

7/74

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

2ed

DEPARTEMENT ELECTRIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES



CENTRALE THERMIQUE D'ALGER



CALCUL DES CIRCUITS AUXILIAIRES



*Belamir
cité Annasser*

Proposé et Dirigé Par :

Mr. L. PREDA

Dr. Ingénieur, Professeur à l' E. N. P.

Etudié Par :

MM. A. DENANE

A. METTAI

PROMOTION 1974

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

CENTRALE THERMIQUE D'ALGER



CALCUL DES CIRCUITS AUXILIAIRES



Proposé et Dirigé Par :

Mr. L. PREDA

Dr. Ingénieur, Professeur à l' E. N. P.

Etudié Par :

MM. A. DENANE

A. METTAI

PROMOTION 1974

Qu'il nous soit permis de renouveler nos vifs remerciements et toute notre gratitude à notre promoteur, Monsieur Laurián PREDA Docteur Ingénieur, pour la bienveillante attention avec laquelle il nous a aidé pour l'élaboration de ce projet.

Toute notre reconnaissance va également à tous les professeurs qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à notre formation.

177 O M M A I R E

	pages
I - INTRODUCTION	I
II - PRINCIPE de CALCUL de la PUISSANCE DEMANDEE d'une INSTALLATION ELECTRIQUE	5
I - PUISSANCE DE POINTE P_p	7
2 - FACTEUR d'UTILISATION K_u	8
3 - FACTEUR de POINTE K_M	8
4 - NOMBRE EQUIVALENT de CONSOMMATEURS n_e ..	9
III - CALCUL des SECTIONS des CABLES	27
IV - CALCUL des COURANTS NOMINAUX	30
V - LES COURANTS DE COURT-CIRCUITS TRIPHASES ...	33
VI - GRANDEURS REDUITES	39
VII - CALCUL des VALEURS REDUITES des REACTANCES .	41
VIII - PRINCIPE de CALCUL du COURANT DE CC	44
IX - CALCUL PRATIQUE du CC TRIPHASE	51
I - EXEMPLES de RECHERCHE des DIFFERENTS CHEMINS POSSIBLES VEHICULANT le COURANT de CC en un POINT K	52
2 - EXEMPLE de CALCUL du COURANT de CC	53
2 - a) Détermination des coefficients de dis- tribution du courant en chaque branche	54
2 - b) Calcul du courant subtransitoire de CC	55
3 - CALCUL des COURANTS de DUREE	55
3 - a) Détermination des réactances de calcul	56
4 - EXEMPLE de CALCUL du COURANT de CC dans le cas le PLUS DEFAVORABLE	59

	pages
X - EFFET THERMIQUE	64
XI - VERIFICATION des CONDUCTEURS à la STABILITE THERMIQUE	70
XII - CHUTE de TENSION	73
XIII - LES EFFORTS ELECTRODYNAMIQUES	75
XIV - STABILITE ELECTRODYNAMIQUE des BARRES COLLECTRICES	79
XV - PRINCIPE de DIMENSIONNEMENT des JEUX de BARRES	86
XVI - CALCUL du JEU de BARRES 5,5 kV	92
I - CALCUL de la SECTION	96
2 - VERIFICATION à l'EFFET THERMIQUE	96
3 - VERIFICATION à la CHUTE de TENSION	97
4 - VERIFICATION aux EFFORTS ELECTRODYNAMIQUES	99
XVII - I - CHOIX des DISJONCTEURS	102
2 - CHOIX des SECTIONNEURS	104
XVIII- LIMITATION de la TEMPERATURE dans les CONDUCTEURS	108

LE GENERALITES

-----oooOooo-----

Le bon fonctionnement des installations électriques, postes électriques se trouve parfois perturbé et il se produit souvent des anomalies indésirées entravant cette bonne marche du régime normal et entraînant des variations importantes des paramètres de l'énergie électrique.

L'origine des défauts des réseaux ou des machines est due soit aux influences externes inévitables, soit à des imperfections du matériel et les conséquences de ces perturbations peuvent être assez graves conduisant à l'interruption de l'alimentation en énergie électrique des consommateurs et dans des cas à la détérioration de l'équipement électrique quoique parfois la protection aurait joué pleinement son rôle.

Il s'agit expréssément de la mise hors-circuit et d'une façon automatique de l'élément defectueux qui est confié au système de protection. Ce système comporte un groupe d'organes appelés relais qui surveillent en permanence une partie déterminée du réseau. Lorsqu'un élément du réseau est le siège d'un court-circuit ou d'un défaut d'isolement, il est indispensable de le mettre le plus rapidement possible hors tension, afin de limiter les dégats que peut causer l'arc ou les courants de défauts et d'éviter les répercussions que le maintien d'un court-circuit aurait sur le fonctionnement général du réseau en particulier sur sa stabilité.

Le système de protection joue donc un rôle très important dans le fonctionnement des réseaux de transport et de distribution d'énergie puisque c'est d'eux que dépend en grande partie la sécurité de tout l'ensemble et la continuité de service.

A cet effet, il est de rigueur de considérer avec une grande importance les calculs des installations qui dans le plupart des cas ont un aspect complexe et l'étude exacte des phénomènes transitoires électromagnétiques se voit souhaitée afin de réduire les effets néfastes sinon diverses méthodes et hypothèses simplificatrices utiles sont nécessaires à la détermination des paramètres des circuits dont l'erreur reste à la limite admissible.

L'étude préliminaires pour une installation électrique consiste donc en ce choix convenable des équipements électriques qui se déterminent dans la majorité des cas sur la base de la surintensité des effets des courants de court-circuits et la conséquence grave qui s'en suit.

Ces court-circuits le plus souvent sont accidentels apparaissent à la rupture des conducteurs, aux contournements des isolateurs, aux fausses manoeuvres, à la surtension se caractérisant par le contact entre phases, ou entre phase et terre imprévu évidemment dans les conditions normales de fonctionnement.

Notre étude consiste donc en l'alimentation en énergie électrique des différents appareils et moteurs

représentant les circuits principaux des services propres de la centrale d'Alger Port II qui existe déjà. Le domaine auquel on se propose de vérifier se rapporte au dimensionnement appréciable des circuits parcourus par l'énergie électrique circulant des groupes générateurs aux consommateurs et circuits liés directement à la Centrale Thermique.

I - INTRODUCTION

Les centrales thermiques électriques consomment de 4 à 8 pour 100 de l'énergie électrique qu'elles produisent. Entre les groupes turbo-alternateurs, la centrale se compose de divers moteurs (pompes alimentaires, pompes d'extractions, ventilateurs de soufflage, de tirage etc...), des appareils de contrôle, Tous ces éléments demandent à être alimentés en énergie électrique et constituent les auxiliaires de la centrale.

On s'occupera dans cette étude des auxiliaires de la Centrale d'Alger-Port II, et l'on calculera :

- la puissance appelée par l'ensemble des auxiliaires. Ceci nous fera prévoir la puissance des différents transformateurs. Les moteurs nous sont fournis avec toutes leurs caractéristiques nécessaires.
- les sections des câbles et jeux de barres à l'aide desquelles se fait l'alimentation des auxiliaires en régime de fonctionnement normal.
- le courant de court-circuit en chaque point du réseau constitué par ces auxiliaires. Ce calcul s'opère pour le régime le plus défavorable.
- Ce calcul va nous permettre de vérifier les sections précédentes du point de vue de la sécurité exigée (stabilité thermique et électrodynamique, chutes de tension).
- Ensuite on procédera aux choix des disjoncteurs et sectionneurs.
- On étudiera la limitation de température dans les câbles

et jeux de barres.

Cette étude consiste en quelque sorte à la vérification de l'installation déjà en place et en service de la Centrale d'Alger-Port II .

II) RESEMENTATION de la CENTRALE ALGER-PORT II

La centrale d'Alger-Port II alimente le réseau national interconnecté à partir de 4 départs 60 kV et comprend 2 groupes turbo-alternateurs dont les caractéristiques nominales sont les suivantes :

$$S_n = 75 \text{ MVA} \quad ; \quad U_n = 10,3 \text{ kV} \quad ; \quad I_n = 4210 \text{ A} \quad ; \quad \cos \phi = 0,8$$

Une partie de cette énergie alimente les services propres de la centrale (Auxiliaires). Le transit de cette énergie est assuré par :

- un transformateur de soutirage 10,3/5,5 kV , 5,5 MVA au niveau de chaque groupe (ITAt et 2TAt) alimentant les auxiliaires de tranche.
- un transformateur auxiliaire 63/5,5 kV, 5,5 MVA relie directement le double jeux de barre 60 kV aux auxiliaires de la centrale.
- le secours est réalisé par le 3^e enroulement d'un transformateur tertiaire 63/II/5,5 kV de puissance II MVA. Le second enroulement à II kV sert toutefois à l'alimentation en permanence du poste de distribution 10 kV de la ville d'Alger et transférant une puissance de 30 MVA.

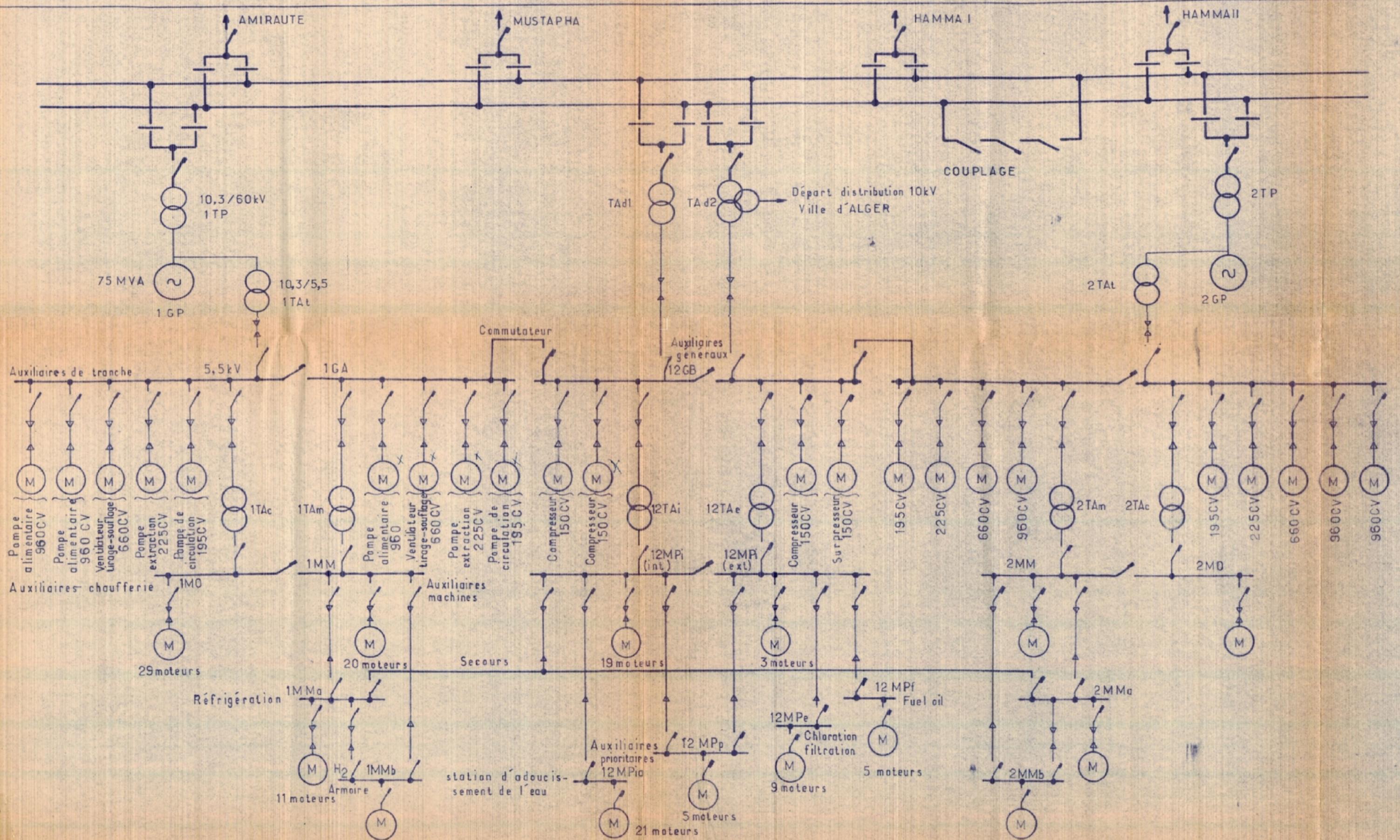
Les transformateurs ITAt, 2TAt et TAdI sont tout le temps en service.

Les jeux de barres 5,5 kV où sont reliés les secondaires

des transformateurs précédents desservent les plus gros moteurs consommant la grande partie de la puissance (environ 80 pour cent) soumise aux services propres de cette centrale.

A partir de la tension 5,5 kV, 4 transformateurs de 400 kVA abaissant la tension à 380 V fournissent l'énergie aux restes des moteurs. Voir schéma unifilaire.

SCHEMA ELECTRIQUE UNIFILAIRE (1)



II - 77) PRINCIPE de CALCUL de la PUISSANCE DEMANDEE
d'une INSTALLATION ELECTRIQUE

Cette question de calcul de charge électrique pour un groupe d'utilisateurs dont notre étude aura pour base a un caractère aléatoire. Tous nos moteurs sont dotés de leur puissance installée et de leur propre technologie.

Quant à l'ensemble des utilisateurs, ils ne fonctionnent pas en même temps et il n'est donc pas possible pour la puissance globale d'un consommateur de procéder à une simple somme des puissances installées de chaque utilisateur.

Le but est donc la détermination de la puissance appelée par le consommateur. Ces puissances élémentaires ont un caractère essentiellement aléatoire qui tend à s'atténuer au fur et à mesure que le nombre d'utilisateurs devient plus important. Et la courbe de variation de la puissance appelée par un consommateur a une dispersion moins grande que la courbe relative à chaque utilisateur.

Il est donc indispensable de connaître les caractéristiques qui décrivent les variations de la puissance des différents utilisateurs.

Il est évident qu'au cours de la journée et même de l'année, la puissance absorbée par les utilisateurs varie d'une façon considérable.

Pour étudier les propriétés de charges et pour obtenir les données initiales nécessaires pour le calcul du système de transport d'énergie, on a recours aux courbes de charges.

En principe la courbe de charge en repère orthonormé montre les valeurs de la puissance absorbée à chaque instant pendant l'intervalle de temps étudié.

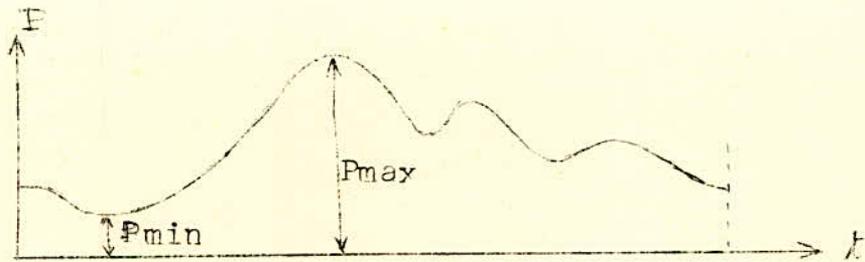


fig 1: Un exemple de courbe de charge

On distingue donc :

- Les courbes de charge individuelle quand il s'agit de puissance absorbée par un seul utilisateur.
- Les courbes de charge d'un groupe d'utilisateurs formant un consommateur.

Et du point de vue temps, on distingue:

- Les courbes de charge journalières qui mettent en évidence l'influence de l'heure sur la puissance absorbée.
- Les courbes de charge classée qui montrent la durée d'existence de la charge donnée pendant l'année.

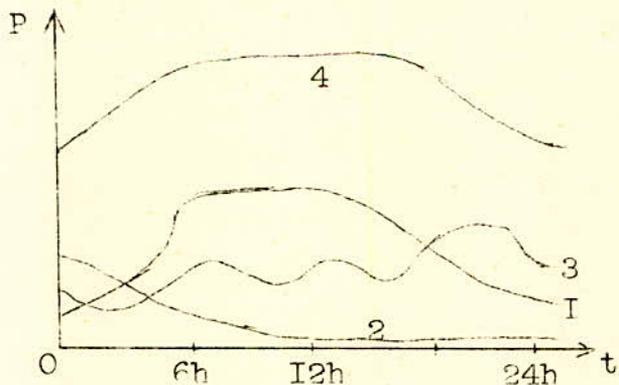
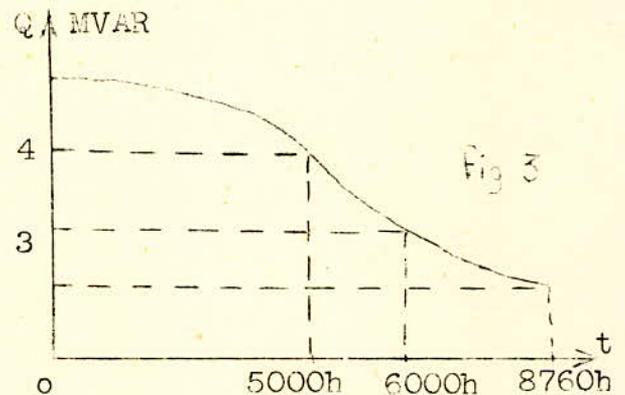


fig.2: La courbe (4) de charge journalière est la somme des courbes journalières (1, 2 et 3)



Courbe de charge classée (pendant 5000h la charge est 4MVAR)

On prend généralement 2 courbes de charge journalières: l'une d'été, l'autre d'hiver. Dans la documentation technique, on peut trouver des courbes de charge modèle pour toutes les

branches d'industrie, consommateurs urbains etc....

Ces courbes s'obtiennent en faisant des relevés périodiques donnant des courbes en escalier.

On utilise les notions suivantes :

- Consommation annuelle d'énergie active W ou réactive Q qui est la caractéristique la meilleure connue par le relevé de compteur effectué périodiquement pendant l'exploitation de consommations de même nature.

- La puissance installée fournie par le constructeur et qui est mentionnée sur le label du moteur ou de l'appareil.

- La puissance moyenne P_m , Q_m ou S_m qui est la valeur moyenne de la puissance effectivement absorbée pendant un temps t . On dispose de plusieurs puissances moyennes journalières selon qu'on considère 12h, 6h, etc..., qui dépend donc de l'intervalle de temps.

