443,0	1,20	850	670	1000	810	4,91	12,28
	42	4	578,1	1,56	970	770	1200	920	6,16	15,40
	40	5	706,9	1,91	1000	820	1300	990	7,24	18,11
60	54	3	537,2	1,45	1000	800	1240	960	7,30	21,9
	52	4	703,7	1,90	1150	920	1450	1100	9,24	27,7
	50	5	863,9	2,33	1275	1000	1600	1200	11,00	32,9



T. 4. 4. Intensités du courant pour conducteurs en Cu ronds [16].

Diamètre d mm	Section mm <sup>2</sup>	Poids linéique kg/m	Intensités du courant en A pour Δθ=30°				Valeurs statiques pour une barre.	
			Courant alternatif f = 40 ÷ 60 Hz		Courant continu.		W cm <sup>3</sup>	J cm <sup>4</sup>
			Cond. peints.	Cond. nus	Cond. peints	Cond. nus		
6	28,3	0,252	125	120	125	120	0,021	0,0063
8	50,3	0,447	160	150	160	150	0,050	0,020
10	78,54	0,699	250	210	250	210	0,098	0,049
16	201,1	1,789	480	410	480	410	0,402	0,322
20	314,2	2,796	640	540	660	550	0,785	0,785
30	706,9	6,291	1100	900	1150	950	2,651	3,976





T. 4. 5. Intensités du courant pour conducteurs en Cu tubulaires [16]

Diamètres			Section mm <sup>2</sup>	Poids linéique kg/m	Intensité I <sub>30</sub> en A				Valeurs statiques pour une barre	
d <sub>1</sub> mm	d <sub>2</sub> mm	s mm			courant continu et alternatif. cond. d'int.		courant alternatif 40 ÷ 60 Hz cond. d'extérieur		W cm <sup>3</sup>	J cm <sup>4</sup>
					Cond. peints	Cond. nus	Cond. peints	Cond. nus		
20	12	4	201,0	1,79	480	430	600	550	0,684	0,684
30	22	4	326,7	2,90	800	650	1000	800	1,89	2,83
50	40	5	706,9	6,29	1400	1200	1700	1500	7,24	18,11
60	50	5	863,9	7,69	1600	1450	2000	1800	11,00	32,9




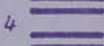



T. 4. 6. Intensités du courant pour conducteurs en Al ronds [16].

Diamètre d mm	Section mm <sup>2</sup>	Poids linéique kg/m	Intensités I <sub>30</sub> en A.				Valeurs statiques pour une barre	
			Courant alternatif f = 40 ÷ 60 Hz		Courant continu		W cm <sup>3</sup>	J cm <sup>4</sup>
			Cond. peints	Cond. nus	Cond. peints	Cond. nus		
6	28,3	0,0763	65	60	65	60	0,021	0,0063
10	78,54	0,21	200	160	200	160	0,098	0,049
16	201,1	0,54	380	316	380	315	0,402	0,322
20	314,2	0,85	500	410	500	420	0,785	0,785
30	706,9	1,91	870	690	900	720	2,651	3,976

admissible dans les conducteurs peints est supérieure de 25% environ à celle admissible dans les conducteurs nus. Ceci peut s'expliquer par le fait que la surface des conducteurs peints étant plus lisse, l'évacuation de chaleur est plus efficace.

D'autre part, on remarque également (Fig. 4.2 et Fig. 4.3) que si  $I_{max}$  est l'intensité admissible par un conducteur isolé, ce même conducteur en présence de  $n$  autres transitera une intensité  $I$  inférieure à  $I_{max}$ . La diminution de la charge admissible peut être due à l'échauffement mutuel des conducteurs et aux contraintes électrodynamiques entre conducteurs d'une même phase. Le tableau T. 4.7 donne le facteur de diminution de charge en fonction du nombre, des dimensions et de l'état de surface des conducteurs.

Nombre de barres	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)	Facteur de diminution de la charge.	
			Cond. peints	Cond. nus
1 	50 ÷ 200	5 ÷ 10	0,90	0,85
2 			0,85	0,80
3 	50 ÷ 80 100 ÷ 120	5 ÷ 10	0,85	0,80
			0,80	0,75
4 	160		0,75	0,70
4 	200		0,70	0,65

T. 4.7. Facteur de diminution de charge en fonction des dimensions et du nombre de conducteurs [16].



COURANT ALTERNATIF  $f = 40 - 60 \text{ Hz}$   
CONDUCTEURS PEINTS ET NUS

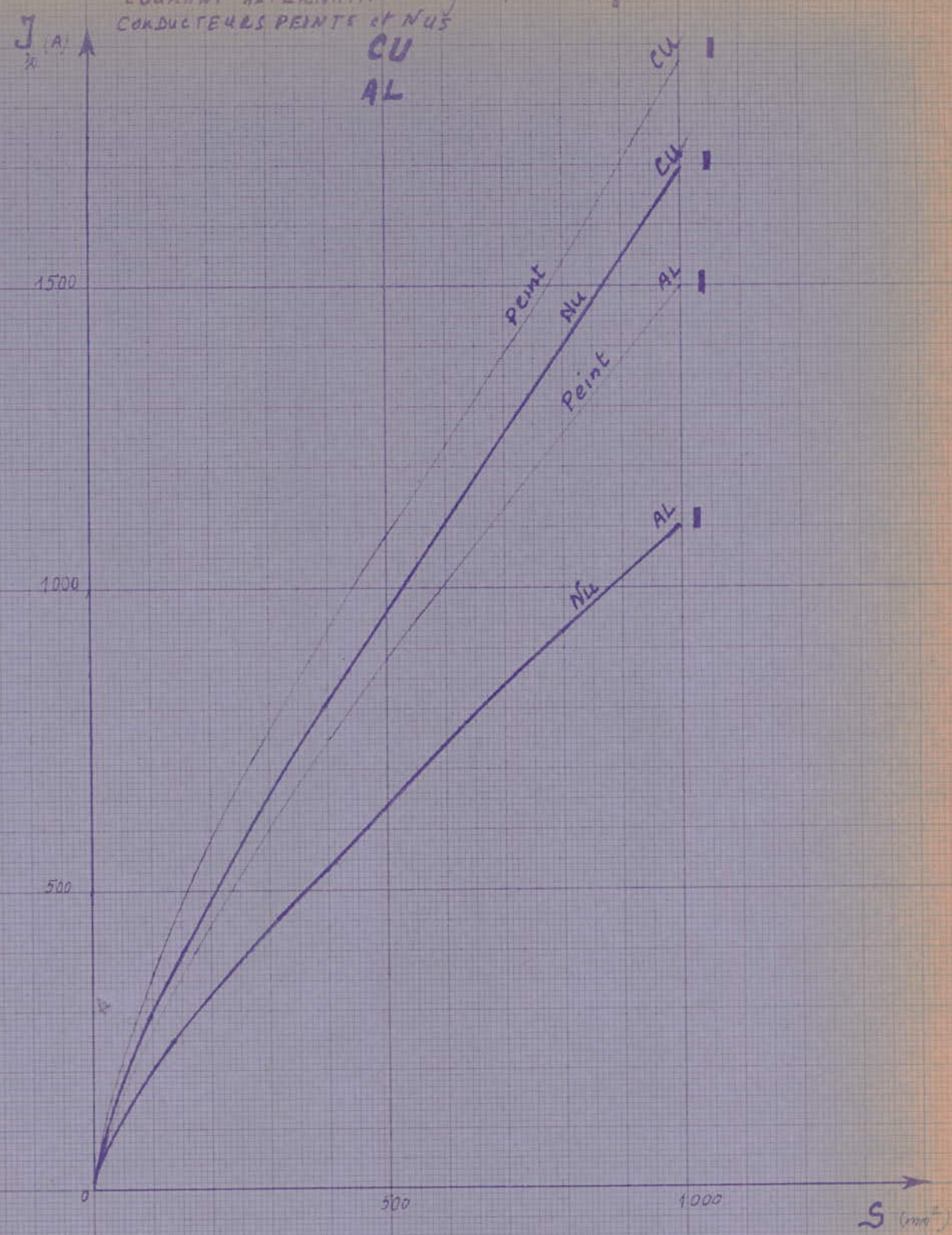


Fig. 4.1 - Variation de l'intensité du courant en fonction de l'état de surface des conducteurs.  
(courbes obtenues selon les valeurs indiquées dans les tableaux T.4.1 et T.4.2)



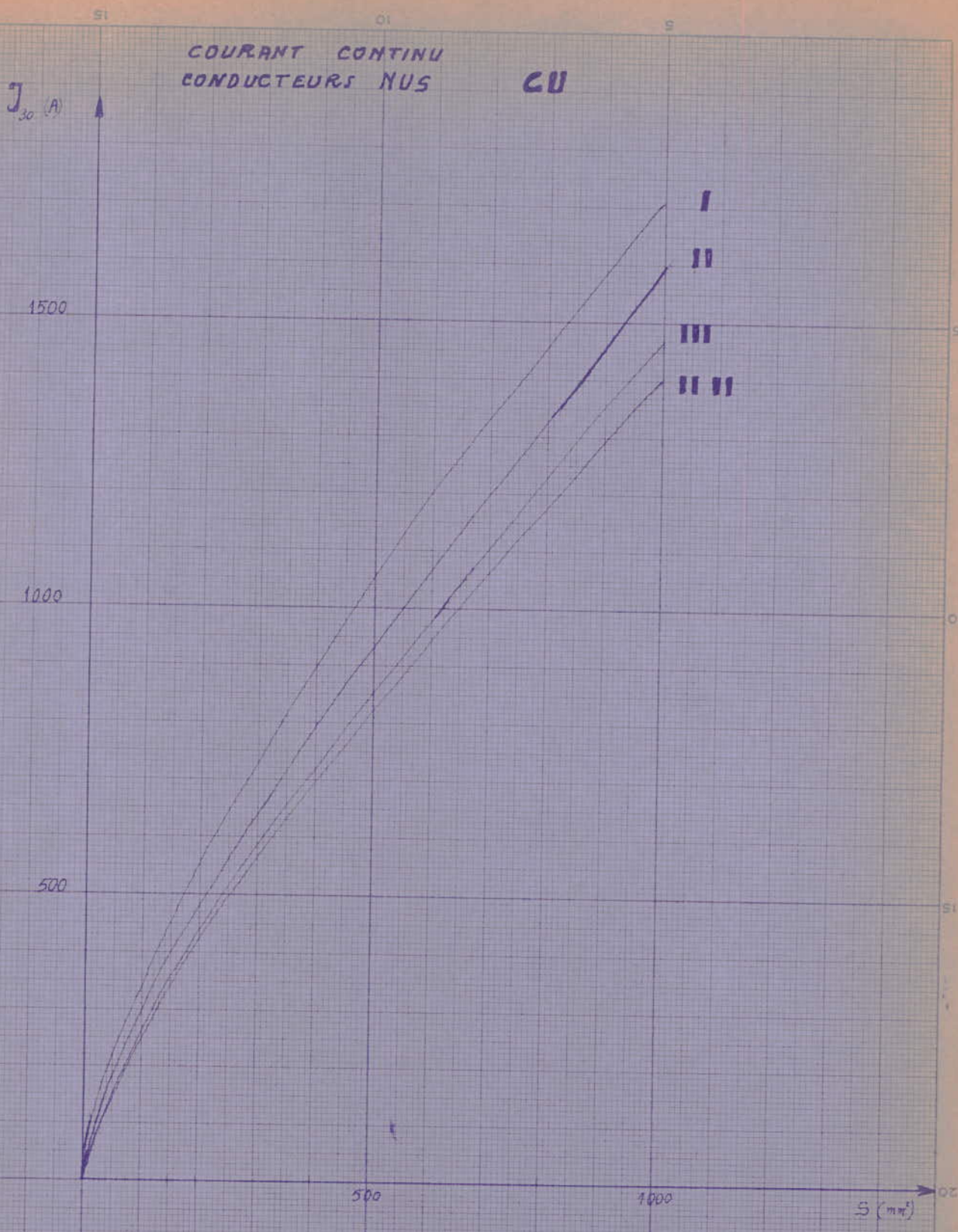


Fig. 4.2. Variation de l'intensité du courant en fonction du nombre de conducteurs.

(courbes obtenues selon les valeurs indiquées dans le tableau T. 4. 2.)