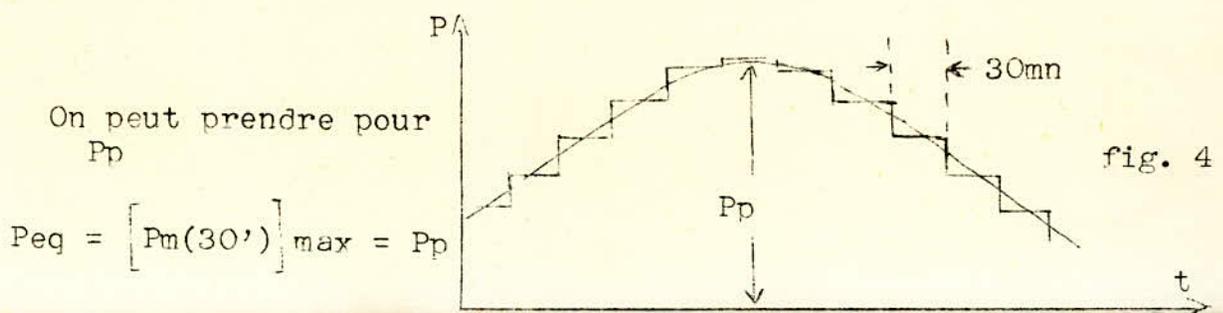
En fait, on se sert de la puissance moyenne journalière P_{mj} généralement et la puissance moyenne annuelle.

$$P_m = \frac{W}{T} ; \quad Q_m = \frac{Q}{T} \quad \text{on peut souvent trouver aussi}$$

$$Q_m = P_m \operatorname{tg} \varphi_m \quad \text{avec } \operatorname{tg} \varphi_m = \frac{Q}{W} \quad \text{correspondant à la valeur moyenne du facteur de puissance pour le même temps } t.$$

I - PUISSANCE de POINTE P_p

C'est la puissance maximum appelée pendant un temps appréciable. On prend en pratique pour P_p , la valeur maximum des puissances moyennes pendant 30minutes



2 - FACTEUR d'UTILISATION Ku

Comme les moteurs ne fonctionnent pas souvent sous leurs courants nominaux, ce qui revient à dire que la puissance installée étant P_i , la consommation d'un tel moteur n'est pas $P = \frac{P_i}{\eta}$ (avec η le rendement) mais sa consommation est donc la puissance moyenne journalière différente de sa puissance installée (= P_i).

On définit le facteur d'utilisation tel que :

$$K_u = \frac{P_{mj}}{P_i} \quad K_u < 1$$

Dans nos calculs, ce facteur d'utilisation nous a été fourni sur place aux services techniques de la centrale d'Alger Port II pour les différents moteurs des services propres de cette centrale.

Tandis que le facteur d'utilisation $K_{u\Sigma}$ au niveau d'un groupe d'utilisateurs ou consommateur (un atelier ou jeu de barres) :

$$K_{u\Sigma} = \frac{P_{mj} \text{ (totale)}}{P_i \text{ (totale)}}$$

3 - FACTEUR de POINTE K_M

ou COEFFICIENT de MAXIMISATION

En pratique, il est difficile de le calculer exactement. Il est défini comme suit :

$$K_M = \frac{P_p}{P_{mj}}$$

Justement il nous servira à la détermination de P_p

$$P_p = K_M \cdot P_{mj}$$

Dans le cas d'un moteur, la puissance de pointe P_p correspondrait au régime de démarrage où du point de vue courant à ce moment, il devient à peu près de 5 à 7 fois le courant Nominal I_n .

4 - NOMBRE EQUIVALENT de CONSOMMATEURS n_e

On le considère comme étant le nombre d'utilisateurs avant une même puissance qui déterminerait la même courbe de charge que les n utilisateurs considérés de puissances différentes.

En littérature, des abaques nous permettent de déterminer $K_M = f(n_e)$ pour différents K_u (courbe I)

Pour déterminer n_e , on utilise la formule :

$$n_e = \frac{(\sum_{i=1}^n P_{in})^2}{(\sum_{i=1}^n P_{in}^2)}$$

qui est valable

lorsque n varie de 10 à 15. Au delà, des formules simplifiées donnent n_e :

a - si $m = \frac{P_{i \max}}{P_{i \min}} \ll 3 \Rightarrow n_e = n$

b - si $m > 3$ et $K_u \geq 0,2 \Rightarrow n_e = \frac{2 \sum_{i=1}^n P_{in}}{P_{i \max}}$

c - La méthode la plus utilisée est d'adopter la technique basée

sur des abaques dont le principe est le suivant :

- On choisit l'utilisateur le plus puissant, soit P_{\max}
- On choisit les utilisateurs dits puissants c'est-à-dire ceux qui ont une puissance $P \geq \frac{P_{\max}}{2}$ soit n_I leur nombre
- On calcule la puissance totale de ces n_I utilisateurs

$$P_{iI} = \sum_{i=1}^{n_I} P_{inI}$$

- On calcule la puissance totale des n utilisateurs

$$P_i = \sum_{i=1}^n P_{in}$$

- On en déduit la Puissance réduite P^*

Si les n_I consommateurs puissants ont une puissance installée P_{iI} , la puissance réduite sera :

$$p^* = \frac{P_{iI}}{P_i} = \frac{\text{Puissance installée des } nI \text{ utilisateurs}}{\text{Puissance installée des } n \text{ utilisateurs}}$$

- On calcule aussi le nombre d'utilisateurs réduit : n^*

$$\text{avec } n^* = \frac{nI}{n} = \frac{\text{consommateurs puissants}}{\text{ensemble des utilisateurs}}$$

- Finalement à l'aide des abaques on détermine :

a) n_e^* le nombre équivalent d'utilisateurs réduit (abaques 2) . On définit n_e^* par :

$$n_e^* = \frac{n_e}{n} = \frac{\text{nombre équivalent d'utilisateurs}}{\text{nombre total d'utilisateurs}}$$

b) K_M le facteur de pointe est donné par l'abaque I

En résumé, la méthode de détermination de puissance consiste à procéder aux étapes suivantes :

a) - On repère l'utilisateur le plus puissant de Puissance P_{max}

b) - On calcule le nombre nI de consommateurs puissants ceux qui ont une puissance $P \geq \frac{P_{max}}{2}$

On déterminera la somme de leur puissance P_{iI}

c) - On calcule la puissance totale P_i de tous les utilisateurs et leur nombre n .

d) - On détermine la puissance réduite $p^* = \frac{P_{iI}}{P_i}$

et le nombre réduit d'utilisateurs $n^* = \frac{nI}{n}$

e) - Al'aide de l'abaque 2 $n_e^* = f(n^*)$ pour différents p^* , on tire la valeur de n_e^*

f) - on en déduit ensuite n_e par $n_e = n_e^* \cdot n$

g) - Connaissant n_e , à partir de l'abaque I $K_M = f(n_e)$ pour différents K_u .

h) - On tire finalement la puissance de pointe

$$P_p = K_M \cdot P_{m,j}$$

qui concerne la puissance de pointe réactive :

- si $n_e > I_0 \Rightarrow Q_p = Q_{m,j}$ avec $Q_{m,j} = P_{m,j} \cdot \text{tg } \phi$

- si $n_e \leq I_0 \Rightarrow Q_p = I, I Q_{m,j}$

D'où $S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}$

Dans un premier temps, on se propose de calculer la puissance appelée par les différents moteurs au niveau de chaque jeu de barres qui existe dans les circuits propres de notre Centrale.

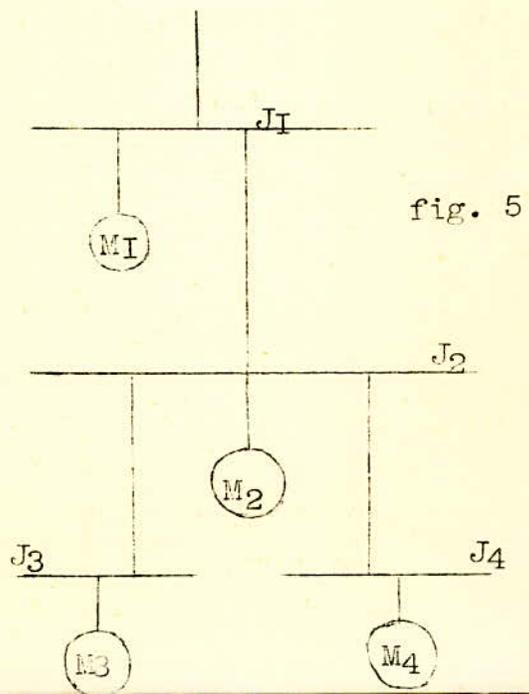
Certains jeux de barres font dériver en plus des moteurs d'autres jeux de barres auxquels on a déjà calculé la puissance appelée. Pour cela, au calcul du jeu de barres précédent, on considère donc les jeux de barres dérivés comme étant également des utilisateurs ayant les mêmes caractéristiques qu'un atelier.

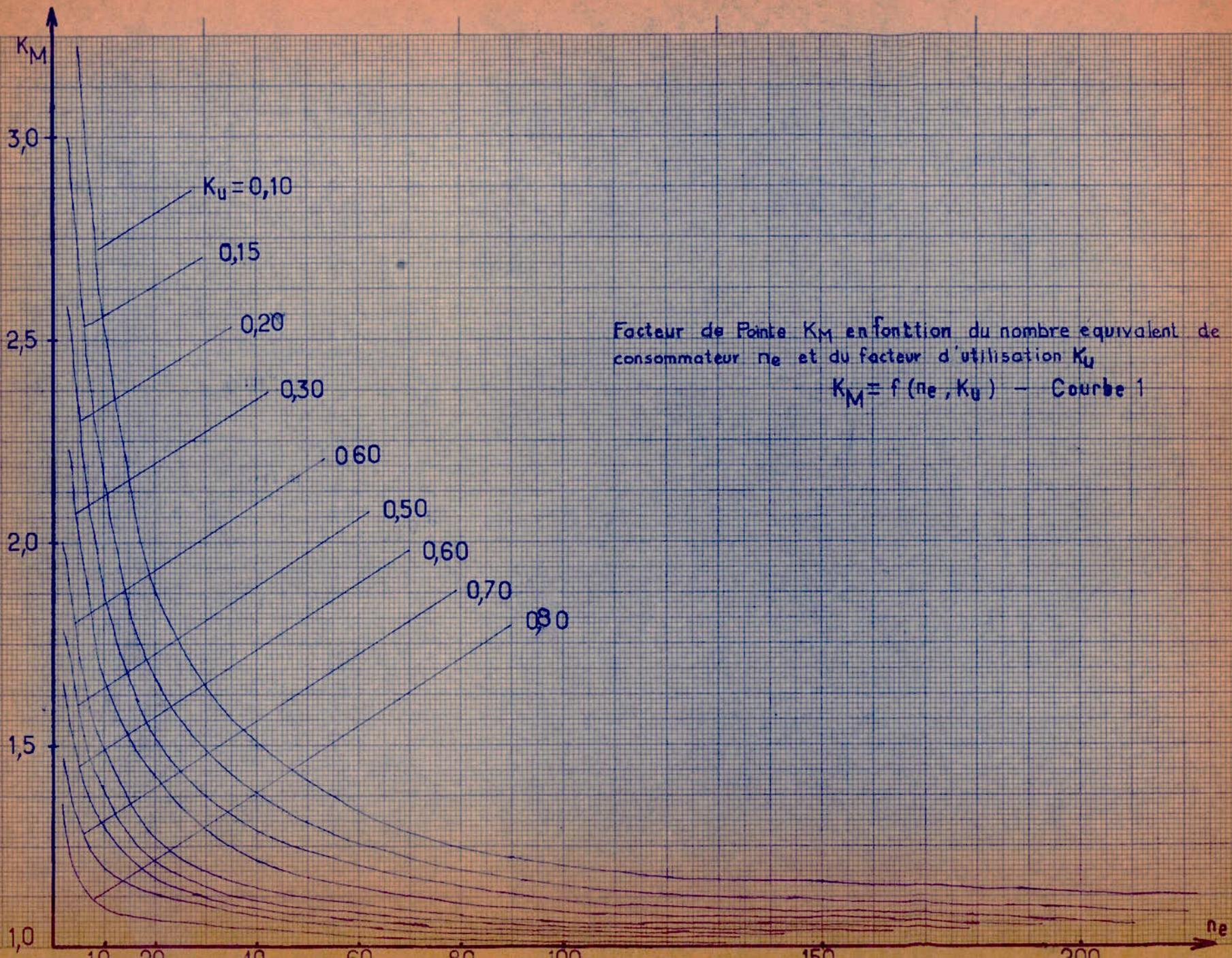
L'exemple de la figure 5 illustre mieux notre explication

On Calcule la puissance appelée par les jeux de barres J_4 puis J_3

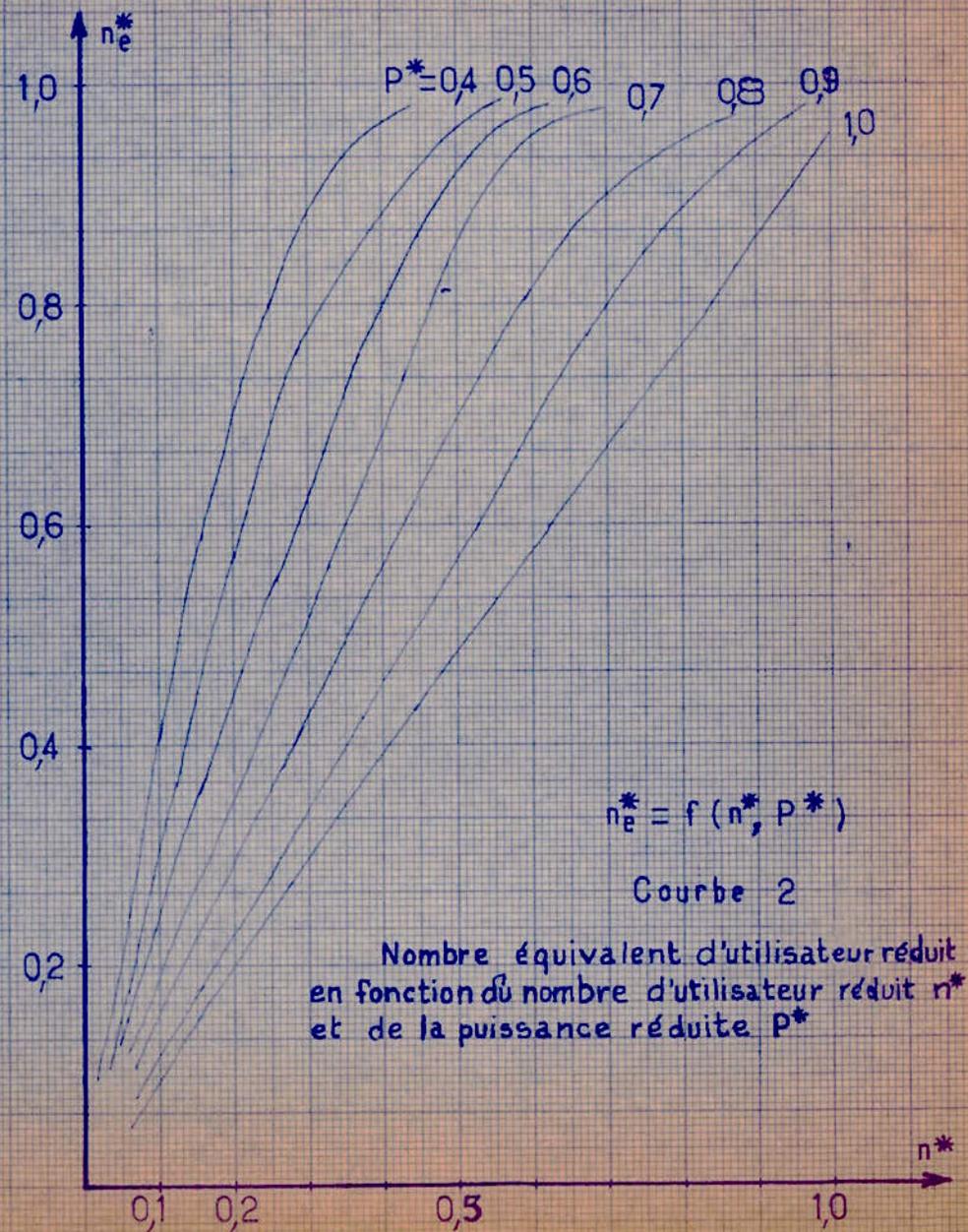
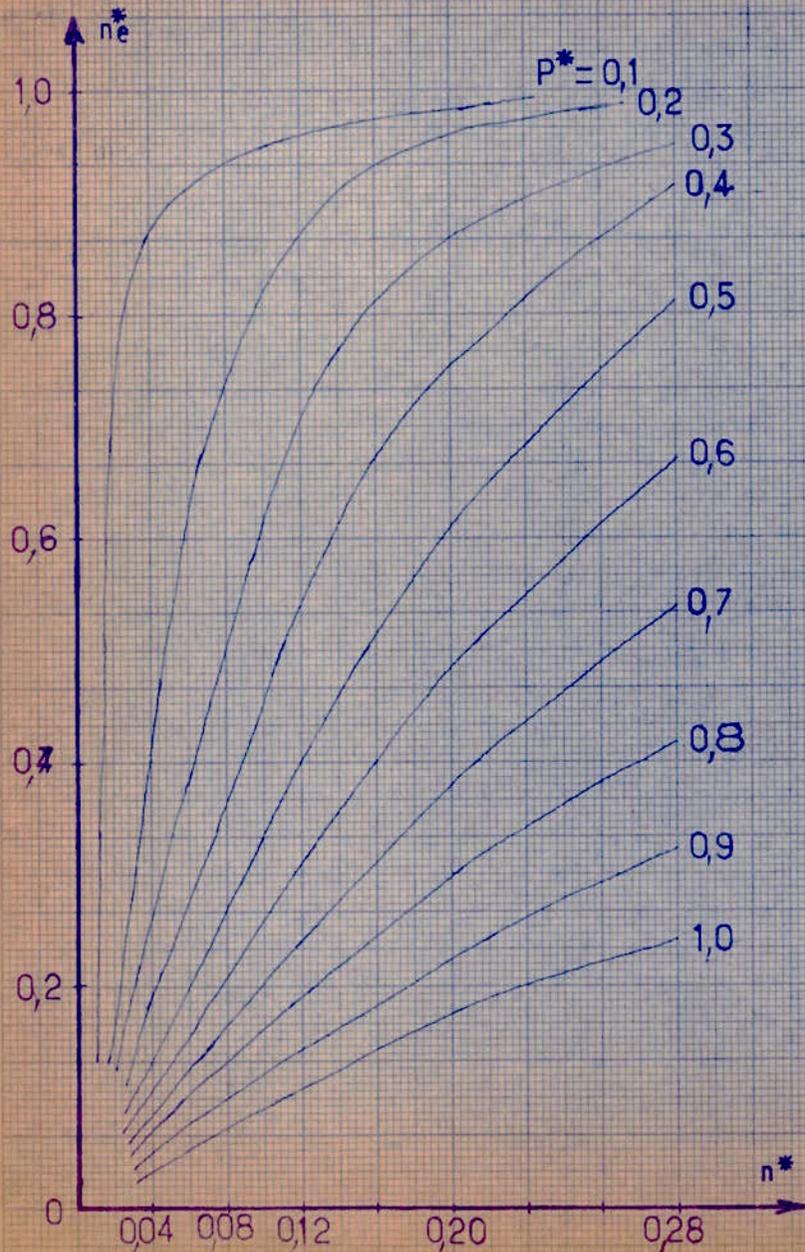
On calcule ensuite la puissance appelée par J_2 c'est-à-dire par J_4 , J_3 et M_2

Enfin de la même manière, la puissance du jeu de barres J_1 donc la puissance appelée par J_2 et M_1





Facteur de Pointe K_M en fonction du nombre équivalent de consommateur n_e et du facteur d'utilisation K_U
 $K_M = f(n_e, K_U)$ - Courbe 1



JEU DE BARRES 1MMa

MOTEURS	n nombre	PUISSANCE		$m \frac{P_{max}}{P_{min}}$	$\frac{P_{ej}}{P_i}$ Ku	Cosφ/tgφ	Ku.Pi Pmj	$P_{mj} \cdot tg\phi$ Qmj	n ₁	P ₁	P*	$n^* \frac{n_1}{n}$	ne*	$\frac{n^* \cdot n}{n_e}$	K _M	P _p kW	Q _p kVA _v	S _p kVA
		unitaire kW	totale kW															
Pompes eau distillée refrigeration	2	13,4	26,8		0,9	0,89 0,51	24	12,2										
Pompe huile transfo	1	4,4	4,4		0,9	0,87 0,56	4	2,2										
Agitateurs	2	1,2	2,4		0,4	0,8 0,74	0,95	0,7										
Pompe eau de mer Refrigeration	1	43	43		0,8	0,9 0,49	35	17,2										
	6		76,6	36	0,84		64	42,3	1	43	0,57	0,167	0,45	2,7	1,2	77	46,2	90

JEUX DE BARRES 1MMa-1MMb

1MMa	6		76,6		0,84		64	42,3	1	43	0,57	0,167	0,45	2,7	1,2	77	46,2	90
1MMb	8		20		0,8		16,4	11,8	2	6	0,42	0,25	0,3	5,6	1,1	18	13	21
	14		96,6		0,93		80,4	54,1	1	43	0,44	0,071	0,35	4,9	1,1	100	60	115

JEU DE BARRES 12MR_d

MOTEURS	n nombre	PUISSANCE		P _{max} / P _{min}	R _{ij} / P _c	Cosφ / tgφ	P _i		n ₁	R _{L1}	P*	n ₁ / n	n _e *	n _e · n	K _M	P _p	Q _p	S _p	
		unitaire kW	totale kW				P _{mj}	Q _{mj}											K _u
Electro-agitateurs bac à chaux	2	0,736	1,47		0,9	0,77 0,83	1,3	1,1											
Pompes à chaux	2	0,736	1,47		0,2	0,77 0,83	0,29	0,2											
Electro-agitateur bac chlorure ferrique	1	0,38	0,38		0,9	0,75 0,88	0,34	0,3											
Pompes doseuses	2	0,25	0,5		0,4	0,73 0,93	0,2	0,18											
Electro-agitateur alumate de soude	1	0,38	0,38		0,9	0,75 0,88	0,34	0,3											
Pompes doseuses alumate de soude	2	0,25	0,5		0,3	0,73 0,93	0,15	0,14											
Pompes eau décarbotée	2	3	6		0,4	0,84 0,65	2,4	1,56											
Electro-agitateur phosphate - trisodique	1	0,38	0,38		0,9	0,75 0,88	0,34	0,3											
Pompe doseuse phosphate trisodique	1	0,25	0,25		0,4	0,73 0,93	0,1	0,9											
Pompe lavage	1	3	3		0,1	0,84 0,65	0,3	0,05											
Surpression air-lavage	1	3	3		0,1	0,84 0,65	0,3	0,05											
Cellules Ferpos	2	2	4		0,6	0,82 0,7	2,4	1,7											
Décanteur Accelérateur	1	27	27		0,1	0,89 0,51	2,7	1,6											
	19		483	108	0,23		11	8	1	27	0,56	0,526	0,95	18	15	165	12	21	

JEU DE BARRES 12 MP_{t.ext}

MOTEURS	n nombre	PUISSANCE		Σ P _{max} /P _{min}	COSφ/Tgφ		K _u . P _i		n ₁	P _{i1}	P*	n* m ₁ /n	ne*	*ne.n	K _M	P _p kW	Q _p kVAr	S _p kVA
		unitaire kW	totale kW		K _u P _{mj} /P _i	P _{mj} Q _{mj} Tgφ												
Epurateur à huile	1	22	22		0,1	0,89 0,51	2,2	1,1										
Dessiccateur deshuileur	1	18	18		0,6	0,89 0,51	10,8	5,5										
	2	-	40	1,22	0,32		12,8	6,6	2	40	1	1	0,9	1,8	1,7	21	7,8	22

JEU DE BARRES 12 MP_p

Redresseurs	3	23	69		0,2	0,89 0,51	13,8	6,9										
Transfo-Regulateur	1	5	5		0,4	0,85 0,62	2	1,24										
Transfo-Eclairage	1	100	100		0,7	0,9 0,49	70	36										
Extension éventuelle	1	13,4	13,4		0,2	0,89 0,51	2,6	1,32										
" "	1	8,7	8,7		0,2	0,87 0,57	1,7	0,97										
" "	1	13,4	13,4		0,2	0,89 0,51	2,6	1,32										
	8		209,5		0,44		93	48	1	100	0,48	0,125	0,42	3	1,9	177	92	220

JEU DE BARRES 12MP_e

MOTEURS	n nombre	PUISSANCE		m P _{max} /P _{min}	COSφ/Tgφ		P _{mj} / P _i	P _{mj} / P _i	P _{mj} / Tgφ	n ₁	P _{i1}	P*	n ₁ /n	n _e *	n _e *.n	K _M	P _p	Q _p	S _p	
		unitaire kW	totale kW		K _u	K _u														P _{mj}
Prise de courant	1	14	14		0,8	0,7 1,01	11,2	11,2												
Pompe eau de mer chloration	1	22	22		0,5	0,89 0,51	11	6,5												
Pompes lavage grilles	2	12	24		0,4	0,89 0,51	9,6	4,8												
Entraînements grilles	2	3,7	7,4		0,3	0,85 0,62	2,22	1,36												
Réchauffeur - évaporateur	1	13	13		0,5	0,89 0,51	6,5	2,8												
Portique - grille	1	5,9	5,9		0,4	0,87 0,57	2,4	1,4												
Monorail- chloration	1	3	3		0,4	0,84 0,65	1,2	0,8												
	9		89,3	7,3	0,48		44	29	5	73	0,815	0,556	0,85	7,65	1,6	71	40	82		

JEU DE BARRES 12MP_f

MOTEURS	n nombre	PUISSANCE		P _{max} /P _{min}	P _{mj} / P _i	cosφ / Tgφ		P _i K _u · P _{mj}	Tgφ Q _{mj} · Tgφ	n ₁	P _{i1}	P*	n* n ₁ / n	ne*	ne* n	KM	P _p KW	Q _p KVAR	S _p KVA
		unitaire kw	totale kw																
Pompes transfos fuel - lourd	2	42	84		0,4	0,9	0,4	33,6	13										
Pompe transfert fuel domestique	1	6,2	6,2		0,2	0,88	0,53	1,24	0,658										
Pompe décantation fuel	1	2,9	2,9		0,2	0,83	0,5	0,58	0,29										
Pompe reprise égouteur	1	3,63	3,63		0,2	0,84	0,6	0,7	0,436										
Extensions eventuelles	1	12	12		0,5	0,75	0,98	6	5,8										
" "	1	8	8		0,4	0,7	1	3,2	3,2										
" "	1	4	4		0,5	0,89	0,97	2	0,194										
" "	1	1,38	1,38		0,7	0,65	1,1	0,97	0,98										
	9		122,38		0,4			49	25	2	84	0,7	0,22	0,4	3,6	1,9	94	48	110

JEU DE BARRES 1MO

MOTEURS	n nombre	PUISSANCE		P_{max}/P_{min}	$K_u P_{mj} / P_i$	$\cos\phi / Tg\phi$		$P_{mj} K_u \cdot P_i$	$P_{mj} \cdot Tg\phi$	n_1	P_{i1}	P^*	$n^* n_1 / n$	ne^*	$ne n_c^* \cdot n$	K_M	P_p kW	Q_p kVA _v	S_p kVA
		Unitaire kW	totale kW																
Vannes by-pass desurchauffeurs	2	0,995	1,990		0,2	0,77	0,82	0,398	0,326										
Vannes purges et Pompes injections	4	1,100	4,400		0,6	0,79	0,87	2,640	2,300										
Vannes vapeur presurchauffeur d'air	2	0,37	0,74		0,15	0,75	0,88	0,148	0,131										
Pompes graissage pompes alimentaires	3	1,550	3,65		0,1	0,8	0,74	0,365	0,27										
Chauffage pompes alimentaires	3	2,79	8,37		0,3	0,84	0,6	2,511	1,580										
Agitateurs réactifs	2	1,78	2,56		0,9	0,82	0,69	2,300	1,586										
Pompe fuel lourd	1	76,5	76,5		0,1	0,92	0,42	7,65	3,2										
Pompe fuel domestique	1	93,5	93,5		0,2	0,92	0,42	18,7	7,85										
Chauffage moteurs ventilation	2	4	8		0,3	0,4	2,23	2,4	5,28										
Transfo Detecteur- flamme	1	8	8		0,2	0,7	1	1,6	1,6										
Armoire ramonage	1	2,4	2,4		0,4	0,6	1,33	0,96	1,275										
Pompe reprise égouteur	1	2,8	2,8		0,4	0,7	1	1,12	1,12										
Allumages brûleurs	3	0,92	2,76		0,1	0,5	1,73	0,3	0,519										
	25		215,68		0,17			30,656	27,037	2	170	0,79	0,08	0,12	3	2,7	83	29,6	88

JEU DE BARRES 1MM

MOTEURS	n nombre	PUISSANCE		n P _{max} /P _{min}	K _u P _{mj} / P _i	COSφ / Tgφ	K _u P _i	P _{mj} · Tgφ	n ₁	P _{i1}	P*	n* n ₁ / n	ne*	ne n _c * n	K _M	P _P kW	Q _P kVAr	S _P kVA
		Unitaire kW	totale kW															
Vannes soutirage	6	1,100	6,600		0,1	0,79 0,87	0,66	0,575										
Pompe auxiliaire Graissage	1	27,2	27,2		0,8	0,9 0,4	21,81	8,7										
Pompes alimentaires distillateurs	2	3,78	7,56		0,3	0,85 0,6	2,168	1,3										
Pompes alimentaires transfo-vapeur	2	10,3	20,6		0,3	0,89 0,5	6,18	3,1										
Pompe eau distillée remplissage chaudière	1	6,1	6,1		0,8	0,88 0,53	4,880	2,580										
Pompe à vide	1	91,1	91		0,9	0,92 0,42	82	34,4										
Ventilation caisse à huile	1	3,1	3,1		0,5	0,84 0,6	1,55	0,93										
Vireur N°11 PV	1	12	12		0,3	0,7 1	3,6	3,6										
Vireur N°12 GV	2	9,35	18,7		0,4	0,9 0,4	8,48	3,39										
Pompe eau distillée	1	1,904	1,904		0,6	0,9 0,4	1,14	0,46										
	18		204,86		0,65		132,47	59	1	91	0,48	0,0555	0,4	7,2	1,3	172	65	184

JEU DE BARRES 12MP_i int.

MOTEURS	n nombre	PUISSANCE		Σ P _{max} / P _{min}	K _u P _{mj} / P _i	COSφ / Tgφ		K _u P _i P _{mj} Tgφ	n ₁	P _{i1}	P*	n* n ₁ / n	ne*	ne*. n	K _M	P _p kW	Q _p kVAR	S _p kVA	
		unitaire kW	totale kW																
Epurateur à huile	1	13	13		0,2	0,89	0,51	2,6	1,33										
Dessiccateur déshuileur	1	8,7	8,7		0,9	0,87	0,57	7,8	4										
Palan électrique	1	0,736	0,74		0,1	0,8	0,74	0,07	0,005										
Compresseur air chantier	1	4,2	4,2		0,5	0,84	0,65	2,1	1,36										
Pompes récupération	2	3,1	6,2		0,2	0,84	0,65	1,24	0,8										
Pompe transfert	1	2,2	2,2		0,2	0,83	0,67	0,44	0,29										
Conditionnement d'air	1	20,5	20,5		0,6	0,89	0,51	12,3	6,3										
Ventilations locales batteries	2	1	2		0,9	0,80	0,74	1,8	1,3										
Pompe eau de mer	1	42,7	42,7		0,1	0,9	0,49	4,3	2,1										
Pompe circulation	1	61	61		0,2	0,9	0,49	12	5,9										
Pompe incendie	1	7,4	7,4		0,2	0,89	0,51	1,48	0,76										
Compresseur incendie	1	6,1	6,1		0,3	0,87	0,57	1,8	1,2										
Ascenseurs	2	17,8	35,6		0,5	0,89	0,51	18,8	9,6										
	16		210,3		0,32			67	35	2	103,7	0,485	0,125	0,45	7,2	1,5	100	38,5	106

JEU DE BARRES 1GA X

MOTEURS	n nombre	PUISSANCE		$\Sigma P_{max}/P_{min}$	$K_{P_{m_j}}/P_i$	$\cos\phi/Tg\phi$		$K_u \cdot P_i$		n_1	P_{i_1}	P^*	n_1/n	ne^*	$n_e^* \cdot n$	K_M	P_p	Q_p	S_p	
		unitaire kW	totale kW					P_{m_j}	Q_{m_j}											kW
Pompes alimentaires	2	708	1416		0,9	0,92	0,41	1270	508											
Pompe d'extraction	1	486	486		0,9	0,92	0,41	437	188											
Ventilateur	1	165	165		0,9	0,92	0,41	149	61											
	4		2070		0,9			1856	857	3	1900	0,91	0,75	0,9	3,6	1,1	2040	960	2250	

JEU DE BARRES 12GB

MOTEURS	n nombre	PUISSANCE		$\Sigma P_{max}/P_{min}$	$K_{P_{m_j}}/P_i$	$\cos\phi/Tg\phi$		$K_u \cdot P_i$		n_1	P_{i_1}	P^*	n_1/n	ne^*	$n_e^* \cdot n$	K_M	P_p	Q_p	S_p	
		unitaire kW	totale kW					P_{m_j}	Q_{m_j}											kW
Compresseurs	2	111	222		0,85	0,9	0,41	190	76											
Surpresseur	1	111	111		0,4	0,9	0,41	44	17,6											
	3		333		0,7			234	93,6	3	340	1	1	0,95	2,85	1,3	305	104	320	

JEU DE BARRES J_I

MOTEURS	n nombre	PUISSANCE		P _{max} /P _{min}	P _{mj} /P _i	COSφ/Tgφ	P _{mj} / K _u · P _i	P _{mj} · Tgφ	n ₁	P _{i1}	P*	n ₁ /n	ne*	ne* · n	K _M	P _p kW	Q _p kVA _v	S _p kVA
		unitaire kW	totale kW															
12 MPi.int	16		210		0,32		67	35	2	104	0,49	0,125	0,45	7,2	1,5	100	38,5	106
1 MM _a	14		96,6		0,93		90,4	54,1	1	43	0,44	0,071	0,35	4,9	1,1	100	60	120
1 MM _b	14		96,6		0,93		90,4	54,1	1	43	0,44	0,071	0,35	4,9	1,1	100	60	120
12 MPi ext	2		40		0,32		12,8	6,6	2	40	1	1	0,9	1,8	1,7	21	7,2	22
12 MP _p	8		210		0,44		93	48	1	100	0,48	0,125	0,42	3	1,9	177	92	220
12 MP _e	9		89,3		0,48		44	29	5	73	0,815	0,556	0,85	7,65	1,6	71	40	83
12 MP _f	9		123		0,4		49	25	2	84	0,7	0,22	0,4	3,6	1,9	94	48	110
12 MP _{ia}	19		48,33		0,23		11	8	1	27	0,56	0,526	0,95	18	1,5	16,5	12	21
	91		721		0,37		273	140	2	161	0,176	0,022	0,22	20	1,2	330	168	370

JEUX de BARRES 1GA-12GB

MOTEURS	n nombre	PUISSANCE		$\frac{P_{max}}{P_{min}}$	$\frac{P_{Rj}}{P_c}$	$\cos\phi / \text{Tg}\phi$	$\frac{K_u \cdot P_i}{P_{mj}}$	$\frac{P_{mj} \cdot \text{Tg}\phi}{Q_{mj}}$	n_1	P_{i1}	P^*	$\frac{n_1/n}{n^*}$	ne^*	$\frac{n^* \cdot n}{ne}$	K_M	P_p kW	Q_p kVA _r	S_p kVA
		Unitaire kW	Totale kW															
1GA	61		2588		0,82		2110	997	3	1900	0,73	0,05	0,1	6,1	1,1	2350	1100	2600
12 GB	94		1054		0,48		507	234	4	440	0,42	0,043	0,2	18,8	1,2	740	308	850
	155		3642		0,71		2617	1231	3	1900	0,52	0,0195	0,6	93	1,15	3000	1231	3300

JEUX de BARRES 12GB-JI

MOTEURS	n nombre	PUISSANCE		$\frac{P_{max}}{P_{min}}$	$\frac{P_{Rj}}{P_c}$	$\cos\phi / \text{Tg}\phi$	$\frac{K_u \cdot P_i}{P_{mj}}$	$\frac{P_{mj} \cdot \text{Tg}\phi}{Q_{mj}}$	n_1	P_{i1}	P^*	$\frac{n_1/n}{n^*}$	ne^*	$\frac{n^* \cdot n}{ne}$	K_M	P_p	Q_p	S_p
		Unitaire kW	Totale kW															
J _I	91		721		0,37		273	140	2	161	0,176	0,022	0,22	20	1,2	330	168	370
12 GB	3		333		0,7		234	93,6	3	330	1	1	0,95	2,835	1,3	305	104	320
	94		1054		0,48		507	233,6	4	440	0,42	0,043	0,2	18,8	1,25	640	234	680

JEUX DE BARRES (1MMa-1MMb 1MM-1MO) J_{II}

MOTEURS	n nombre	PUISSANCE		m P _{max} / P _{min}	P _{mj} / P _i	COSφ / Tgφ	K _u P _i	P _{mj} Tgφ	n ₁	P _{i1}	p*	n ₁ / n	ne*	n [*] ·n	KM	P _p	Q _p	S _p
		unitaire kW	totale kW															
1MMa-1MMb	14		96,6		0,93		90,4	54,1	1	43	0,44	0,071	0,35	4,9	1,1	100	60	120
1MM	18		205		0,65		133	59	1	91	0,48	0,0555	0,4	7,2	1,3	172	65	184
1MO	25		216		0,17		31	27	2	170	0,79	0,08	0,12	3	2,7	83	29,6	88
	57		518		0,5		254,4	140,1	2	170	0,33	0,035	0,25	14,3	1,25	320	140	360

JEUX DE BARRES 1GA-J_{II}

MOTEURS	n nombre	PUISSANCE		m P _{max} / P _{min}	P _{mj} / P _i	COSφ / Tgφ	K _u P _i	P _{mj} Tgφ	n ₁	P _{i1}	p*	n ₁ / n	ne*	n [*] ·n	KM	P _p	Q _p	S _p
		unitaire kW	totale kW															
1GA	4		2070		0,9		1856	857	3	1900	0,91	0,75	1,9	7,6	1,1	2040	960	2250
J _{II}	57		518		0,5		254,4	140	2	170	0,33	0,035	0,25	14,3	1,25	320	140	400
	61		2588		0,82		2110,4	997	3	1900	0,73	0,05	0,1	6,1	1,1	2350	1100	2600

Puissances appelées par les différents jeux de barres

Jeux de barres	Puissances appelées kVA	Courant appelé A
1GA = 2GA 12GB	3300	350 (5,5kV)
1MO = 2MO 1MM = 2MM	360	38 (5,5kV) 550 (0,38 kV)
1MMa=2MMb	115	175
12MPia	21	32
12MPi(ext,int)	370	39 (5,5 kV) 570 (0,38kV)
12MPia	21	32
12MPp	330	330
12MPe	82	125
12MPf	110	170

Tableau : I

III - VII ALCUL des SECTIONS des CABLES

L'intensité admissible limite définie en fonction des éléments constitutifs du câble se trouve très affectée après sa pose par :

- le type de pose à l'air libre, sous conduit, enterré..
- le nombre de câbles juxtaposés, les pertes joules propres à un câble influent sur la température de ceux qui l'avoisinent.