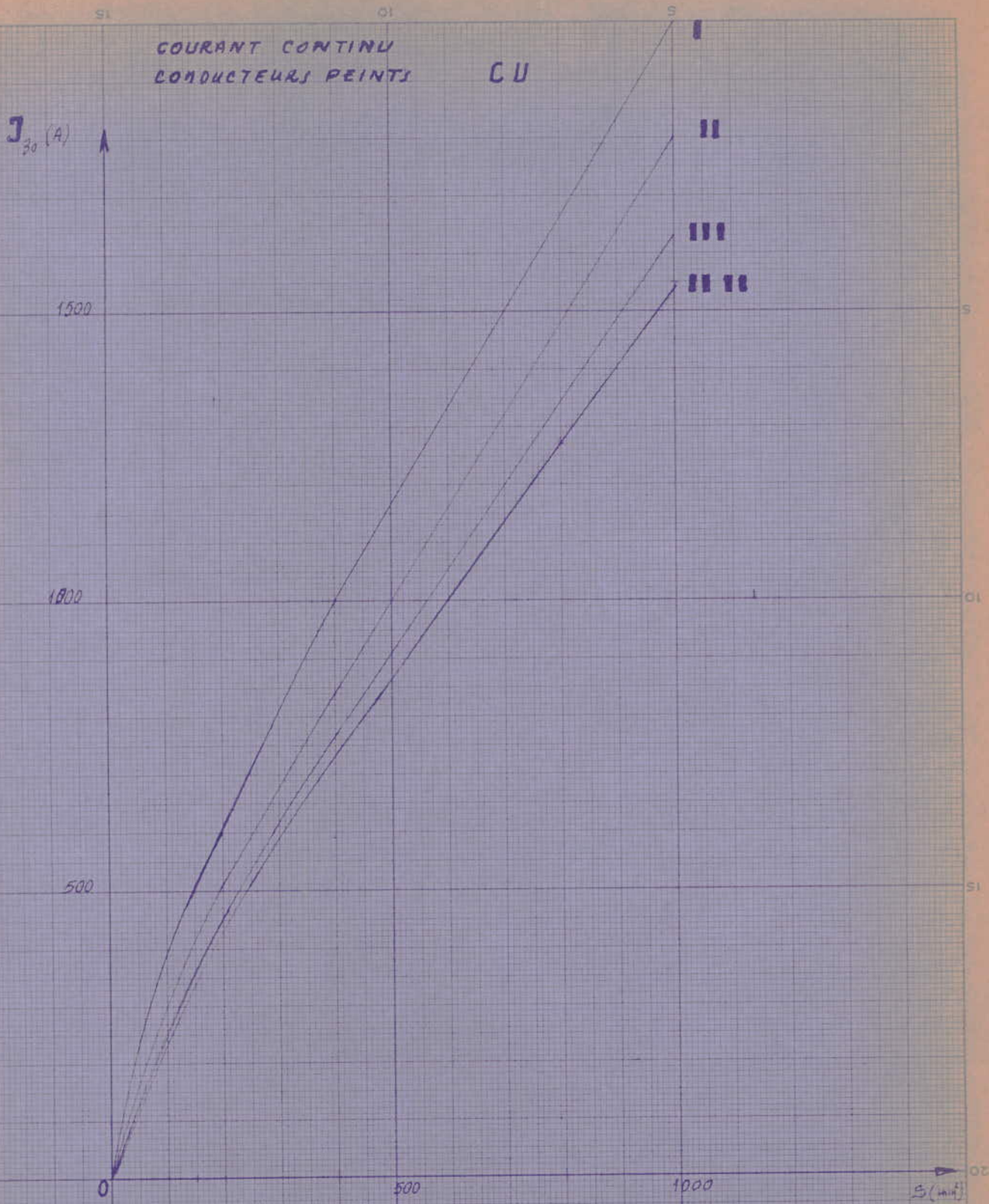


Fig. 4.3. Variation de l'intensité admissible en fonction de la section et du nombre de conducteurs.

(Courbes obtenues selon les valeurs indiquées dans le tableau T. 4. 2.)



L'intensité maximale admissible dans les conducteurs de jeux de barres doit être diminuée lorsque l'échauffement résultant excède  $30^{\circ}\text{C}$ . Elle se calcule alors suivant la relation :

$$I = I_{30} \sqrt{\frac{\Delta \theta}{30}}$$

#### 4.3. Contraintes thermiques.

##### 4.3. a. Influence de l'échauffement sur les propriétés des conducteurs.

L'échauffement agit sur la résistivité électrique des conducteurs qui varie suivant la relation :

$$\rho_{\theta} = \rho_{\theta_1} (1 + \alpha_1 (\theta - \theta_1))$$

avec  $\alpha_1$ , coefficient de température, en  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

$\rho_{\theta}$ , résistivité électrique à la température  $\theta$ , en  $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ .

$\rho_{\theta_1}$ , résistivité électrique à la température  $\theta_1$ , en  $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ .

L'échauffement agit sur les propriétés chimiques des conducteurs au niveau des contacts en les oxydant. L'énergie absorbée en ces points augmente en conséquence. Les variations de résistance des contacts dues à l'échauffement doivent rester dans les limites fixées par



les normes. Des précautions spéciales doivent être prises, notamment l'utilisation de contacts recouverts d'Argent.

L'échauffement influe sur les propriétés diélectriques: le facteur de pertes diélectriques augmente avec la température.

La température agit sur les propriétés mécaniques des conducteurs en modifiant leur longueur suivant la loi:

$$L_{\theta} = L_{\theta_1} (1 + \alpha'_1 (\theta - \theta_1))$$

avec  $\alpha'_1$ , coefficient de dilatation thermique à la température  $\theta_1$ , en  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ . Ce coefficient est variable en fonction de la température et du type de matériau.

$L_{\theta}$ , longueur du conducteur à la température  $\theta$ , en m.

$L_{\theta_1}$ , longueur du conducteur à la température  $\theta_1$ , en m.

$(\theta - \theta_1)$  = échauffement du conducteur.

Des précautions spéciales sont donc prises pour effectuer les raccordements. Si les raccords sont des joints mécaniques [3], des rondelles élastiques disposées sous les boulons en acier permettent de compenser les différences de dilatation de l'acier et du conducteur. En l'absence de ces rondelles, et par suite de l'échauffement les boulons en acier soumettent les barres à une forte pression qui les déforme et favorise le desserage des connexions. Pour le raccordement des barres entre elles,



des joints flexibles appelés "colliers de dilatation" [15] absorbent les dilatations des barres et les vibrations provoquées par la manipulation d'appareils de coupure. La destruction des isolateurs par suite de l'échauffement est ainsi évitée. (Fig. 4.4 et 4.5).

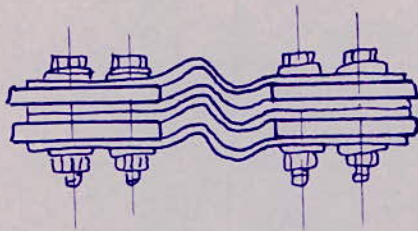


Fig. 4.4. Connexions de barres par colliers de dilatation [15].

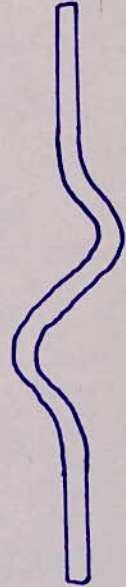


Fig. 4.5. Collier de dilatation. Ces joints sont constitués de très fines feuilles soudées entre elles aux extrémités. [15].

#### 4.3-b - Calcul de la section des conducteurs.

Les contraintes thermiques dues aux courts-circuits (donc les plus intenses) dépendent des durées et intensité des courants de court-circuit. Les courants de court-circuit de jeux de barres, qui décroissent d'une valeur maximale (courants de choc) à une valeur permanente de court-circuit sont particulièrement intenses aux niveaux des génératrices. D'autre



part, les générateurs et transformateurs sont construits de telle sorte que la durée admissible des courants de court-circuit soit assez longue afin d'assurer la continuité d'alimentation. Donc, pour chaque partie du réseau (en ce qui nous concerne pour chaque jeu de barres) le fournisseur d'énergie électrique impose une durée-limite de court-circuit.

La section d'un conducteur pour un échauffement donné s'obtient en écrivant que la puissance reçue  $R \cdot I_{cc}^2 dt$  est égale à la puissance dissipée  $4,184 \cdot m \cdot c \cdot d(\Delta\theta)$  :

$$R I_{cc}^2 dt = 4,184 m c d(\Delta\theta)$$

avec  $R = \rho \frac{L}{S} = \rho_{20} (1 + \alpha_{20} \cdot \Delta\theta) \cdot \frac{L}{S}$ ,

$$m = \gamma L S,$$

$c$  = chaleur spécifique.

La résolution de cette équation implique [16] :

$$S = \frac{I_{cc} \cdot 10^3 \cdot \sqrt{t}}{\sqrt{\frac{4,184 \gamma c}{\rho_{20} \alpha_{20}} \text{Log}(1 + \alpha_{20} \Delta\theta)}}$$

où  $I_{cc}$  est l'intensité du courant de court-circuit de choc.