On ne saurait donc définir à priori une densité de courant avant la pose du câble.

Il faut que le courant nominal de chaque câble soit inférieur au courant admis par ce câble.

Pour ceci, on choisit une courbe donnant les courants admissibles en fonction des sections pour des câbles en cuivre enterrés à 80 cm dans un sol moyen (Courbe 6).

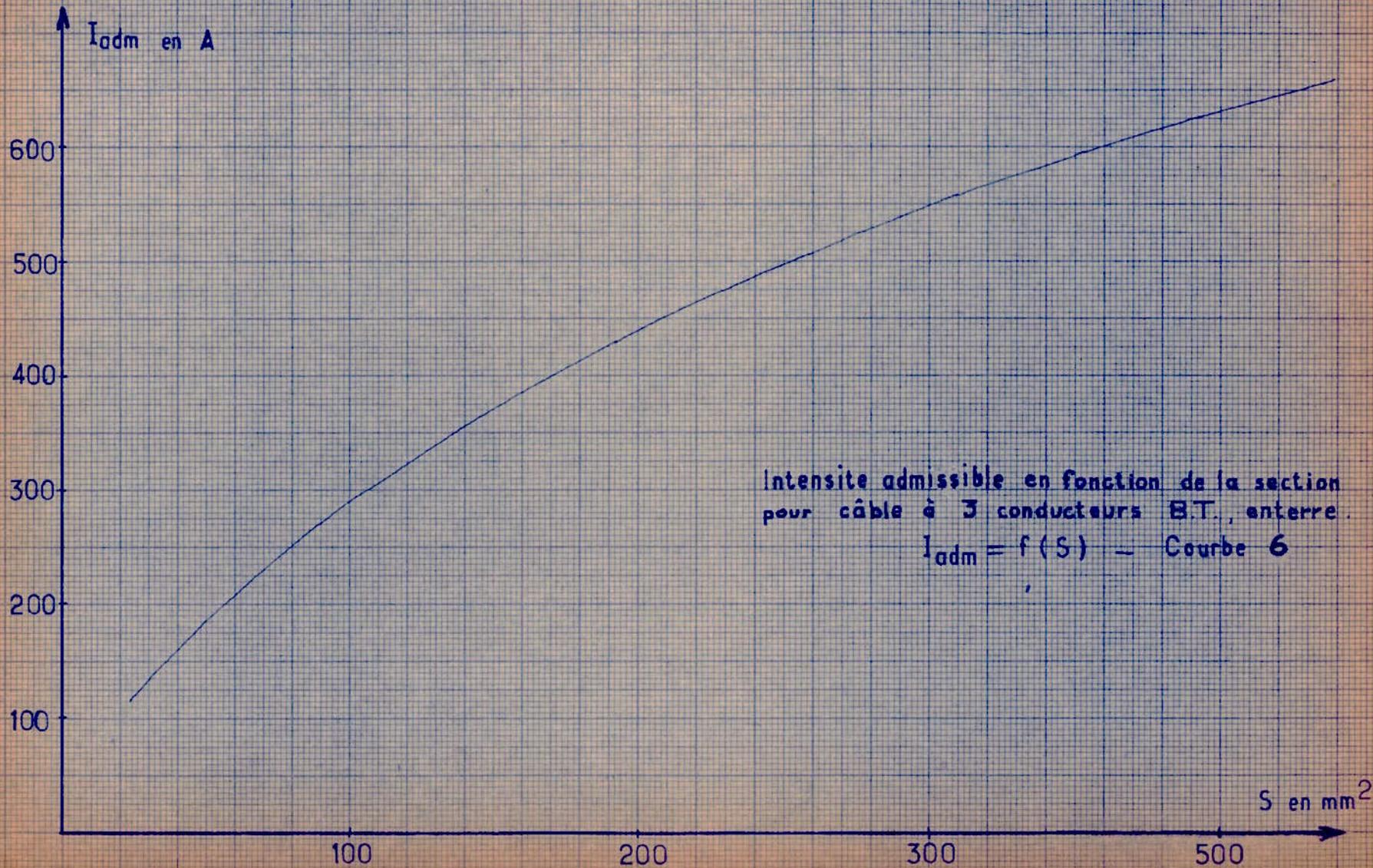
Chaque courant nominal donc nous détermine une section S_n .

On choisit une section définitive normalisée immédiatement supérieure à S_n dont voici le tableau I donnant les valeurs des sections normalisées :

Sections normalisées S_n en mm^2	1,5	2	4	6	10	16	25	35	50	70	95
	120	150	185	240	310	400	500	625	800	1000	

Tableau 2

De plus, il y a lieu d'affecter le courant admissible I_{ad} d'un coefficient de réduction dans le cas où notre câble se trouverait juxtaposé à d'autres.



Intensite admissible en fonction de la section
pour câble à 3 conducteurs B.T., enterre.

$$I_{adm} = f(S) - \text{Courbe 6}$$

Le tableau ci-dessous donne les valeurs des coefficients de réduction. K_I

nbre de cables dans une tranchée	K_I
2	0,9
4	0,8
6	0,7
8	0,6

Un second coefficient de réduction K_2 dû à la température du milieu ambiant du cable est à prendre en considération. L'intensité admissible est donnée pour une température du milieu ambiant de 40 °C.

T °C milieu ambiant	K_2	T °C milieu ambiant	K_2
30	I,II	45	0,94
35	I,06	50	0,87
40	I		

IV - CALCUL des COURANTS NOMINAUX

La détermination des courants appelés par chaque moteur ou consommateur est indispensable pour le choix des sections des conducteurs en régime de fonctionnement normal. Pour les moteurs connaissant leur puissance installée, on calculera le courant de pointe I_p de chacun d'entre eux par :

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} U_n \eta} \quad \text{ou} \quad P_p = S_p \cdot \cos \phi$$

Le facteur de puissance et le rendement nécessaires au calcul de ce courant sont donnés par le tableau 2- suivant :

Puissance du moteur en CV	Rendement η	Facteur de puissance $\cos \phi$
0,5	0,74	0,75
0,75	0,76	0,77
1	0,78	0,80
2	0,81	0,83
3	0,82	0,83
4	0,83	0,84
5	0,85	0,85
6	0,86	0,87
7	0,86	0,87
8	0,87	0,87
9	0,87	0,87

Tableau : 3

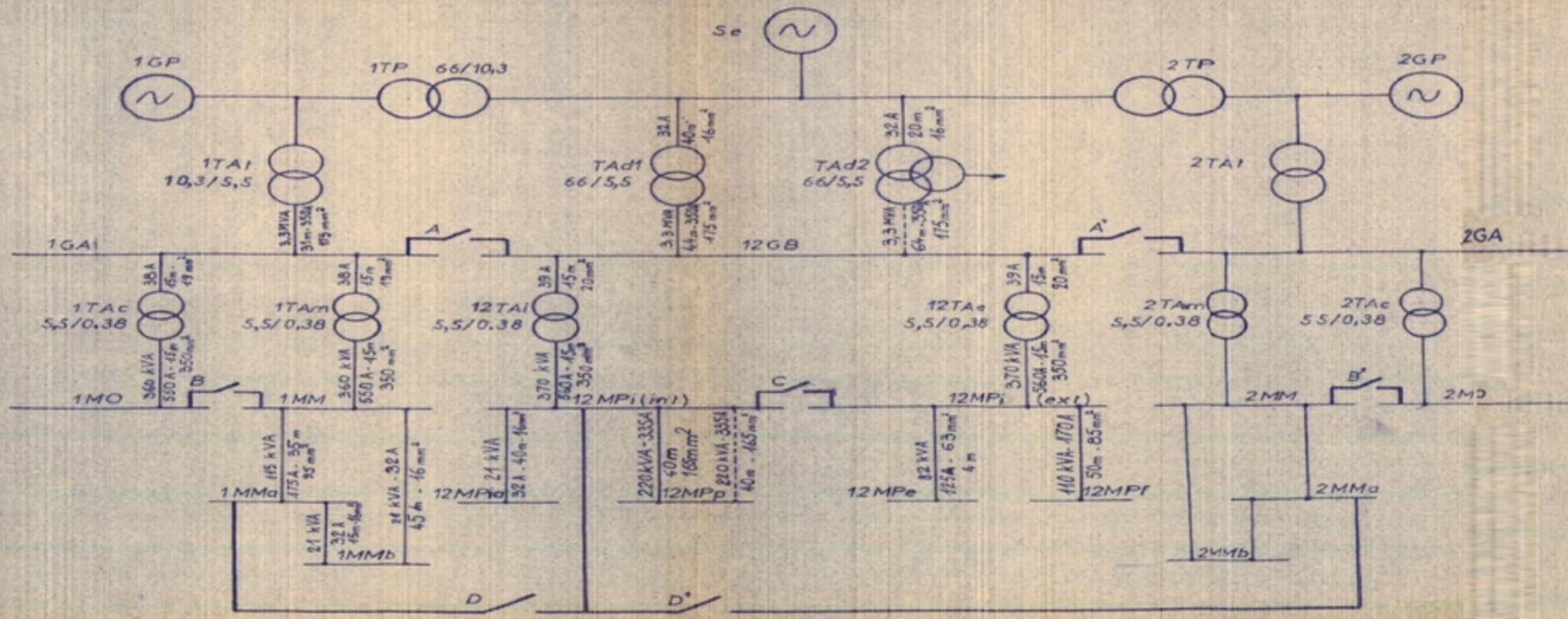
Pour les moteurs de puissance supérieure à 10 CV on prendra

$$\eta = 0,88 \quad \text{et} \quad \cos \phi = 0,89$$

Au delà de 50 CV $\eta = 0,92$ et $\cos \phi = 0,9$

Le tableau 4. suivant regroupe les valeurs des courants nominaux au niveau de chaque jeu de barres.

SCHEMA DES CARACTERISTIQUES DES CONDUCTEURS - 2 -



Les sections ainsi définies doivent être vérifiées aux :

1 - Courants de Court-circuit (ces sections doivent supporter les chocs thermiques provoqués par un court-circuit brusque).

2 - Chute de tension : il faut que la chute de tension le long du câble soit acceptable :

$$\Delta U < 3 \% \quad \text{en BT (Basse tension)}$$

$$\Delta U < 5 \% \quad \text{en MT (Moyenne tension)}$$

3 - Effet couronne . Il faut que les pertes d'énergie occasionnées par cet effet soient acceptables.

Toutefois dans notre cas , ce calcul est inutile puisqu'il s'agit de M et BT et de câble isolé. L'effet couronne est pratiquement nul.

La vérification à la chute de tension semble également inutile du fait qu'il s'agit uniquement de câbles très courts (quelques mètres). Ce calcul sera tout de même fait.

La vérification aux courants de court-circuit est nécessaire et ceci va nous amener à faire un exposé sur les différentes méthodes de calcul de courants de court-circuit.

V - LES COURANTS de COURT-CIRCUITS TRIPHASES

Les cas de court-circuits sont un peu variés et leur fréquence d'apparition suivant le cas n'est pas la même également. Il existe : - le court-circuit monophasé dans une proportion d'environ 65 % (Ph.T)

- le court-circuit biphasé (2 Ph) avec à peu près 30 % des cas dont 20 % biphasé avec neutre (2 Ph.T)

- quant au court-circuit triphasé (3 Ph) avec ou sans mise à la terre, statistiquement moins fréquents d'environ 5 %

On se basera sur le calcul du courant de court-circuit triphasé symétrique pour la vérification de notre installation que nous supposerons avec neutre isolé.

Si nous disposons d'un système avec le neutre isolé, il est suffisant de calculer le courant de déclenchement correspondant au court-circuit triphasé car celui correspondant aux autres cas de court-circuits sera toujours plus petit.

Dans le cas des installations électriques avec le neutre mis directement à la terre, on peut toujours calculer le traitement du neutre pour obtenir un courant de court-circuit non symétrique plus petit sinon ce calcul doit être effectué car il deviendrait le régime défavorable.

Dans la majorité des cas, les phénomènes transitoires dus aux court-circuits ont un caractère complexe dépendant de la structure du système électromagnétique et l'étude exacte étant un peu délicate, on utilise diverses hypothèses simplificatrices qui permettent la détermination des paramètres avec des erreurs admissibles.

La valeur du courant de court-circuit dépend du circuit jusqu'au lieu de défaut ou distance électrique. Du côté du consommateur raccordé après le lieu du court-circuit, son influence reste réduite et il se trouvera sans tension. Cependant certains à cause de l'énergie qui leur reste, débitent de l'énergie vers le lieu de C₁C₁ (court-circuit). Mais cette influence se ressent seulement pour le cas des consommateurs de grande puissance (plus de 1000 KVA) situés près du défaut.

Dans nos calculs afin de réduire le volume de travail, on utilise les considérations simplificatrices suivantes :

- les circuits magnétiques sont non saturés ce qui donnent des schémas linéaires.
- les courants de magnétisation des transformateurs sont négligés.
- on néglige les résistances d'où l'on obtient un déphasage de $\varphi_k = \frac{\text{II}}{2}$ entre la tension et le courant et permet l'addition arithmétique des courants tel en continu etc...

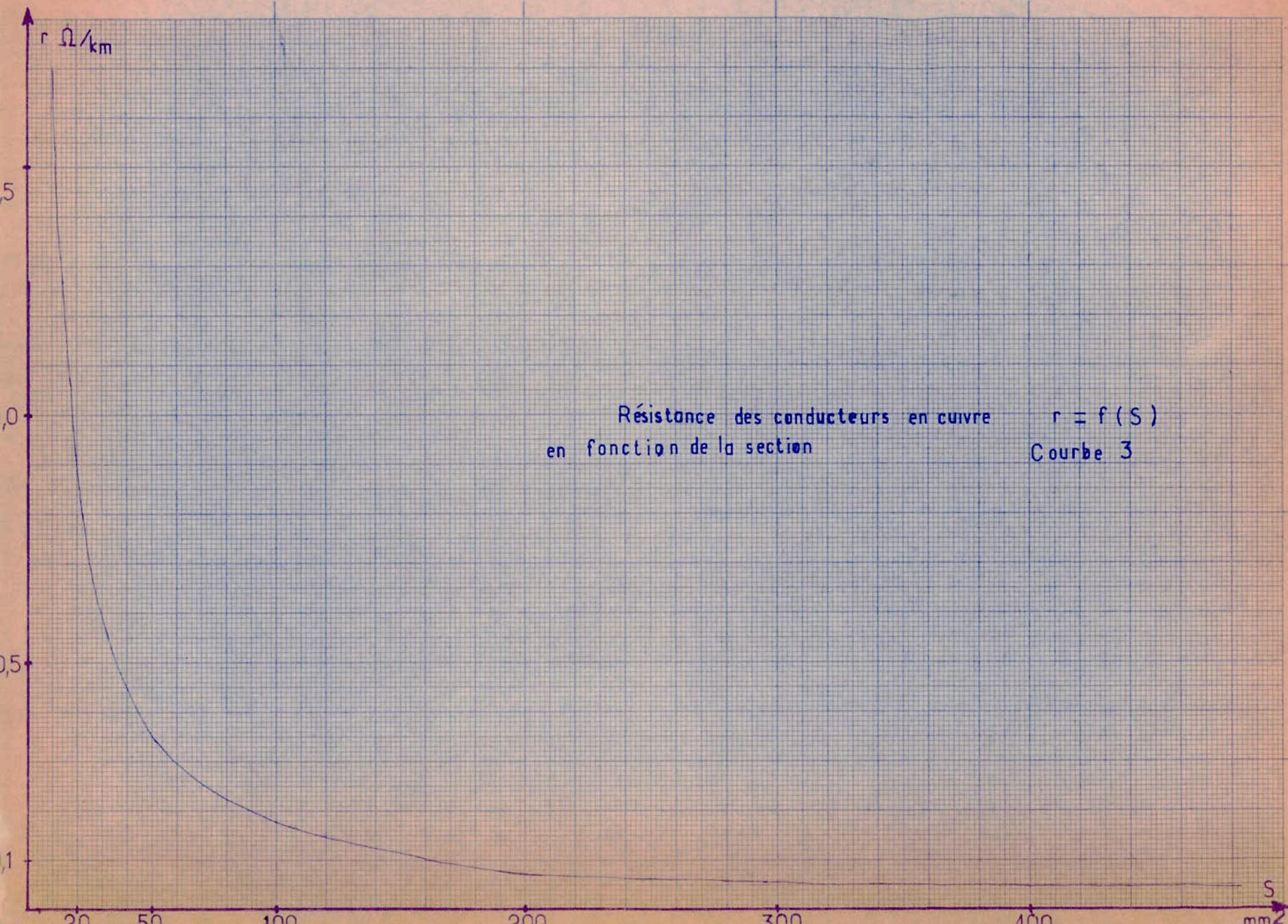
Mais pour les lignes aériennes et câbles, on ne peut négliger leurs résistances et on admet $\varphi_k \approx 60^\circ$ pour les lignes aériennes et $\varphi_k \approx 30^\circ$ pour les câbles.

Pour cela, on dispose de courbes donnant les résistances et réactances de câbles en fonction des différentes caractéristiques (tension et section): (Courbes $R = f(S)$ et $X = f(S)$ pour différentes tensions, courbes 3 et 4)

A l'aide du schéma général comprenant tous les éléments nécessaires de notre installation, on peut calculer les impédances de tous les circuits d'où le tableau (5) et le schéma équivalent en impédances (3).

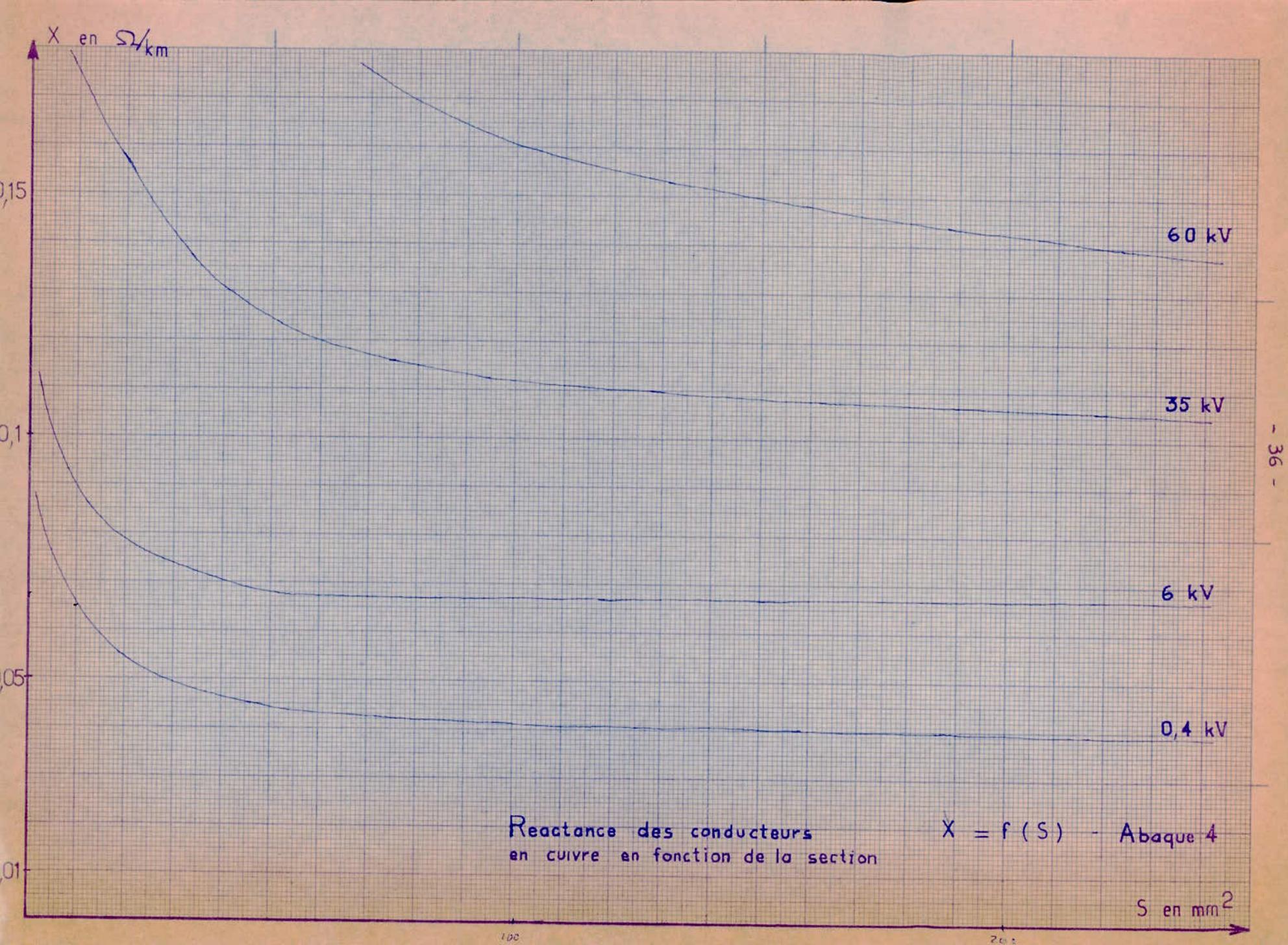
$$Z = \sqrt{r^2 + x^2} \cdot l$$

avec $\left\{ \begin{array}{l} r \text{ et } x \text{ sont respectivement les} \\ \text{résistances et réactances linéiques} \\ l = \text{longueur approximative du} \\ \text{conducteur} \end{array} \right.$



Résistance des conducteurs en cuivre
en fonction de la section

$r = f(S)$
Courbe 3



----- - DETERMINATION des REACTANCES -----

Tension kV	Section mm ²	r Ω/km	x Ω/km	Longueur m	R Ω	X Ω	Z Ω
0,38	16	1,1	0,09	15	0,017	0,0014	# 0,017
"	"	"	"	45	0,05	0,004	# 0,05
"	70	0,25	0,065	4	0,001	0,00026	# 0,001
"	95	0,19	0,06	35	0,0066	0,0021	0,007
"	"	"	"	50	0,0095	0,003	0,01
"	185	0,09	0,058	40	0,0036	0,0023	0,0043
"	400	0,07	0,055	15	0,00105	0,00083	0,0012
5,5	25	0,7	0,085	15	0,00105	0,0013	0,01
"	185	0,09	0,065	31	0,0028	0,002	0,0035
"	"	"	"	44	0,004	0,0029	0,0053
"	"	"	"	64	0,0058	0,0041	0,0077

Tableau : 5

-VI- /Z-I GRANDEURS REDUITES

L'utilisation des grandeurs réduites dans le calcul d'installations est bien commode et conduit à la simplicité de ces calculs, système très utilisé dans les circuits d'installations électriques.

La grandeur réduite d'une grandeur physique est un nombre qui s'obtient en divisant cette grandeur par une autre de même nature choisie comme valeur de mesure et nommée valeur de base. Une valeur réduite est sans dimension.

Il nous faut choisir pour cela des grandeurs de base et on dispose de 4 grandeurs habituellement utilisées S, U, I, Z dont 2 grandeurs de base à choisir S_b et U_b, les 2 autres en dérivent :

$$S_b : U_b ; I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} U_b} ; Z_b = \frac{U_b}{\sqrt{3} I_b} = \frac{U_b^2}{S_b}$$

Les grandeurs réduites de base sont :

$$S_b^+ = \frac{S}{S_b} \quad U_b^+ = \frac{U}{U_b} \quad E_b^+ = \frac{E}{U_b} \quad I_b^+ = \frac{I}{I_b} \quad Z_b^+ = \frac{Z}{Z_b} = Z \cdot \frac{S_b}{U_b^2}$$

En négligeant les résistances, on utilise les formules donnant la réactance :

$$X_b^+ = \frac{X}{X_b} = X \cdot \frac{S_b}{U_b^2}$$

Généralement, on donne les grandeurs nominales en prenant comme grandeurs de base les valeurs nominales S_n et U_n

Le passage d'une grandeur réduite à une autre correspondant respectivement à des grandeurs de base différentes se fait ainsi:

$$S_{b1}^+ = \frac{S}{S_{b1}} \quad \text{et} \quad S_{b2}^+ = \frac{S}{S_{b2}} \quad \Rightarrow \quad S = S_{b1}^+ \cdot S_{b1} = S_{b2}^+ \cdot S_{b2}$$

donc

$$S_{b2}^+ = S_{b1}^+ \cdot \frac{S_{b1}}{S_{b2}} \quad U_{b2}^+ = U_{b1}^+ \cdot \frac{U_{b1}}{U_{b2}} \quad I_{b2}^+ = I_{b1}^+ \cdot \frac{I_{b1}}{I_{b2}}$$

$$Z_{b2}^+ = Z_{b1}^+ \cdot \frac{Z_{b1}}{Z_{b2}} = Z_{b1}^+ \cdot \frac{U_{b1}^2 \cdot S_{b2}}{U_{b2}^2 \cdot S_{b1}}$$

Dans le cas où la tension de base est égale à la tension nominale, on aura :

$$Z_b^+ = Z_n^+ \cdot \frac{S_b}{S_n}$$

- En ce qui concerne les générateurs on connaîtra les réactances Surtransitoires Directes : $X_{dn}^{''+}$

d'où $X_{dn}^{''+} = X_{dn}^{''+} \frac{S_b}{S_n}$ $X_{dn}^{''+}$ est en pourcentage donc

$$X_{dn}^{''+\%} = 100 \cdot X_{dn}^{''+}$$

- Pour les transformateurs , la tension de court-circuit

$u_{cc} \%$ est donnée :

$$u_{cc} \% = 100 \cdot \frac{\sqrt{3} I_n Z_{cc}}{U_n} = 100 \cdot \frac{S_n Z_{cc}}{U_n^2} \implies X_{cc} \# Z_{cc} = \frac{u_{cc} \% U_n^2}{100 S_n}$$

On a négligé les résistances des transformateurs

$$Z_{cc} \# X_{cc}$$

- les Réactances des conducteurs sont connues, on calculera les grandeurs réduites respectives par les formules ci-dessus

- Dans le cas d'un système de grande puissance, cas du système électro-énergétique très influant dans notre installation

$X_{sb}^+ = \frac{S_b}{S_{scc}}$ avec S_{scc} la puissance de Court-circuit du système énergétique qui nous a été fournie par les services de la SONEGAS .

On obtient donc la transfiguration du schéma unifilaire en valeurs réduites des différentes réactances. (schéma 4)

VII - // - CALCUL des VALEURS REDUITES des REACTANCES

Puissance de base : $S_b = 1000 \text{ MVA}$

Puissance apparente des générateurs : $S_n = 75 \text{ MVA}$

Tensions de base : $U_{bI} = 10,3 \text{ kV}$; $U_{bII} = 60 \text{ kV}$

$U_{bIII} = 5,5 \text{ kV}$; $U_{bIV} = 0,380 \text{ kV}$

Courants de base : $I_{bI} = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot U_{bI}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,3} = 56 \text{ kA}$; $I_{bII} = 9,6 \text{ kA}$

$I_{bIII} = 105 \text{ kA}$; $I_{bIV} = 1515 \text{ kA}$

Réactances réduites :

- Générateurs: $X_{bGI}^+ = X_{bG2}^+ = X_{nG}^+ \cdot \frac{S_b}{S_{nG}} = 0,198 \cdot \frac{1000}{75}$

car $X_{nG}^+ = 19,8 \%$; $X_{nG}^+ = 0,198$ donc $X_{GI}^+ = X_{G2}^+ = \underline{\underline{2,64}}$

- Transformateurs principaux : $X_{btr}^+ = X_{ntr}^+ \cdot \frac{S_b}{S_{ntr}}$

$X_n^+(ITP) = X_n^+(2TP) = 0,097$ donc $X_{ITP}^+ = X_{2TP}^+ = \underline{\underline{1,3}}$

- Transformateurs auxiliaires :

a) - $X_n^+(ITAt) = X_n^+(2TAt) = X_n^+(TAAdI) = 0,0757$

$S_n(ITAt) = S_n(2TAt) = S_n(TAAdI) = 5,5 \text{ MVA}$

d'où $X_{ITAt}^+ = X_{2TAt}^+ = X_{TAAdI}^+ = 0,0757 \cdot \frac{1000}{5,5} = \underline{\underline{13,7}}$

b) - $X_n^+(TAAd2) = 0,204$; $S_n(TAAd2) = 11 \text{ MVA}$

$\Rightarrow X_{TAAd2}^+ = 0,204 \cdot \frac{1000}{11} = \underline{\underline{18,5}}$

c) - $X_n^+(ITAc), (2TAc), (ITAm), (2TAm), (I2TAi), (I2TAe) = 0,045$

$S_n = 0,4 \text{ MVA}$

$X_{(\text{des } 6 \text{ transfos})}^+ = \underline{\underline{112,5}}$

- Système électro-énergétique :

$S_{scc} = 250 \text{ MVA}$; $X_s^+ = \frac{1000}{250} = \underline{\underline{2,5}}$

- Conducteurs :

$$X_b^+ = X_n^+ \cdot \frac{S_b}{U_b^2}$$

a) $U_b = 60 \text{ kV}$

$$X_3^+ = 0,014$$

$$X_4^+ = 0,0062$$

b) $U_b = 5,5 \text{ kV}$

$$X_5^+ = X_8^+ = 0,133$$

$$X_7^+ = 0,257$$

$$X_6^+ = 0,197$$

$$X_9^+ = X_{10}^+ = X_{11}^+ = X_{12}^+ = X_{13}^+ = X_{14}^+ = 5$$

c) $U_b = 0,380 \text{ kV}$

$$X_{15}^+ = X_{16}^+ = X_{17}^+ = X_{18}^+ = X_{19}^+ = X_{20}^+ = 9,7$$

$$X_{21}^+ = X_{28}^+ = 54 \quad ; \quad X_{22}^+ = X_{27}^+ = 347$$

$$X_{23}^+ = 306 \quad \cdot \quad X_{24}^+ = 34$$

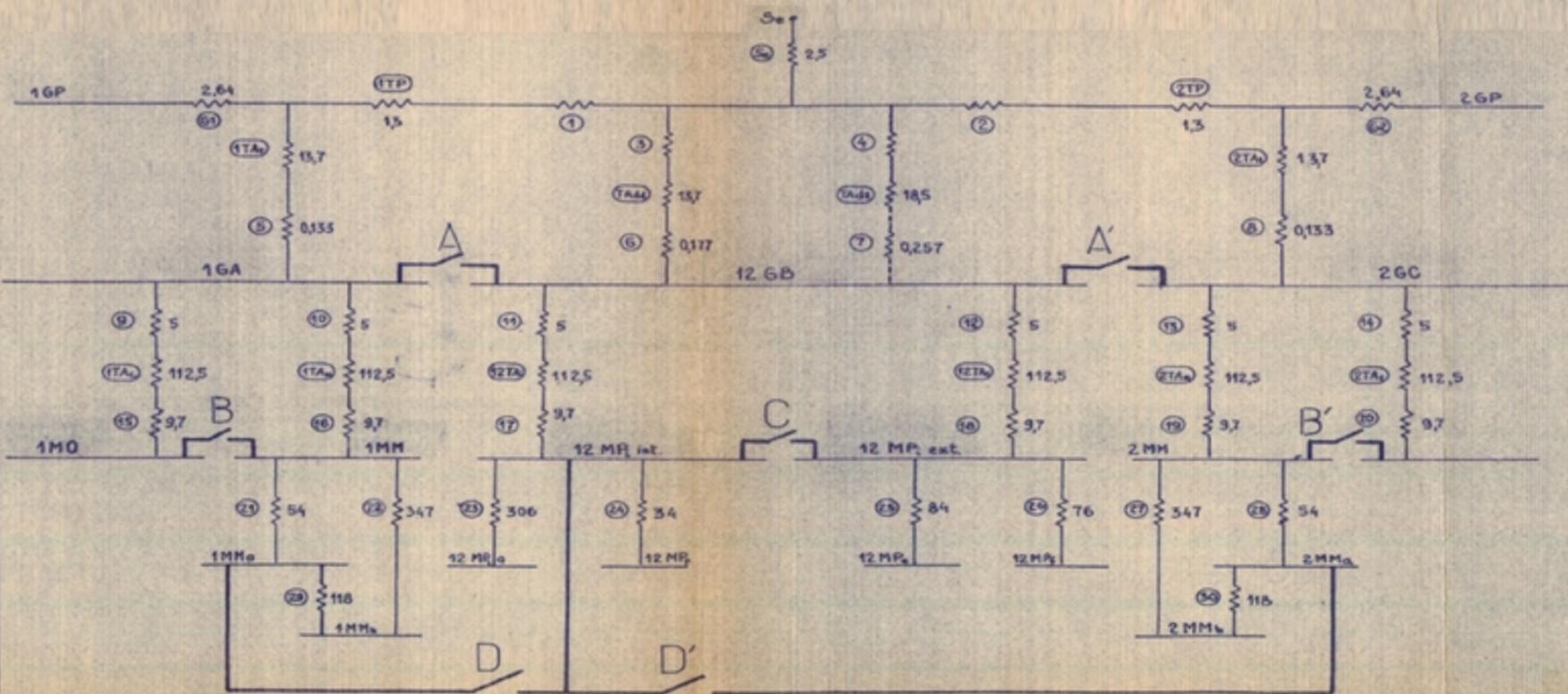
$$X_{25}^+ = 84 \quad ; \quad X_{26}^+ = 76$$

$$X_{29}^+ = X_{30}^+ = 118$$

- 45 -

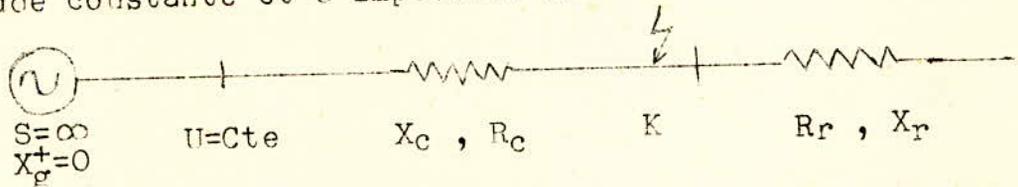
SCHEMA EN IMPEDANCES (4)

(En Grandeurs Réduites)



VIII II PRINCIPE de CALCUL du COURT-CIRCUIT TRIPHASE

On fera l'étude du court-circuit 3 ϕ (triphase) alimenté par une source de puissance infinie, de tension sinusoidale et amplitude constante et d'impédance nulle.



Les tensions et les courants pour les différentes phases s'écrivent:

$$\begin{cases} u_A = U_m \sin (wt + \alpha) \\ u_B = U_m \sin (wt + \alpha - \frac{2\Pi}{3}) \\ u_C = U_m \sin (wt + \alpha - \frac{4\Pi}{3}) \end{cases} \quad \begin{cases} i_A = I_m \sin (wt + \alpha - \phi) \\ i_B = I_m \sin (wt + \alpha - \phi - \frac{2\Pi}{3}) \\ i_C = I_m \sin (wt + \alpha - \phi - \frac{4\Pi}{3}) \end{cases}$$

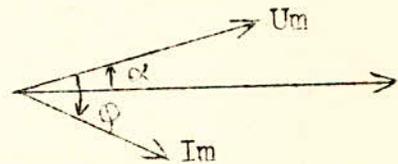
avec α = phase initiale de la tension

ϕ = déphasage entre courant et tension

Après l'apparition du défaut,

le système d'équations différentielles

descrivant le processus du court-circuit est :



$$u_A = r_K i_A + \frac{L}{dt} \frac{di_A}{dt} + \frac{M}{dt} \frac{di_B}{dt} + \frac{M}{dt} \frac{di_C}{dt}$$

$$u_B = r_K i_B + \frac{L}{dt} \frac{di_B}{dt} + \frac{M}{dt} \frac{di_C}{dt} + \frac{M}{dt} \frac{di_A}{dt}$$

$$u_C = r_K i_C + \frac{L}{dt} \frac{di_C}{dt} + \frac{M}{dt} \frac{di_A}{dt} + \frac{M}{dt} \frac{di_B}{dt}$$

mais le court-circuit étant symétrique :

$$i_A + i_B + i_C = 0$$

Ces 3 équations différentielles sont de la forme :

$$u = r_K i + L_K \frac{di}{dt} \quad \text{avec} \quad L_K = L - M$$

La solution de cette équation différentielle s'écrit :

$$i_K = I_{pm} \sin (wt + \alpha - \phi_K) + C e^{-t/\tau_a} = i_p + i_a$$

avec $I_{pm} = \frac{U_m}{Z_K}$ le courant périodique maximum

$$Z_K = \sqrt{r_K^2 + (L_{KW})^2} \quad \text{l'impédance du circuit}$$

$$\varphi_K = \text{arc tg } \frac{L_{KW}}{r_K} = \text{arc tg } \frac{X_K}{r_K} \quad \text{la résistance du circuit est habituellement négligeable par rapport à la réactance, la composante périodique du circuit est déphasée de } \varphi_K \neq \frac{\pi}{2}$$

$$T_a = \frac{L_K}{r_K} = \frac{X_K}{r_K} \quad \text{la constante de temps du circuit.}$$