$t$ , la durée du court-circuit, en secondes.

$c$ , la chaleur spécifique, en  $\text{cal gr}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ .

$\gamma$ , la masse spécifique, en  $\text{gr} / \text{cm}^3$ .

$\rho_{20}$ , la résistivité électrique à  $20^\circ\text{C}$ , en  $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ .

$\alpha_{20}$ , le coefficient de température à  $20^\circ\text{C}$ , en  $^\circ\text{C}^{-1}$ .



CUIVRE NU  $\theta_1 = 50^\circ\text{C}$   
 $\theta_{max} = 200^\circ\text{C}$

$$S = 7,00 \cdot I_{cc} \cdot \sqrt{t}$$

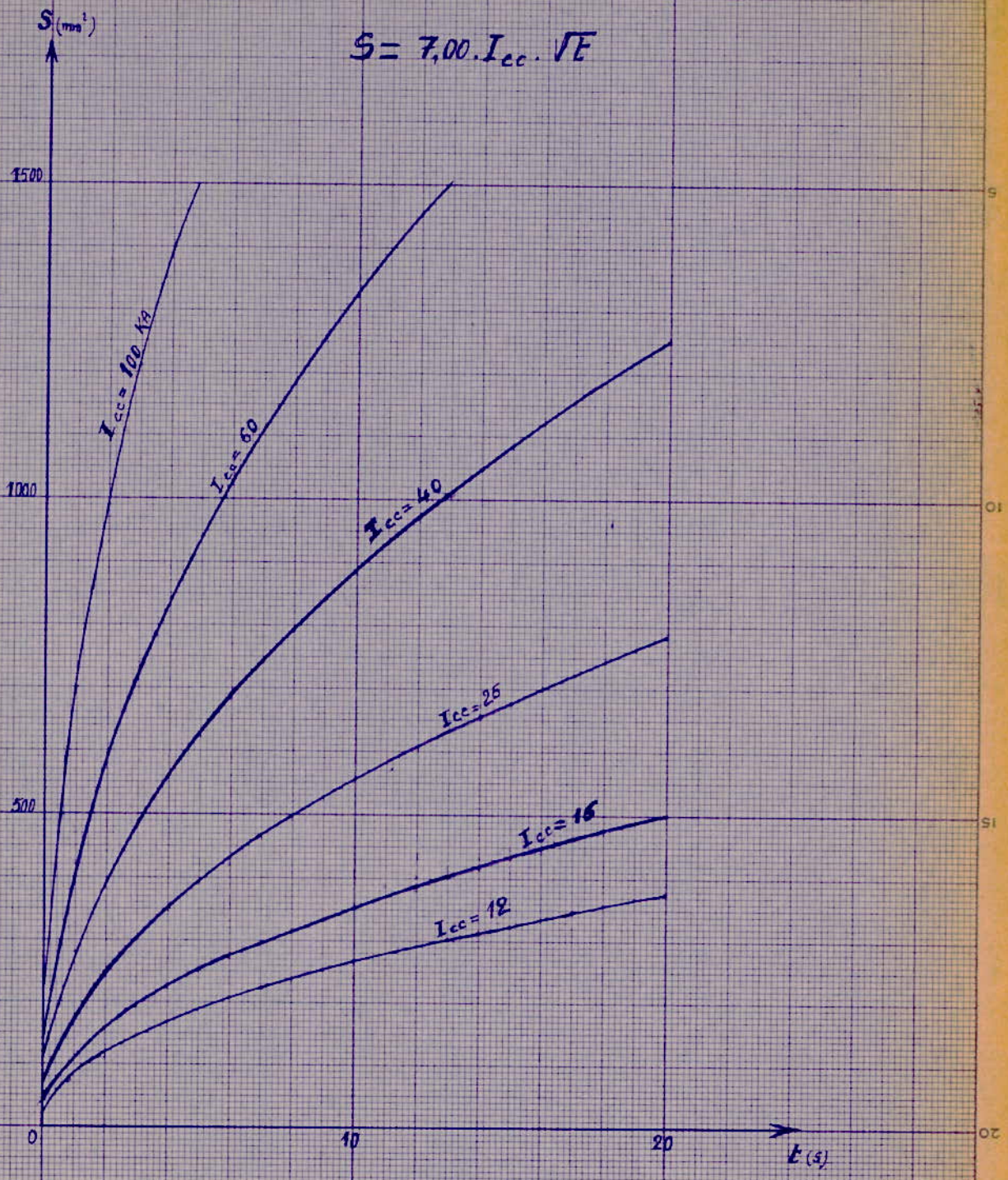


Fig. 4-6. Choix de la section des conducteurs en cuivre en fonction des contraintes thermiques