Détermination de la constante d'intégration

On constate dans la forme générale du courant qu'il existe 2 composantes, l'une périodique I_p et l'autre apériodique I_a . A l'état initial $t = 0 \rightarrow C = i_{a0}$, les équations s'écrivent:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{KA} = I_{pm} \sin (wt + \alpha - \varphi_K) + i_{aA0} e^{-t/T_a} = i_{pA} + i_{aA} \\ i_{KB} = I_{pm} \sin (wt + \alpha - \varphi_K - \frac{2\pi}{3}) + i_{aB0} e^{-t/T_a} = i_{pB} + i_{aB} \\ i_{KC} = I_{pm} \sin (wt + \alpha - \varphi_K - \frac{4\pi}{3}) + i_{aC0} e^{-t/T_a} = i_{pC} + i_{aC} \end{array} \right.$$

Les circuits étant inductifs, au moment $t=0$, les courants ne peuvent varier brusquement et sont encore égaux aux courants en régime normal donc : $i_0 = i_{K0} = i_{p0} + i_{a0}$ où

$$i_{aA0} = i_{A0} - i_{pA0} = I_m \sin (\alpha - \varphi) - I_{pm} \sin (\alpha - \varphi_K)$$

$$i_{aB0} = i_{B0} - i_{pB0} = I_m \sin (\alpha - \varphi - \frac{2\pi}{3}) - I_{pm} \sin (\alpha - \varphi_K - \frac{2\pi}{3})$$

$$i_{aC0} = i_{C0} - i_{pC0} = I_m \sin (\alpha - \varphi - \frac{4\pi}{3}) - I_{pm} \sin (\alpha - \varphi_K - \frac{4\pi}{3})$$

On aboutit aux expressions générales du court-circuit triphasé /

$$\begin{cases} i_{kA} = I_{pm} \sin(\omega t + \alpha - \phi_K) + \left[I_m \sin(\alpha - \phi) - I_{pm} \sin(\alpha - \phi_K) \right] e^{-t/T_a} \\ i_{kB} = I_{pm} \sin(\omega t + \alpha - \phi_K - \frac{2\pi}{3}) + \left[I_m \sin(\alpha - \phi - \frac{2\pi}{3}) - I_{pm} \sin(\alpha - \phi_K - \frac{2\pi}{3}) \right] e^{-t/T_a} \\ i_{kC} = I_{pm} \sin(\omega t + \alpha - \phi_K - \frac{4\pi}{3}) + \left[I_m \sin(\alpha - \phi - \frac{4\pi}{3}) - I_{pm} \sin(\alpha - \phi_K - \frac{4\pi}{3}) \right] e^{-t/T_a} \end{cases}$$

Valeurs extrêmes du courant de court-circuit :

Il s'agit de résoudre le système que nous obtenons en annulant les dérivées partielles par rapport aux variables possibles et qui sont : t, α, ϕ . On considère la phase A :

$$\begin{cases} i_{kA} = I_{pm} \sin(\omega t + \alpha - \phi_K) + \left[I_m \sin(\alpha - \phi) - I_{pm} \sin(\alpha - \phi_K) \right] e^{-t/T_a} \\ a/ \frac{\partial i_{kA}}{\partial t} = \omega I_{pm} \cos(\omega t + \alpha - \phi_K) - \frac{I}{T_a} \left[I_m \sin(\alpha - \phi) - I_{pm} \sin(\alpha - \phi_K) \right] e^{-t/T_a} \\ b/ \frac{\partial i_{kA}}{\partial \alpha} = I_{pm} \cos(\omega t + \alpha - \phi_K) + \left[I_m \cos(\alpha - \phi) - I_{pm} \cos(\alpha - \phi_K) \right] e^{-t/T_a} \\ c/ \frac{\partial i_{kA}}{\partial \phi} = - I_m \cos(\alpha - \phi) e^{-t/T_a} = 0 \end{cases}$$

De l'équation c $\Rightarrow \cos(\alpha - \phi) = 0 \Rightarrow \alpha - \phi = \pm \frac{\pi}{2}$ que l'on remplace dans a et b, ce qui donne :

$$a \rightarrow I_{pm} \cos(\omega t + \alpha - \phi_K) = \frac{I}{\omega T_a} \left[\pm I_m - I_{pm} \sin(\alpha - \phi_K) \right] e^{-t/T_a}$$

$$b \rightarrow I_{pm} \cos(\omega t + \alpha - \phi_K) = I_{pm} \cos(\alpha - \phi_K) e^{-t/T_a}$$

Les premiers membres de ces 2 équations sont égaux, les seconds également, donc en identifiant et après simplifications, on a :

$$\frac{I}{\omega T_a} \left[\pm I_m - I_{pm} \sin(\alpha - \phi_K) \right] = I_{pm} \cos(\alpha - \phi_K)$$

$$\text{ou } \omega T_a = \frac{\pm I_m - I_{pm} \sin(\alpha - \phi_K)}{I_{pm} \cos(\alpha - \phi_K)} \quad \text{or } \omega T_a = \omega \frac{r_k}{\omega x_k} = \frac{r_k}{x_k} = \text{tg} \phi_k$$

$$\text{et } \phi_k = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \text{tg} \phi_k = \infty$$

$$\text{donc } \frac{\pm I_m - I_{pm} \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)}{I_{pm} \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)} = \infty \quad \text{ou} \quad \frac{\pm I_m - I_{pm} \cos\alpha}{I_{pm} \sin\alpha} = \infty$$

On tire immédiatement $\sin\alpha = 0 \Rightarrow \underline{\alpha = k\pi}$

Et la valeur extrême du courant de court-circuit est obtenue pour un temps t que l'on détermine à partir de l'équation b .

$$I_{pm} \cos(\omega t - \alpha - \varphi_k) = I_{pm} \cos(\alpha - \varphi_k) e^{-t/T_a}$$

$$\text{or } \alpha = 0, \quad \varphi_k = \frac{\pi}{2} \quad \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) = 0 \quad \omega t - \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{2}$$

$$\omega t = \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{2 \pi f} = 0,01 \text{ sec}$$

$$\underline{t = 0,01 \text{ sec}}$$

En remplaçant dans l'équation de i_{kA} les conditions précédentes, on obtient les valeurs extrêmes du court-circuit :

$$1) - \alpha = 0 : \varphi = -\frac{\pi}{2} ; t = 0,01 \text{ sec} \rightarrow i_{kA1\text{max}} = 2I_{pm} + I_m = i_{kA\text{max}}$$

$$2) - \alpha = 0 ; \varphi = +\frac{\pi}{2} : t = 0,01 \text{ sec} \rightarrow i_{kA2\text{max}} = 2I_{pm} - I_m = i_{kA\text{min}}$$

$$3) - \alpha = \pi ; \varphi = +\frac{\pi}{2} ; t = 0,01 \text{ sec} \rightarrow i_{kA3\text{max}} = -2I_{pm} + I_m = -i_{kA\text{min}}$$

$$4) - \alpha = \pi : \varphi = -\frac{\pi}{2} ; t = 0,01 \text{ sec} \rightarrow i_{kA4\text{max}} = -2I_{pm} - I_m = -i_{kA\text{max}}$$

Le raisonnement est analogue pour les 2 autres phases B et C et la condition qui diffère sera

$$\alpha = k\pi \text{ pour la phase A ; } \alpha - \frac{2\pi}{3} = k\pi \text{ pour B}$$

$$\text{et } \alpha - \frac{4\pi}{3} = k\pi \text{ pour C .}$$

Lorsque le circuit est à vide, le courant de charge I_m est nul $\Rightarrow I_m = 0$ les valeurs extrêmes du courant de court-circuit deviennent :

$$\left| \begin{array}{l} i_{k\text{max}} = 2 I_{pm} \\ i_{k\text{min}} = -2 I_{pm} \end{array} \right.$$

Si on considère le cas où $\alpha - \varphi = 0$ avec toujours $I_m \neq 0$
 les équations seraient identiques à celles correspondant au circuit à vide car dans l'équation de i_{kA} , on aura $I_m \sin(\alpha - \varphi) = 0$

ou $\sin(\alpha - \varphi) = 0$ ce qui donne $\alpha - \varphi = 0$

l'équation du courant de court-circuit s'écrira :

$$i_{kA} = \underbrace{I_{pm} \sin(\omega t - \alpha - \varphi_k)}_{i_p \text{ composante périodique}} - \underbrace{I_{pm} \sin(\alpha - \varphi_k) e^{-t/Ta}}_{i_a \text{ composante aperiodique}}$$

Dans ce cas, le plus grand courant aperiodique s'obtient pour $t = 0$: $\varphi_k = \frac{\pi}{2}$; $\alpha = 0$ et sera égal à :

$$\text{courant } i_{a0} = I_{pm}$$

et le plus grand périodique s'obtient également pour les mêmes conditions :

$$i_{p0} = I_{pm}$$

Le courant périodique et le courant aperiodique sont donc de même module et de sens contraire.

Pour cette situation qui correspond à l'instant $t = 0$,

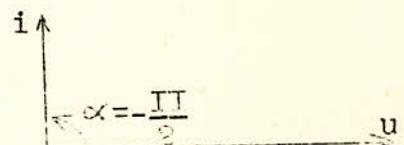
$$i_{kA} \text{ (} i_{A0} = 0 \text{ : } \alpha - \varphi_k = \pm \frac{\pi}{2} \text{)}$$

i_{A0} = le courant en régime normal à $t=0$

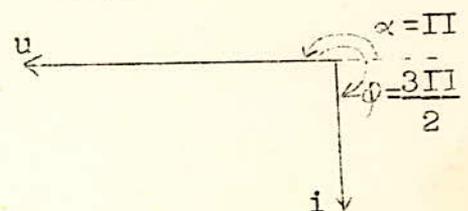
$$\Rightarrow i_{kA} = I_{pm} \sin(\omega t \pm \frac{\pi}{2}) - I_{pm} \sin(\pm \frac{\pi}{2}) e^{-t/Ta} = \pm I_{pm} (\cos \omega t - e^{-t/Ta})$$

$$\text{or } I_{pm} = \sqrt{2} I_p \quad i_{kA} = \pm \sqrt{2} I_p (\cos \omega t - e^{-t/Ta})$$

Les valeurs maximums du courant de court-circuit ont été obtenues pour $\alpha = 0$ et $\varphi = -\frac{\pi}{2}$



$$\text{ou } \alpha = \pi \text{ et } \varphi = -\frac{\pi}{2} = \frac{3\pi}{2}$$



Ces 2 fonctionnements sont obtenus pour des régimes de fonctionnement capacitifs.

Dans le cas général, le régime de fonctionnement pour les circuits électriques n'est pas capacitif et on peut considérer le cas le plus défavorable, le court-circuit qui se produit dans un circuit ouvert ($I_m=0$) quand la tension passe par 0 ($\alpha = 0$)

et on peut représenter l'allure de la variation du courant de court-circuit (figure 6).

La valeur maximum du courant de court-circuit se nomme Courant de Choc pendant la 1^{ère} période et on définit un coefficient de Choc K_{choc} tel que

$$K_{choc} = \frac{i_{choc}}{I_{pm}} \quad \text{avec} \quad i_{choc} = i_{kAmax} = i_p + i_a \quad \text{à} \quad t=0, 0Is$$

$$\text{donc} \quad i_{choc} = \sqrt{2} I_p (1 + e^{-t/Ta}) \quad \text{avec} \quad K_{choc} = 1 + e^{-t/Ta}$$

{	En régime inductif	$r_k \approx 0 \rightarrow Ta = \frac{Lk}{r_k} = \infty$	$\Rightarrow K_{choc} = 2$
	" " résistif	$r_k \approx 0 \rightarrow Ta \approx 0$	$\Rightarrow K_{choc} = 1$
	" " capacitif	$15 < \frac{Xk}{r_k} < 20 \rightarrow Ta \approx 0,045$	$\Rightarrow K_{choc} \approx 1,8$

$$\Rightarrow i_{choc} = \sqrt{2} K_{choc} I_p = \sqrt{2} \times 1,8 \times I_p = 2,55 I_p$$

$$i_{choc} = 2,55 I_p$$

On peut également utiliser des courbes donnant K_{choc} en fonction de la valeur approchée de $Ta = \frac{X}{r}$.

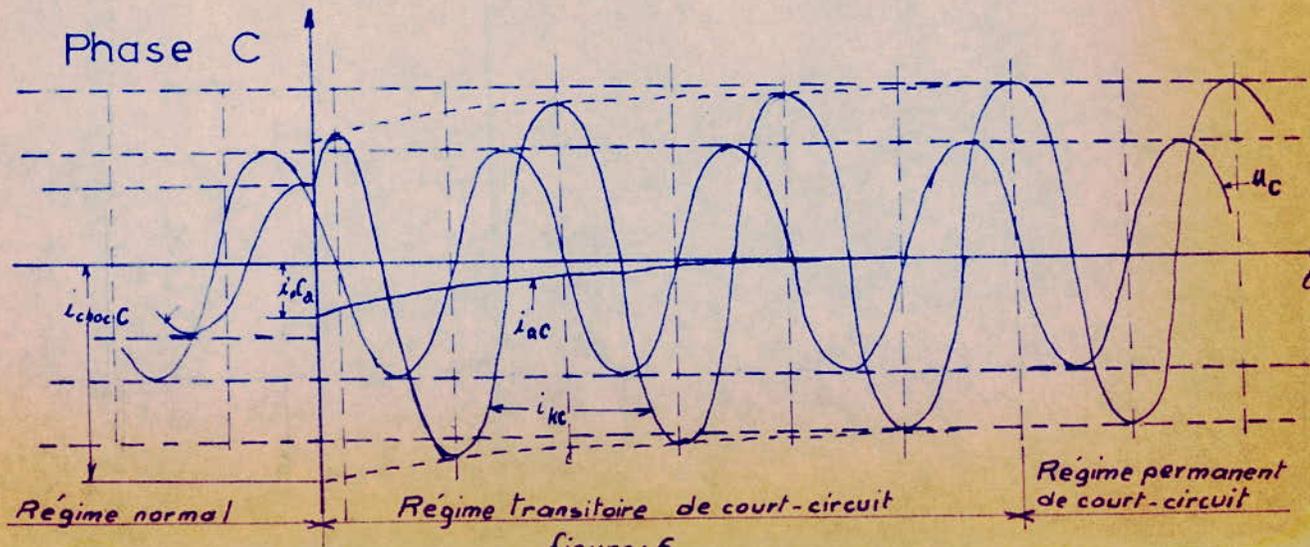
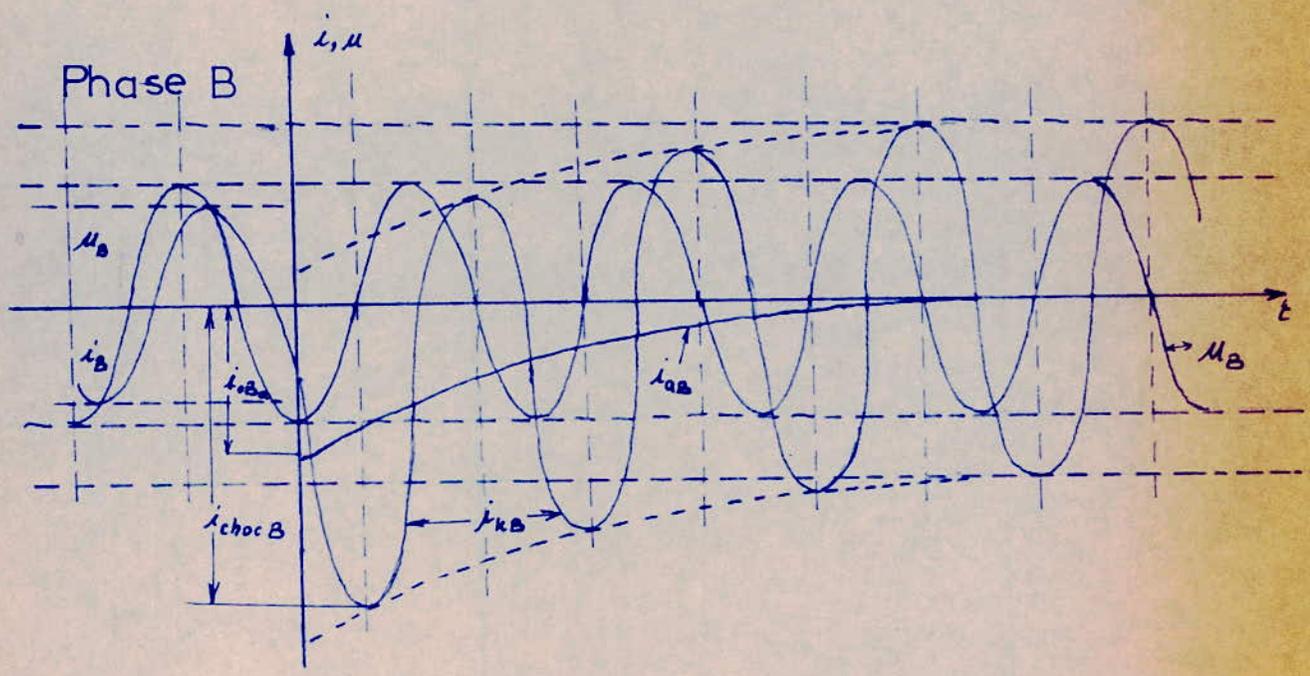
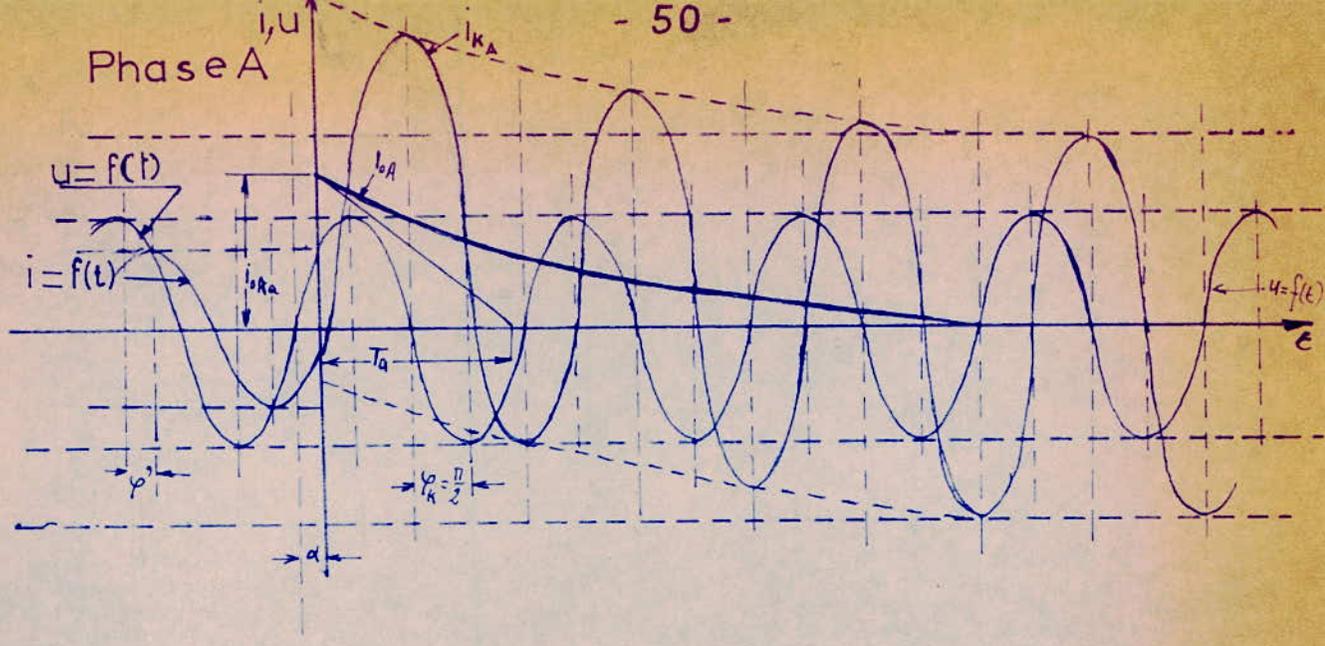


figure: 6

IX - ALCUL PRATIQUE du COURT-CIRCUIT
=====

GENERALITES

Quand un court-circuit apparait en un point de l'installation, il y a un très grand appel d'énergie en ce point. L'énergie proviendra évidemment des 2 Turbo-Alternateurs et du système énergétique national. Le réseau algérien étant interconnecté, les autres centrales d'Algérie peuvent contribuer à l'appert d'énergie au point de court-circuit. D'autre part, les charges tournantes cèdent leur énergie emmagasinée dans leurs bobinages (rotors, stators) après l'apparition du CC. Toutefois dans notre cas, les charges sont petites: < à 1000 KW, on ne tiendra pas compte de leur influence.