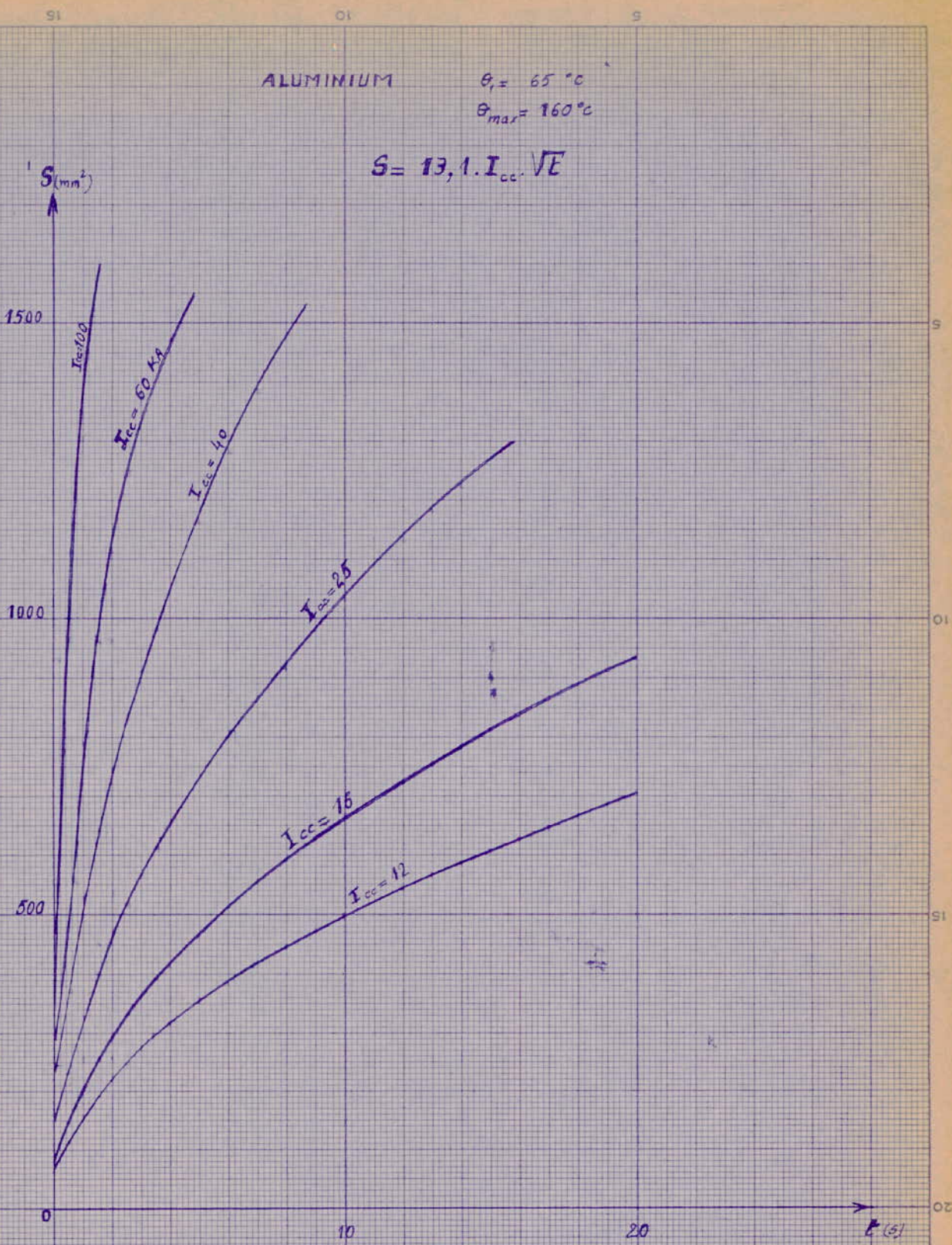


Fig. 4.7. Choix de la section des conducteurs en aluminium en fonction des contraintes thermiques.



$\Delta\theta = \theta_{\max} - \theta_1 =$  variation de température, en  $^{\circ}\text{C}$ .

où  $\theta_{\max}$  = température maximale admissible pendant le court-circuit, en  $^{\circ}\text{C}$ .

$\theta_1$  = température permanente admissible, en  $^{\circ}\text{C}$ .

La température maximale admissible, fixé en général par les normes, est fonction de différents facteurs, entre autres :

- tenue du matériau conducteur à des échauffements répétés et à des températures élevées,
- tenue des matériaux isolants,
- tenue des connexions, ...

Par exemple, il est spécifié dans la norme NF C15-100 que la température maximale admissible en régime permanent ne doit pas dépasser  $80^{\circ}\text{C}$ . L'échauffement des connexions doit rester inférieur à  $35^{\circ}\text{C}$ .

A l'aide des courbes des Fig. 4.6 et 4.7 [16] on peut, sans calculer les dimensions des conducteurs, déterminer les contraintes thermiques avec une précision suffisante.

#### 4.3.c. Influence de la forme des conducteurs.

L'énergie absorbée par unité de temps,  $Q$  (W/s) par un conducteur de résistivité électrique  $\rho$  ( $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ ), de longueur  $L$  (m) et de section  $S$  ( $\text{mm}^2$ ) parcouru par un courant  $I$  (A) est :



$$Q = \rho \cdot \frac{L}{S} \cdot I^2$$

L'énergie cédée par ce conducteur au milieu ambiant est donnée par la relation [12] :

$$Q = \alpha_{ks} \cdot A_{ref} \cdot \Delta\theta$$

avec  $\alpha_{ks}$ , coefficient de transmission de chaleur, [en  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]

$\Delta\theta$ , échauffement des conducteurs, en  $^\circ C$ .

$\Delta\theta = \theta_a - \theta_i$  où  $\theta_a$  est la température ambiante, en  $^\circ C$   
 $\theta_i$  est la température interne du conducteur, en  $^\circ C$ .

$A_{ref}$ , surface de refroidissement des conducteurs, en  $m^2$

$A_{ref} = p \cdot L$  où  $p$  est le périmètre de la section droite du conducteur, en  $m$ .

$L$  est la longueur du conducteur, en  $m$ .

On en déduit l'échauffement en régime permanent [17] :


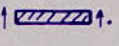
$$\Delta\theta = \rho \frac{I^2}{\alpha_{ks} \cdot S \cdot p} = k \cdot \frac{I^2}{S \cdot p}$$

Pour une intensité de courant donnée, l'échauffement d'un conducteur est inversement proportionnel au produit de la section droite de ce conducteur par le périmètre de la section. l'échauffement est donc d'autant plus faible que la surface de refroidissement est grande. Les barres méplates de plus faible épaisseur possible sont, par



conséquent, préférables, du point de vue de refroidissement, aux conducteurs cylindriques.

#### 4.3.d. Influence de l'échauffement sur la disposition des conducteurs.

Le refroidissement des conducteurs de section rectangulaire est plus efficace lorsque les barres sont disposées verticalement . L'air, circulant de bas vers le haut, est en liaison plus grande avec la surface de refroidissement dans ce cas que lorsque les barres sont disposées horizontalement .

#### 4.4. Contraintes mécaniques.

La force mécanique qui s'exerce sur deux barres cylindriques parallèles parcourues par un même courant est donnée par la relation :

$$F = 2,04 \cdot I^2 \cdot \frac{l}{a} \cdot 10^{-4} \quad (\text{kp})$$

avec  $a$ , distance entre conducteurs, en m,

$l$ , longueur des conducteurs, en m,

$I$ , intensité du courant, en kA.

En courant alternatif, on considère les efforts dus à l'intensité de crête  $I_s$  :

$$F_s = 2,04 \cdot I_s^2 \cdot \frac{l}{a} \cdot 10^{-4} \quad (\text{kp}).$$



Cette relation peut être appliquée, en approximation, pour des conducteurs de section quelconque, si leur distance est beaucoup plus grande que la plus grande dimension transversale des conducteurs [18].

Si l'on est en présence de conducteurs composés de plusieurs barres de section rectangulaire groupées en « paquets », il faut faire intervenir un facteur de correction (donné par la Fig. 4.8) qui tient compte des dimensions et écartements des barres de section rectangulaire. La force qui s'exerce sur chacune des barres est, à chaque instant, la résultante des forces dues aux courants parcourant chacune des autres barres qui s'expriment par la relation :

$$F = k \cdot 2,04 \cdot \left( \frac{I_s}{n} \right)^2 \cdot \frac{l}{a_{11}} \cdot 10^{-2} \quad (\text{kg/cm})$$

avec  $I_s$ , courant de crête par phase, en kA.

$n$ , nombre de conducteurs par phase

$a_{11}$ , distance entre conducteurs élémentaires.

La force qui s'exerce entre deux groupes de barres élémentaires est donné par la relation [16] :

$$F_s = 2,04 \cdot I_s^2 \cdot \frac{l}{a_t} \cdot 10^{-4} \quad (\text{kp})$$

avec  $a_t$ , distance fictive entre deux groupes de barres.

$$\frac{1}{a_t} = \frac{k_{12}}{a_{12}} + \dots + \frac{k_{1t}}{a_{1t}}$$

où  $k_{12}, \dots, k_{1t}$  = facteur de correction

$a_{12}, \dots, a_{1t}$  = distance géométrique entre deux barres élémentaires

Le tableau T.4.8 donne quelques valeurs de la distance fictive  $a_t$  en fonction du nombre et des dimensions des barres.

et des sections de conducteurs. Le tableau T. 4.10 donne quelques valeurs du module de résistance  $W$  (en  $\text{cm}^3$ ).

En réalité, la force qui s'exerce sur les conducteurs dépend du module d'élasticité du matériau utilisé donc de la fréquence propre du conducteur qui se calcule suivant la relation :

$$f_0 = 112 \sqrt{\frac{EI}{g \cdot l}} \quad (\text{Hz})$$

avec  $E$ , module d'élasticité, en  $\text{kg/cm}^2$

$I$ , moment d'inertie par rapport à l'axe de vibration, en  $\text{cm}^4$

$g$ , poids linéique spécifique, en  $\text{kg/m}$ .

$l$ , distance entre deux supports, en  $\text{m}$ .

En introduisant les valeurs de  $E$ ,  $I$  et  $g$  dans la relation précédente, la fréquence propre est donnée par [14] :

$$f_0 = C_1 \frac{b}{l^2} \quad \text{pour les conducteurs de section rectangulaire}$$

$$f_0 = C_2 \frac{d}{l^2} \quad \text{pour les conducteurs de section circulaire.}$$

avec  $b$ , dimension de la barre dans le sens d'agitation de la force, en  $\text{m}$

$d$ , diamètre de la barre, en  $\text{m}$ .

$C_1$  et  $C_2$ , constantes dépendant des matériaux.

On donne :

$$\text{Pour le Cuivre, } C_1 = 3,6 \cdot 10^5 \quad \text{et} \quad C_2 = 3,1 \cdot 10^5$$

$$\text{Pour l'Aluminium, } C_1 = 5,0 \cdot 10^5 \quad \text{et} \quad C_2 = 4,27 \cdot 10^5$$



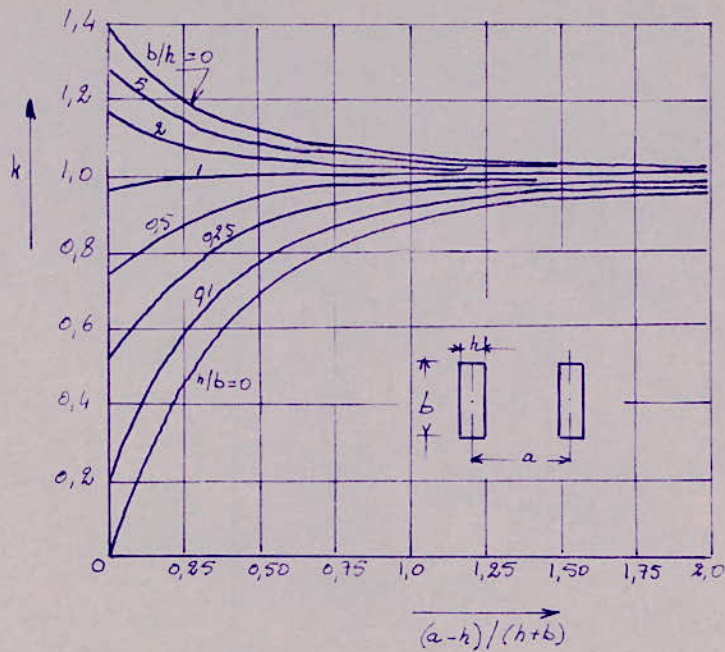
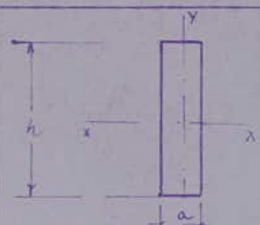
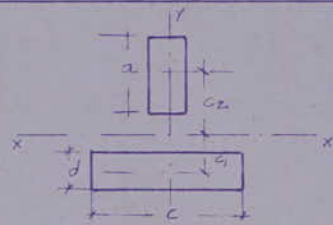
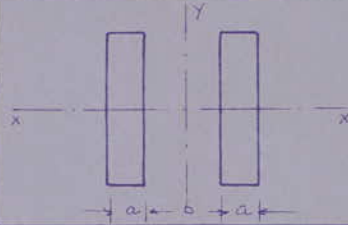
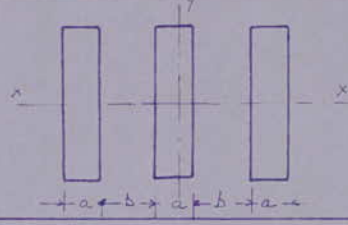
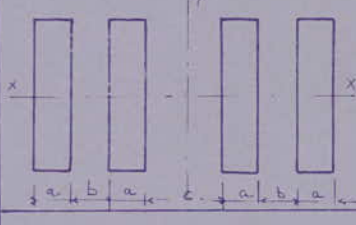
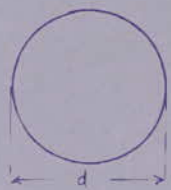



Fig. 4.8. Facteur de correction  $k$  à appliquer pour le calcul de la force existant entre conducteurs de section rectangulaire [18].

T.4.8. Distance fictive  $a_f$  entre deux groupes de barres [16]

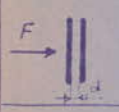
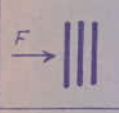
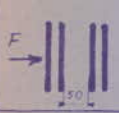
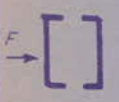
Disposition des barres	Épaisseur $d$ (mm)	Largeur $b$ (mm)							
		4	5	6	8	10	12	16	20
	0,5	2,0	2,4	2,7	3,3	4,0			
	1	2,8	3,1	3,4	4,1	4,7	5,4	6,7	8,0
	0,5		1,3	1,5	1,8	2,2			
	1	1,7	1,9	2,0	2,3	2,7	3,0	3,7	4,3
	0,5		1,4	1,5	1,8	2,0			
	1	1,74	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	3,2	

T.4.9 - Expressions des moments d'inertie et modules de résistance en fonction du nombre et des sections de conducteurs.

	Moments d'inertie $I$ (cm <sup>4</sup> )	Modules de résistance $W$ (cm <sup>3</sup> )
	$I_y = \frac{h a^3}{12}$ $I_x = \frac{a h^3}{12}$	$W_y = \frac{h a^2}{6}$ $W_x = \frac{a h^2}{6}$
	$I_x = \frac{b a^3}{12} + a b c_z^2 + \frac{c d^3}{12} + d c_z^2$ $I_y = \frac{a b^3}{12} + \frac{c d^3}{12}$	
	$I_x = 2 \cdot \frac{a h^3}{12}$ $I_y = \frac{h a^3}{6} + 2 \cdot a h \left( \frac{a+b}{2} \right)^2$	$W_x = \frac{a \cdot h^2}{3}$ $W_y = \frac{I_y}{a + \frac{b}{2}}$
	$I_x = 3 \cdot \frac{a h^3}{12}$ $I_y = 3 \cdot \frac{h a^3}{12} + 2 a h (a+b)^2$	$W_x = a \frac{h^2}{2}$ $W_y = \frac{I_y}{b + \frac{3}{2} a}$
	$I_x = 4 \cdot \frac{a h^3}{12}$ $I_y = 2 \left[ 2 \frac{h a^3}{12} + 2 a h \left( \frac{3a+c}{2} + b \right)^2 + 2 a h \left( \frac{a+c}{2} \right)^2 \right]$	$W_x = \frac{2}{3} a h^2$ $W_y = \frac{I_y}{2a + b + \frac{c}{2}}$
	$I = \frac{\pi d^4}{64}$	$W = \frac{\pi d^3}{32}$
	$I = \frac{\pi d_1^4}{64} - \frac{\pi d_2^4}{64}$	$W = \frac{2}{d_2} \left( \frac{\pi d_1^4}{64} - \frac{d_2^4}{64} \right)$



T. 4.10. Modules de résistance du conducteur principal  $W$  ( $\text{cm}^3$ ) composé de deux conducteurs au moins [16].

Disposition des barres	Dimensions mm. mm							
	40.10	50.10	60.10	80.10	100.10	120.10	160.10	200.10
	3,5	4,3	5,2	6,9	8,7	10,4	13,9	17,4
	7,9	9,9	11,9	15,8	19,8	23,8	31,7	39,6
	6,9	8,7	10,4	13,9	17,3	20,8	27,7	34,7
	Profil							
	[ 6	[ 8	[ 10	[ 12	[ 14	[ 16	[ 18	[ 20
	12,7	27,9	41,5	74	113	162	224	300

L'intensité de la force électrodynamique qui varie donc avec l'intensité du courant, peut avoir un caractère permanent, un caractère périodique, ou un caractère de choc respectivement dans les cas des courants continus permanents, des courants alternatifs ou des courants de choc. Les forces électrodynamiques dues aux courants de choc sont les plus importantes. Elles sont donc prédominantes pour le dimensionnement des conducteurs et des supports.

Le calcul des contraintes mécaniques s'effectue en considérant les barres comme des poutres travaillant à la flexion, posées sur des appuis et soumises à une charge uniformément répartie. La portée à considérer est celle comprise entre les supports [19]. On distinguera les "contraintes principales" dues aux forces s'exerçant entre conducteurs principaux, et les "contraintes partielles" dues aux forces s'exerçant entre conducteurs d'une même phase.

Les efforts de flexion sont donnés par la relation:

$$\sigma_s = \frac{M_s}{W} \quad (\text{kp/cm}^2).$$

où  $M_s$  est le moment de flexion donné par

$$M_s = \frac{F_s \cdot l}{12} = 1,7 \cdot I_s^2 \cdot \frac{l^2}{a} \cdot 10^{-3} \quad (\text{kp. cm})$$

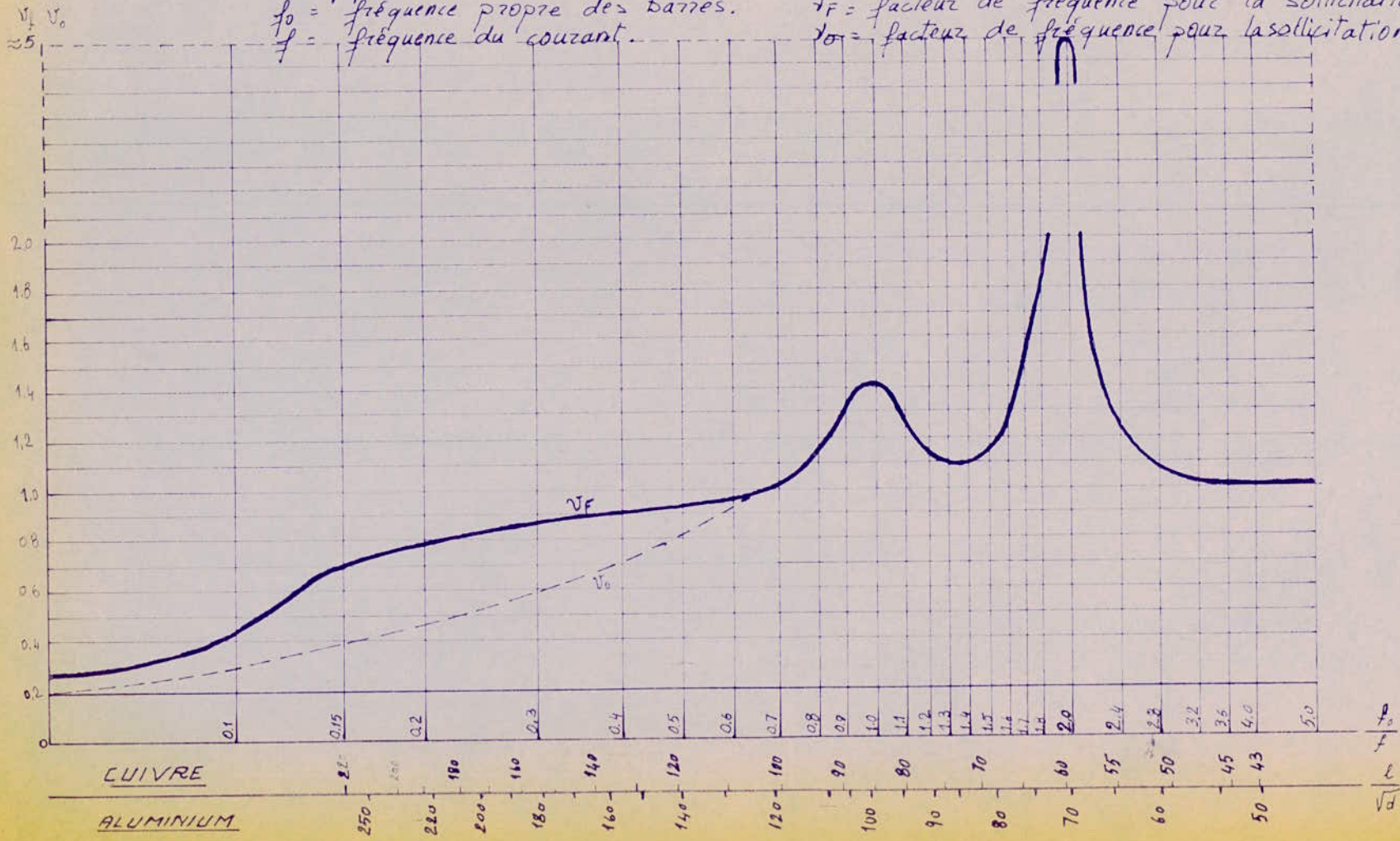
$W$  est le module de flexion, en  $\text{cm}^3$ , par rapport à l'axe perpendiculaire au plan de la force d'agitation. Le tableau T. 4.9 donne les expressions de  $W$  en fonction du nombre



Fig. 4.3 - Facteurs de fréquence concernant la sollicitation des isolateurs et des conducteurs lors de court-circuit entre deux ou entre trois phases dans des installations avec conducteurs disposés en nappe [16].

$f_0$  = fréquence propre des barres.  
 $f$  = fréquence du courant.

$\gamma_f$  = facteur de fréquence pour la sollicitation de supports.  
 $\gamma_0$  = facteur de fréquence pour la sollicitation de conducteurs.





La figure 4.3 représente la variation du facteur de fréquence  $\nu_\sigma$  en fonction de la fréquence propre  $f_0$  du conducteur. Ce facteur permet de calculer les contraintes de flexion réelles qui s'exercent sur les conducteurs, donc en tenant compte de la nature du courant et du module d'élasticité des matériaux:

$$\sigma_s = \nu_\sigma \cdot \frac{M_s}{W}$$

En général, on prend :

$\nu_\sigma = 2$  dans le cas du courant continu

$\nu_\sigma = 1$  dans le cas du courant alternatif.

Les sections des conducteurs choisies doivent être telles que la somme des contraintes principales et des contraintes partielles reste inférieure aux contraintes admissibles par les matériaux utilisés :

$$\sigma_s = \sigma_{s_1} + \sigma_{s_2} \leq \sigma_{\text{admissible}}$$

avec  $\sigma_{s_1}$ , contraintes principales de flexion, en  $\text{kp/cm}^2$

$\sigma_{s_2}$ , contraintes partielles de flexion, en  $\text{kp/cm}^2$

$\sigma_{\text{adm}}$ , contraintes de flexion admissible par le matériau utilisé, en  $\text{kp/cm}^2$ .

Pour calculer contraintes de flexion exercées par les barres sur les supports, il faut multiplier l'expression de la force agissant sur les barres par le facteur de fréquence  $\nu_F$ . Ce facteur est donné par la courbe de la Fig. 4.3 en fonction de la fréquence propre du conducteur. Le moment de flexion s'exprime alors par :



$$M'_s = \frac{F'_s l}{12} = \gamma_F \cdot M_s \text{ (kp. cm)}$$

et les contraintes de flexion par :

$$\sigma'_s = \gamma_F \cdot \gamma_\sigma \cdot \frac{M_s}{W} = \gamma_F \cdot \gamma_\sigma \cdot \frac{F'_s l}{12 W}$$

Les supports sont également soumis à une double sollicitation due aux efforts entre conducteurs principaux et aux efforts entre conducteurs élémentaires :

$$\sigma'_s = \sigma'_{s_1} + \sigma'_{s_2} < \sigma'_{\text{admissible}}$$

avec  $\sigma'_{s_1}$ , contraintes principales de flexion s'exerçant sur les supports, en  $\text{kp/cm}^2$ .

$\sigma'_{s_2}$ , contraintes partielles de flexion s'exerçant sur les supports, en  $\text{kp/cm}^2$ .

$\sigma'_{\text{admissible}}$ , contraintes de flexion admissibles par les supports, en  $\text{kp/cm}^2$ .

Dans la fixation de la limite des contraintes de flexion exercées par les barres sur leurs supports, on part du point de vue qu'une flexion résiduelle de 3 à 5% de la longueur de la barre comprise entre deux supports est admissible [18].

On constate [18] que des barres largement dimensionnées et par conséquent très robustes peuvent, dans certaines circonstances, être sujettes à des effets de résonance et exercer sur leurs supports des efforts notablement plus grands que des barres moins robustes.

Constantes utilisées pour le calcul des contraintes.

Grandeurs	Symboles	Unités	Valeurs	
			Cu	Al
Perméabilité	$\mu$	H/m	$1,2566 \cdot 10^{-6}$	$1,2566 \cdot 10^{-6}$
Constante diélectrique du vide	$\epsilon_0$	pF/m	8,855	
Coefficient de température, à 20°C	$\alpha_{20}$	°C <sup>-1</sup>	0,00392	0,0286
Coefficient de dilatation thermique à 20°C	$\alpha'_{20}$	°C <sup>-1</sup>	$16,5 \cdot 10^{-6}$	$23,9 \cdot 10^{-6}$
Résistivité électrique, à 20°C	$\rho_{20}$	$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$	0,0178	0,0286
Masse spécifique	$\gamma$	kg/dm <sup>3</sup>	8,9	2,7
chaleur spécifique	c	cal/gr.°C	0,0925	0,217
Module d'élasticité à 20°C	E	Kg/cm <sup>2</sup>	13000	9432
Contrainte de flexion admissible	$\sigma_{adm}$	Kg/cm <sup>2</sup>	2800	1000



## Conclusion

Cette étude m'a permis de ressortir les conclusions suivantes :

- Les jeux de barres jouent un rôle essentiel dans les réseaux de distribution d'énergie électrique et leur domaine d'application est très vaste, tant dans les installations à HT que dans les installations à BT.

- La complexité des schémas de jeux de barres augmente avec l'importance de la puissance installée et avec la sécurité d'alimentation exigée.

- Le choix des jeux de barres s'effectue en fonction des contraintes électriques, thermiques et mécaniques.

- Les formes des conducteurs diffèrent selon la tension de service (HT ou BT). Un surdimensionnement des barres peut entraîner des pertes considérables.

- Le choix des appareils de coupure, protection et commande est très varié.

- Les problèmes mécaniques de dilatation et de vibration sont pris en considération pour les calculs des jeux de barres et de leurs supports dans les installations importantes.

## Bibliographie.

[1] Encyclopédie de l'électricité. Tome 1. LAROUSSE.

GRENOBLE, octobre 1969.

[2] Cahiers techniques MERLIN GERIN :

N° 19, Novembre 1973.

N° 30, Décembre 1973.

[3] MAUDUIT, A. : Installations électriques à haute et basse tension.

Tome 3. 4<sup>e</sup> édition. DUNOD. PARIS 1964.

[4] R. G. E. Tome 63 :

- L'aluminium dans les installations électriques, par ROLLS, R.  
Janvier 1955. N° 1.

- A propos de la coupure des courants de court-circuit,  
par BOUVIER, G., Novembre 1955. N° 11.

- Protection des installations à basse tension, par BOUVIER, G.  
Décembre 1955, N° 12.

[5] Revue Brown Boveri. Tome 64. Février 1977. N° 2.

[6] FREEMAN, P.J. : ELECTRIC POWER TRANSMISSION AND DISTRIBUTION.

S.I. UNIT EDITION HARRAP, LONDON. SECOND EDITION, 1977.

[7] R. G. E. Tome 86. N° 2. Février 1977.

Interactions entre niveaux de courant de court-circuit et  
conception du réseau de transport, par N. GIRARD et H. PERSOZ.

[8] CAPELIN. Catalogue N° 22.

[9] MERLIN GERIN. Appareillage électrique à HT et BT.

Catalogue B. GRENOBLE.

[10] R. G. E. Tome 55. Mars 1946.



Détermination de la composante aperiodique dans les réseaux.  
au moment d'un court-circuit et de l'amplitude maximum de  
la première onde de courant, par CHAMBRILLON, R.

[11] Normes NF C 15-100.

[12] LIWSCHITZ, M. : Calcul des machines électriques. Tome 2.  
traduit par MARET, L. Edition SPS LAUSANNE. 1970.

[13] KÜPFMÜLLER, K. : Electricité théorique et appliquée.  
Editions DUNOD. PARIS. 1959.

[14] PORAR, H. : Poste de coupure (en yougoslave).  
UNIVERSITE de ZAGREB, 1961.

[15] SIEMENS. Catalogue N° 2. Janvier 1976.

[16] SIEMENS. Formeln- und Tabellenbuch für starkstromingenieur,  
SIEMENS, 1968.

[17] Technique de l'Ingénieur. D. 692.

[18] Revue Brown Boveri. Tome 57. N° 6/7. Juin/Juillet 1970.  
Forces électrodynamiques apparaissant dans les postes  
électriques lors de court-circuit.

[19] HEINY, P. et NAUDY, R. : Technologie d'électricité. Tome 3.  
Editions FOUCHER. PARIS. 1973.