On a donc 3 sources qui alimentent le point de CC : les 2 générateurs et le Système électro-énergétique.

Pour le calcul du courant, on verra que les sources peuvent être remplacées par une seule ^{source} équivalente.

Soit un CC au point K du réseau supposé alimenté par la source équivalente. Il existe différents chemins qui véhiculent le courant à K. Le courant de court-circuit maximum sera celui qui correspondra au chemin présentant une impédance minimale.

On va alors calculer le courant de CC pour chaque point en considérant les différents chemins possibles et ainsi on déterminera le courant maximum qui va nous servir à calculer la sections des câbles et à choisir les appareils de protection.

I - EXEMPLES de RECHERCHES des DIFFERENTS CHEMINS POSSIBLES VEHICULANT le COURANT en I POINT K .

a) -

l'alimentation se fait normalement par les transformateurs TAdI et I2TAi (fig.a)

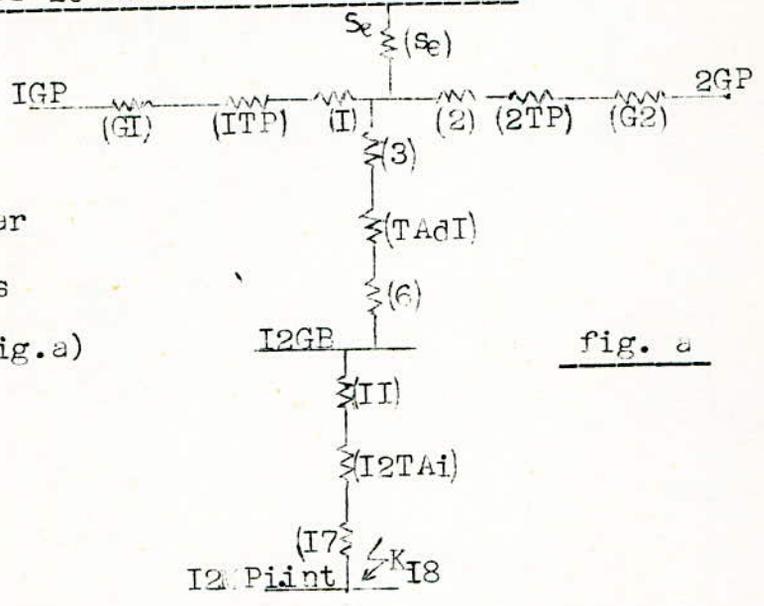


fig. a

b) -

Le disjoncteur de couplage longitudinal A a été fermé antérieurement pour un secours assuré par l'intermédiaire de ITAt en plus de TAdI (fig.b)

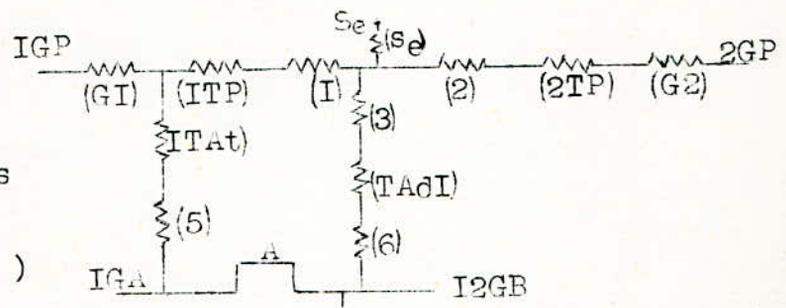


fig. b

c) -

TAdI étant en panne et TAd2 n'a pas assuré le secours donc 2TAt viens le faire et les disjoncteurs A et A' se ferment alimentant le jeu de barres I2GB (fig. c)

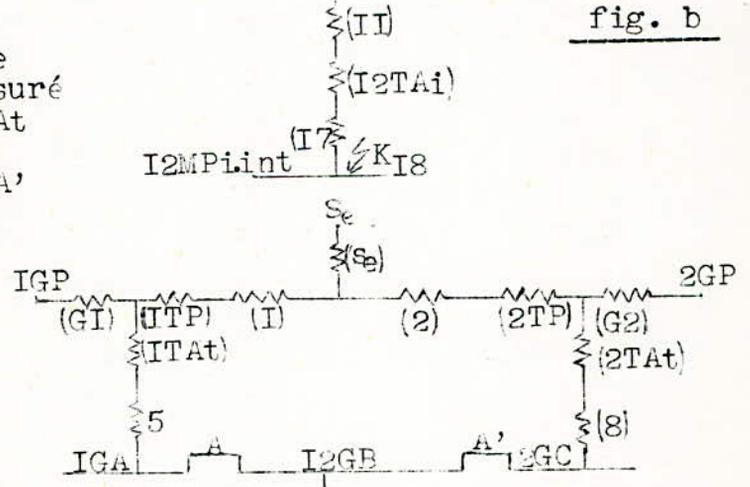
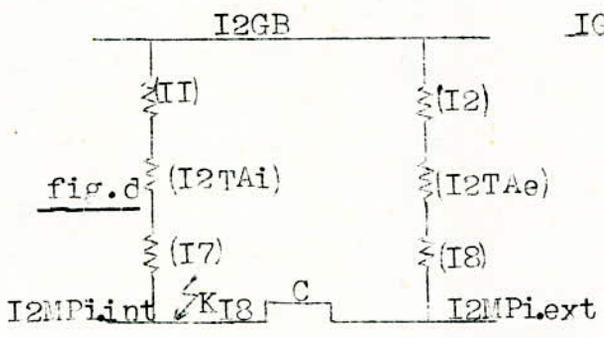


fig. c

d) -



A partir du jeu de barres I2GB on peut envisager aussi que le disjoncteur C s'est fermé auparavant pour un quelconque besoin et le point K18 sera alimenté par le I2TAi et I2TAe (fig. d)

De ces différents cas, il s'agit donc de considérer la plus faible impédance jusqu'au lieu de CC qui donnera un courant maximum de CC .

2 - EXEMPLE de CALCUL du COURANT DE CC au POINT K_{I8}
pour le CAS de la FIGURE a .

Pour le calcul des courants de CC en un point du système le schéma est ramené par une série de transfigurations successives à une forme finale simple qui nous permet la détermination de la réactance équivalente totale.

Transfiguration du schéma

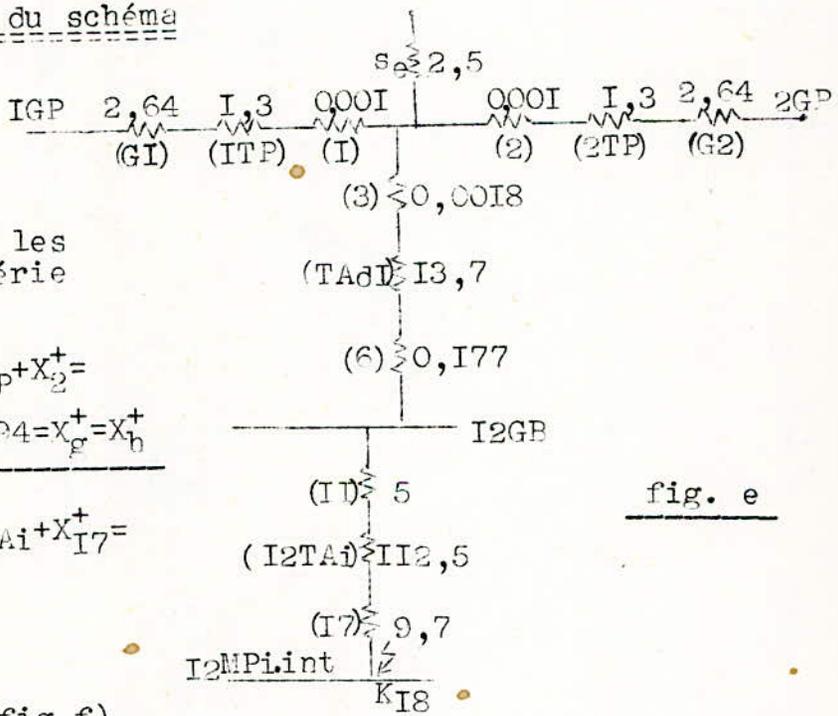


fig. e

En additionnant les réactances en série on aura

$$X_{GI}^+ + X_{ITP}^+ + X_I^+ = X_{G2}^+ + X_{2TP}^+ + X_2^+ = 2,64 + 1,3 + 0,001 = 3,94 = X_g^+ = X_h^+$$

$$X_3^+ + X_{TAi}^+ + X_6^+ + X_{II}^+ + X_{I2TAi}^+ + X_{I7}^+ = X_i^+ = 1,1$$

ce qui donne la (fig.f)

On regroupe les 3 sources (IGP, 2GP, S_e)

les réactances X_g^+ , X_h^+ et $X_{S_e}^+$ deviennent en parallèle et donnent la réactance équivalente

$$X_i^+ = 1,1$$

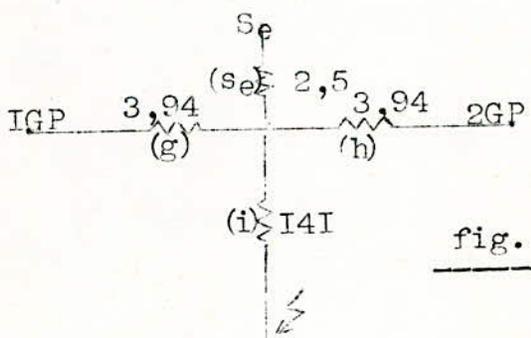
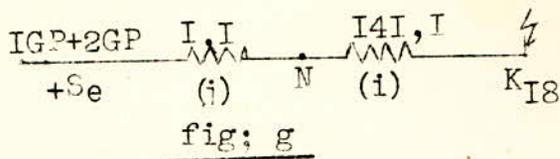


fig. f

d'ou l'on obtient la figure g :

Les réactances X_j^+ et X_h^+ sont en série, elles s'additionnent pour donner:



$$X_i^+ + X_j^+ = I4I,I + I,I = I42,2$$

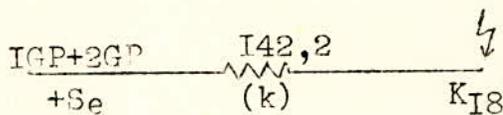


fig. h

La réactance globale équivalente est donnée par la fig.h

$$\underline{\underline{X_{\Sigma}^+ = X_k^+ = I42,2}}$$

2- a) Détermination des coefficients de distribution du courant dans chaque branche

On se propose de déterminer la proportion de courant qui parcourt chaque branche. A cela on commence par poser le courant sortant par le point de court-circuit à la proportion $C = I$ et qui est égal à la somme des courants débités par chaque générateur :

$$C_{GI} + C_{G2} + C_{Se} = C_k = I$$

D'après la fig.g, $\Rightarrow C_j = C_i = C_k = I$

car le courant parcourant les branches (j), (i) et le même que celui parcourant la branche (k).

De la figure e, on a également :

$$C_i = C_{I7} = C_{I2TAi} = C_{II} = C_6 = C_{TA\Delta I} = C_3 = I$$

Des figures f et g, \Rightarrow

$$C_j = C_g + C_{Se} + C_h = I$$

la loi des courants donne : $C_j X_j^+ = C_g X_g^+ = C_{Se} X_{Se}^+ = C_h X_h^+$

$$\text{or } \begin{cases} C_j = I ; X_j^+ = I,I \\ X_g^+ = X_h^+ = 3,94 \\ X_{Se}^+ = 2,5 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} C_g = \frac{C_j X_j^+}{X_g} = \frac{I,I}{3,94} = 0,279 \rightarrow C_g = C_h = 0,279 \\ C_{Se} = \frac{C_j X_j^+}{X_{Se}^+} = \frac{I,I}{2,5} = 0,44 \rightarrow C_{Se} = 0,44 \end{cases}$$

La vérification donne: $C_{GI} + C_{G2} + C_{Se} = 0,279 + 0,279 + 0,44 = 0,998$

2- b) Calcul du courant surtransitoire de court-circuit I''

La grandeur réduite de la composante périodique du courant de CC à l'instant initial s'appelle composante surtransitoire I'' et est donnée par :

$$I''^{+} = \frac{E''^{+}}{X_{\Sigma}^{+}} =$$

E''^{+} : la tension surtransitoire de la source en grandeur réduite.

X_{\Sigma}^{+} : La réactance réduite équivalente.

On peut considérer que $E'' = I, I U_n \Rightarrow E''^{+} = \frac{I, I U_n}{U_b}$

en prenant U_b égale à la tension nominale U_b = U_n de la partie du réseau à la même tension que le générateur donc :

$$E''^{+} = I, I \quad \text{d'où} \quad I''^{+} = \frac{I, I}{X_{\Sigma}^{+}}$$

Dans notre exemple au point K_{I8} le courant surtransitoire en grandeur réduite est :

$$I''^{+} = \frac{I, I}{X_{\Sigma}^{+}} = \frac{I, I}{I4^{+}, 2} = 0,00774$$

$$\underline{I''^{+} = 0,00774}$$

Pour déterminer le courant dans chaque branche B on aura :

$$I''_B = I''^{+} \cdot I_{bB} \cdot C_B \quad \text{avec } I_{bB} \text{ le courant de base dans cette branche B}$$

En particulier, le courant surtransitoire au point K_{I8} est

$$I''_{K_{I8}} = 0,00774 \times I5I5 = 11,7 \text{ kA} \quad \text{car } I_b \text{ (en } K_{I8}) = I5I5 \text{ kA}$$

$$\underline{I''_{K_{I8}} = 11,7 \text{ kA}} \quad \text{et } C_B = I$$

3 - CALCUL des COURANTS de DUREE

On a vu précédemment, qu'après un certain temps, le courant de CC se stabilise. Diverses méthodes nous permettent

de calculer ce courant de durée $I_{cc} = I_{pcc}$. On utilisera le principe des courbes de calcul X_{ci}^+ représentent les réactances de calcul en grandeurs réduites en fonction de la composante périodique du courant de CC I_{pcc} rapportée à la puissance et la tension nominale du générateur (abaque 5 $I_{pcc.t}^+ = f(X_c^+)$).

3- a) Détermination des Réactances de Calcul

Elles se déterminent suivant l'hypothèse de la variation séparée de chacune des sources et pour chaque branche ainsi:

$$X_{ci}^+ = \frac{X_{bz}^+ S_n(i)}{C_i S_b(i)}$$

avec C_i le coefficient de distribution de la branche i .
 S_n et S_b les puissances nominales et de base de la source i
 X_{bz}^+ est la réactance réduite équivalente jusqu'au lieu de CC.

En ce qui concerne le système énergétique, la réactance de calcul est donnée par :

$$X_{cs}^+ = \frac{X_{bz}^+}{C_s}$$

C_s le coefficient de distribution de la branche du système

A l'aide des courbes de calcul $I_{pcc.t}^+ = f(X_c^+)$, on détermine les composantes périodiques réduites du courant de CC relatives à chaque source et le système énergétique.

Ce qui donne $I_{pcc.t(i)}^+, I_{pcc.t(j)}^+, \dots$, et $I_{pcc.t(Se)}^+$

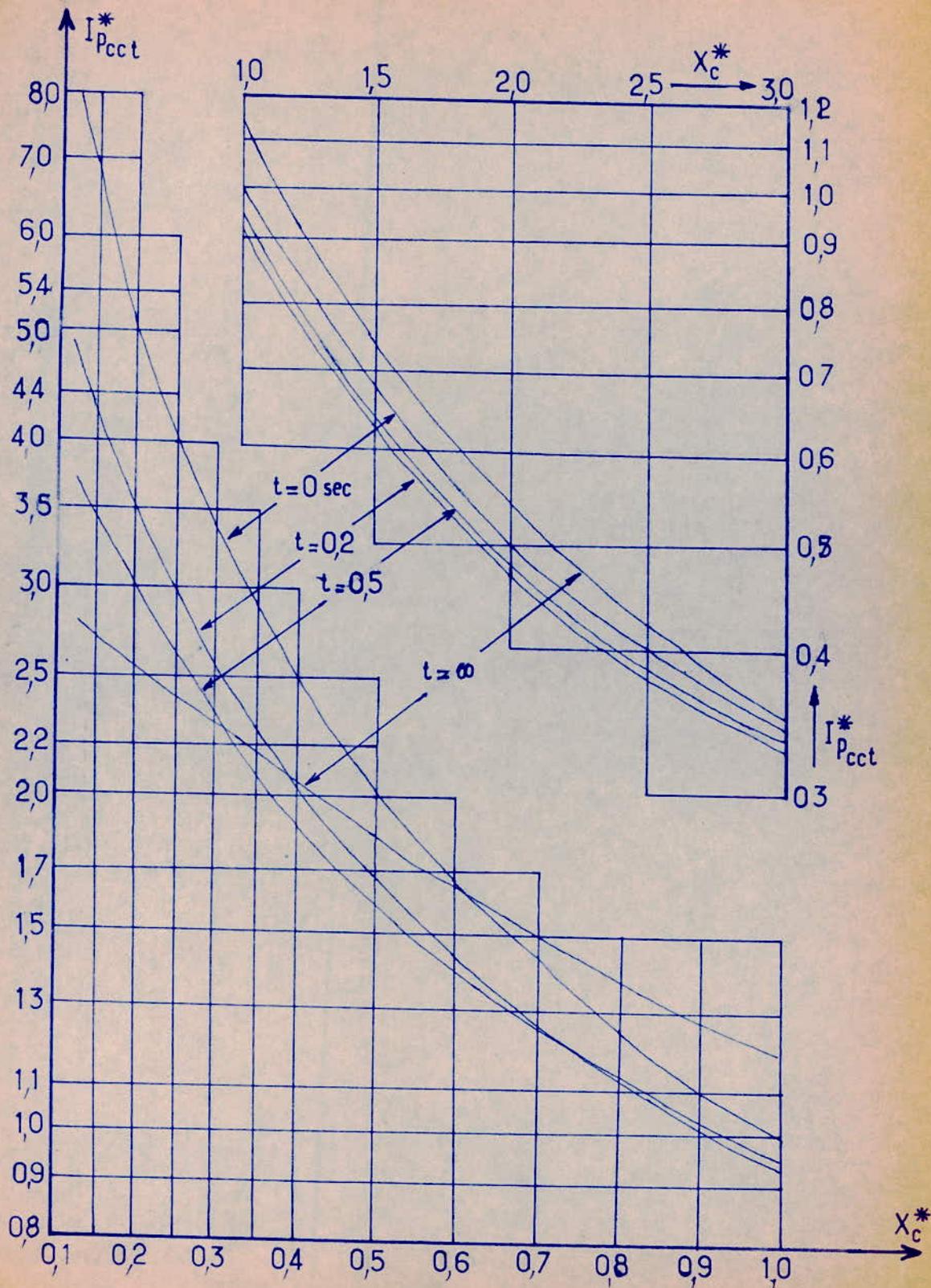
Finalement la composante périodique réduite du courant de CC s'obtient ainsi :

$$I_{pcc.t(K)}^+ = I_{pcc.t(1)}^+ + I_{pcc.t(2)}^+ + I_{pcc.t(Se)}^+$$

Le Courant de Court-circuit périodique à ce point est donné par :

$$I_{pcc.t(K)} = I_{pcc.t(K)}^+ \times I_{bK}$$

avec I_{bK} le courant de base dans la branche du lieu de CC



Courbes de calcul pour generateurs avec R.A.T. - $I_{Pcct}^* = f(X_c^*) - 5 -$

Dans le cas où la réactance de calcul dépasse la valeur > 3 , on considère que le courant de CC ne s'amortit pas et sa valeur est déterminé par :

$$X_c^+ > 3 \quad I_{pK} = I_K'' = I_{\infty K} = \frac{I_{bK}}{X_{\Sigma}^+}$$

* Calcul du courant de durée dans notre cas au point K_{I8}

Les réactance de calcul sont:

- Générateurs Les 2 générateurs G1 et G2 sont identiques :

$$X_{cG1}^+ = X_{cG2}^+ = \frac{X_{\Sigma}^+ S_{nI}}{C_G S_{\Sigma}} \quad \left\{ \begin{array}{l} X_{\Sigma}^+ = 142,2 \\ S_n = 75 \text{ MVA} \\ S_b = 1000 \text{ MVA} \\ C_G = C_{G1} = C_{G2} = 0,279 \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow \underline{X_{cG1}^+ = X_{cG2}^+ = 38,3 > 3}$$

- Système énergétique

$$X_{cSe}^+ = \frac{X_{\Sigma}^+}{C_s} \quad C_s = 0,44 \quad \text{et} \quad X_{\Sigma}^+ = 142,2$$

$$\underline{X_{cSe}^+ = 320 > 3}$$

On ne peut utiliser là, les courbes de calcul car les distances électriques réduites sont supérieures à 3. Le courant de durée est obtenu sur les courbes de calcul pour $t = \infty$

$$I'' = I_p = I_{\infty} = \frac{I_b}{X_{\Sigma}^+} \quad I_b = 1515 \text{ kA}$$

$$\text{d'où} \quad \underline{I_{\infty K_{I8}} = 10,65 = I_{pcc}(t=\infty)}$$

Nous procéderons de la même manière pour les différents points de court-circuit, mais on envisagera les cas du régime le plus défavorable et on regroupera les résultats dans le tableau final récapitulatif 6 .

4 - EXEMPLE de CALCUL du COURANT DE CC dans le
Cas le PLUS DEFAVORABLE (cas de la fig. c)

* Calculons le courant de CC au point $K_9 = K_8 = K_8'$,
 et le schéma est le suivant:

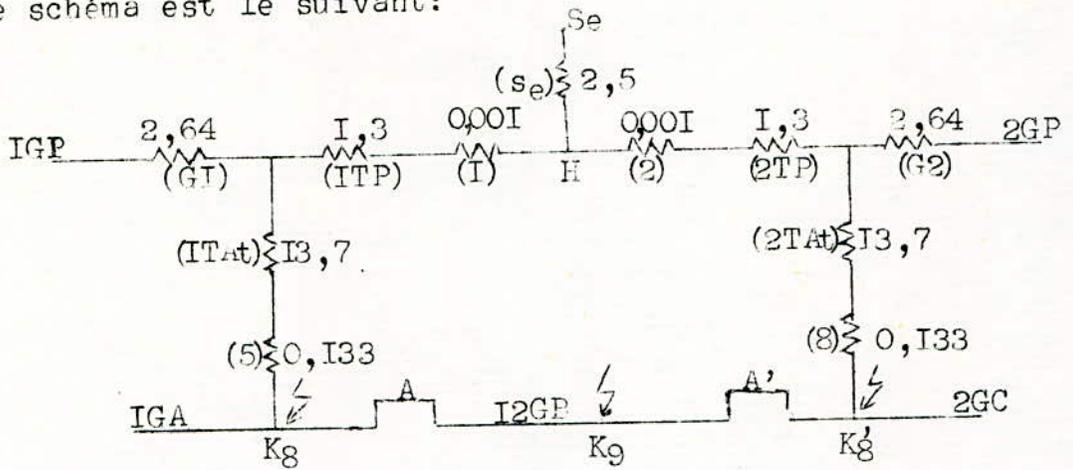


fig. a'

Transfiguration du schéma :

en additionnant les réactances
 en série:

$$X_1^+ = X_1^+ = X_{ITAt}^+ + X_5^+$$

$$X_1^+ = X_1^+ = 13,833$$

d'où la fig. b'

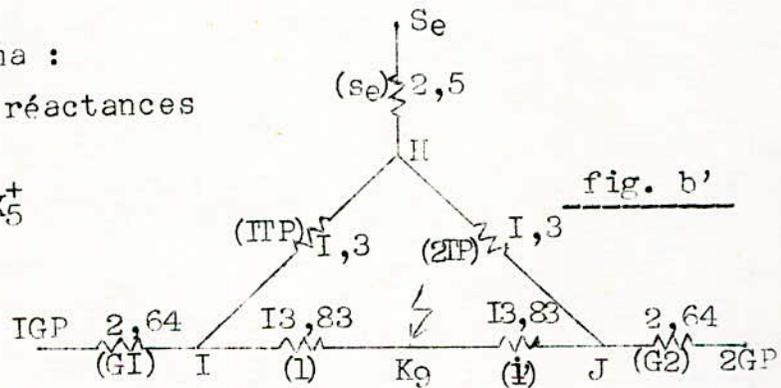


fig. b'

On regroupe les sources IGP et Se

et on transforme le triangle IGP+ Se , H, I en étoile fig. c'

Calculons (o), (n) et (m)

$$X_m^+ = \frac{X_{GI}^+ \cdot X_{ITP}^+}{X_{GI}^+ + X_{ITP}^+ + X_{Se}^+} = 0,5$$

$$X_n^+ = \frac{X_{Se}^+ \cdot X_{ITP}^+}{X} = 0,466$$

$$X_o^+ = \frac{X_{Se}^+ \cdot X_{GI}^+}{X} = 1,03$$

On obtient la fig. d':

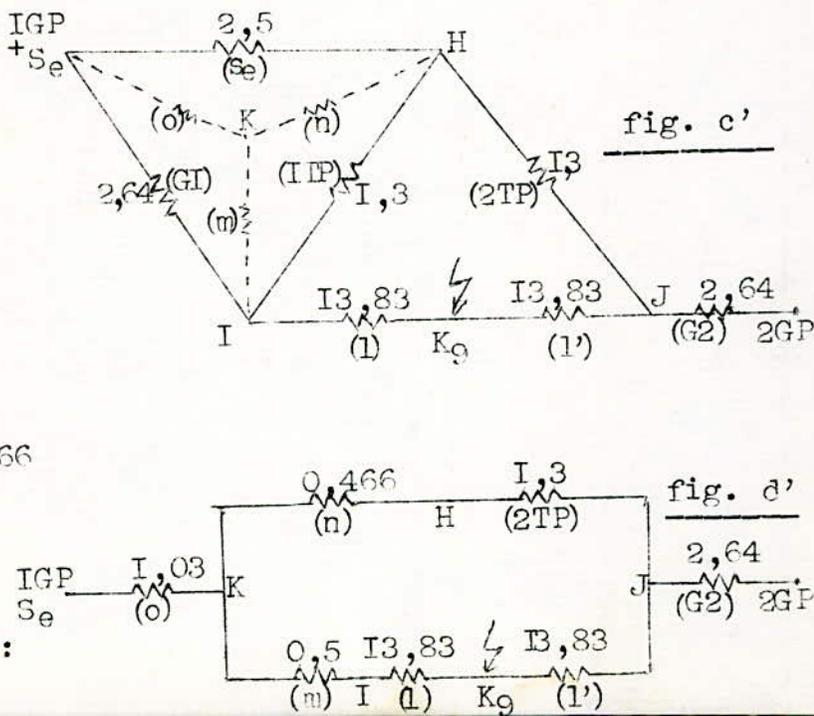


fig. c'

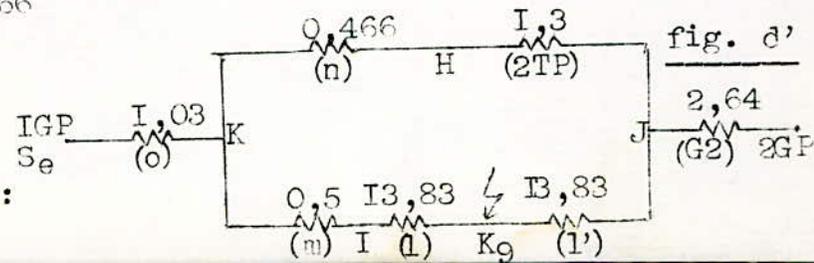


fig. d'

les réactances en série s'additionnent pour donner la figure ci-contre e' :

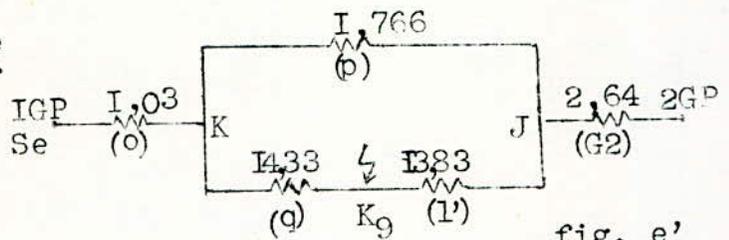


fig. e'

On regroupe les 3 sources IGP+Se et 2GP fig. f'

et on transforme le triangle (IGP+2GP+Se, K, J) en étoile

$$X_r^+ = \frac{X_o^+ \cdot X_p^+}{X_o^+ + X_p^+ + X_{G2}^+} = 0,335$$

$$X_s^+ = \frac{X_o^+ \cdot X_{G2}^+}{\Sigma X^+} = 0,5$$

$$X_t^+ = \frac{X_{G2}^+ \cdot X_p^+}{\Sigma X^+} = 0,86$$

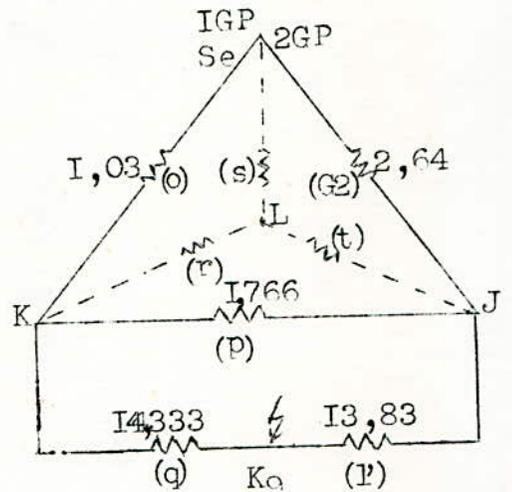


fig. f'

ce qui donne la fig. g'

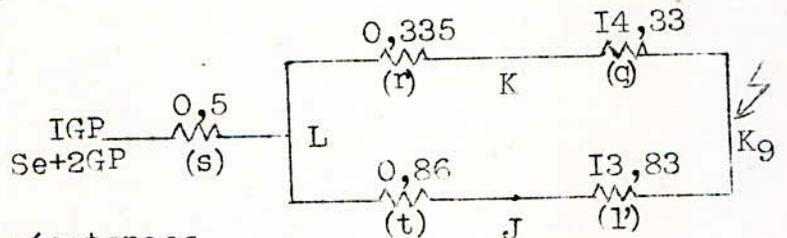


fig. g'

On additionne les réactances en série

→ fig. h'

Les 2 réactances u et v en parallèle donnent la réactance équivalente w

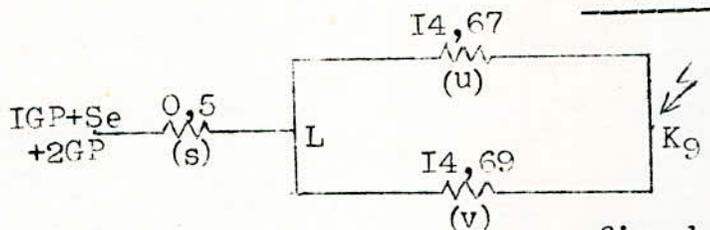


fig. h'

$$X_w^+ = \frac{X_u^+ \cdot X_v^+}{X_u^+ + X_v^+} = 7,33$$

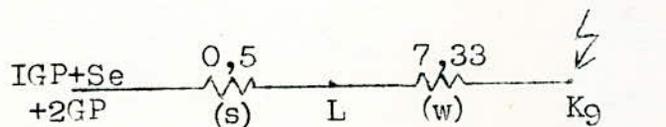


fig. i'

La réactance équivalente réduite jusqu'au point K9 est :

$$X_\Sigma^+ = X_X^+ = 7,83$$

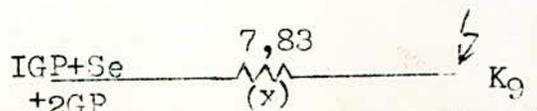


fig. j'

Finalement le courant de Court-circuit au Point K_9 est

$$I''_{K_9} = \frac{I, I}{X_{\Sigma}^+} = \frac{I, I}{7,83} = 0,14 \quad \underline{I''_{K_9} = 0,14}$$

$$I''_{K_9} = I''_{K_9}^+ \times I_b \quad \text{or } I_b = I_{bIII} = 105 \text{ kA}$$

$$\underline{I''_{K_9} = 14,8 \text{ kA}}$$

* Un autre exemple pour le calcul du courant de court-circuit est le Cas du Point K_5 . Le schéma est identique que celui de la figure 2'.

Là aussi avec une série de transfigurations pareilles que précédemment, on aboutit à une réactance équivalente :

$$X_{\Sigma}^+ = 7,8 \quad \Rightarrow \quad I''_{K_5} = I''_{K_5}^+ = \frac{I, I}{X^+} = 0,142$$

$$\Rightarrow I''_{K_5} = I''_{K_5}^+ \cdot I_{bIII} = 14,9 \text{ kA} \quad (I_{bIII} = 105 \text{ kA})$$

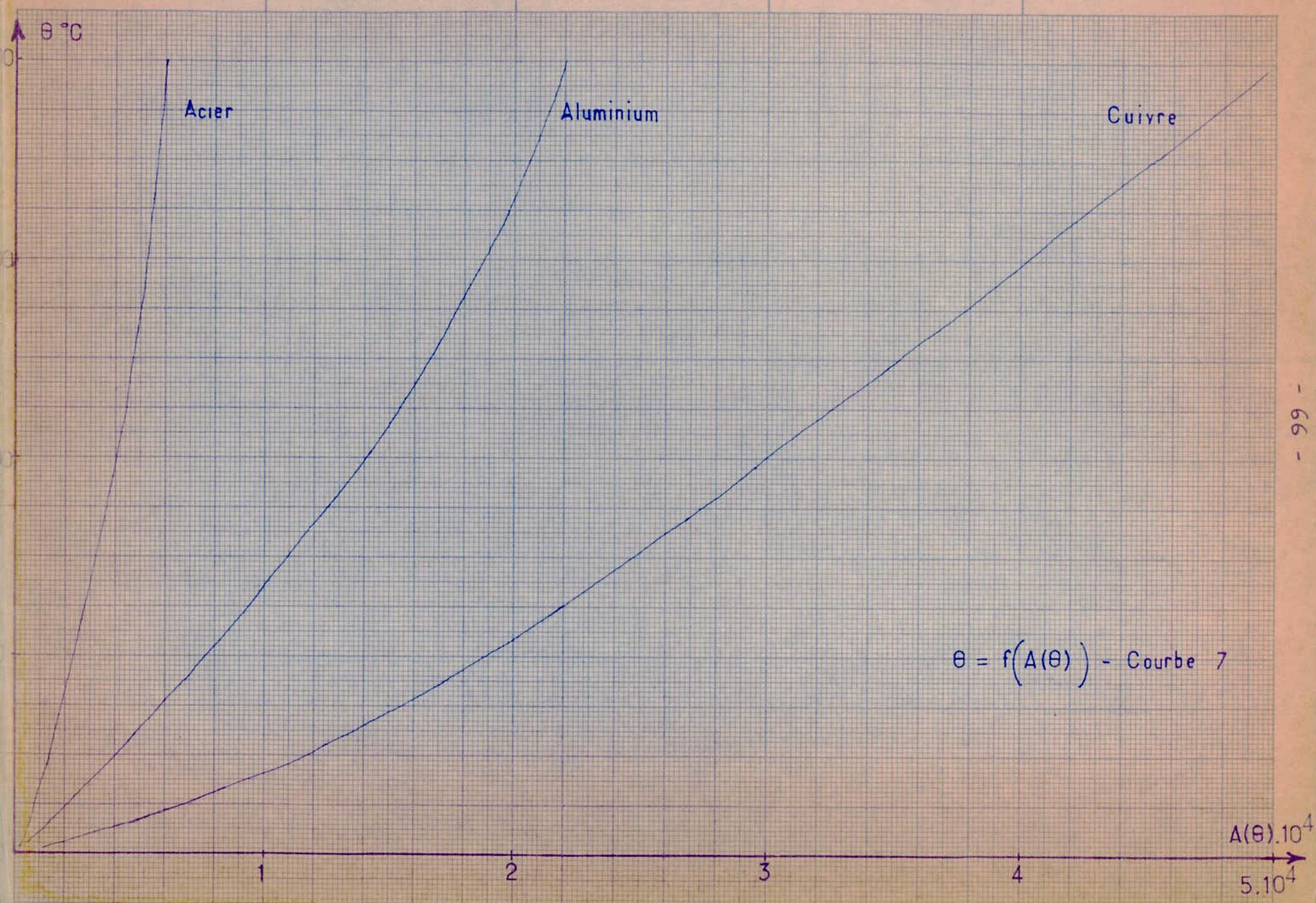
$$\underline{I''_{K_5} = I''_{K_5}^+ = 14,9 \text{ kA}}$$

On répètera ce calcul à tous les points de CC que nous repèrerons sur le schéma 5 et il s'agit de calculer en chacun de ces points :

- Le courant de court-circuit surtransitoire I''
- Le courant de durée I_{∞}

En régime de fonctionnement le plus défavorable.

Le tableau 6 récapitulatif regroupe toutes ces valeurs.



- SCHEMA DE LIEUX DE COURT-CIRCUIT - (5)

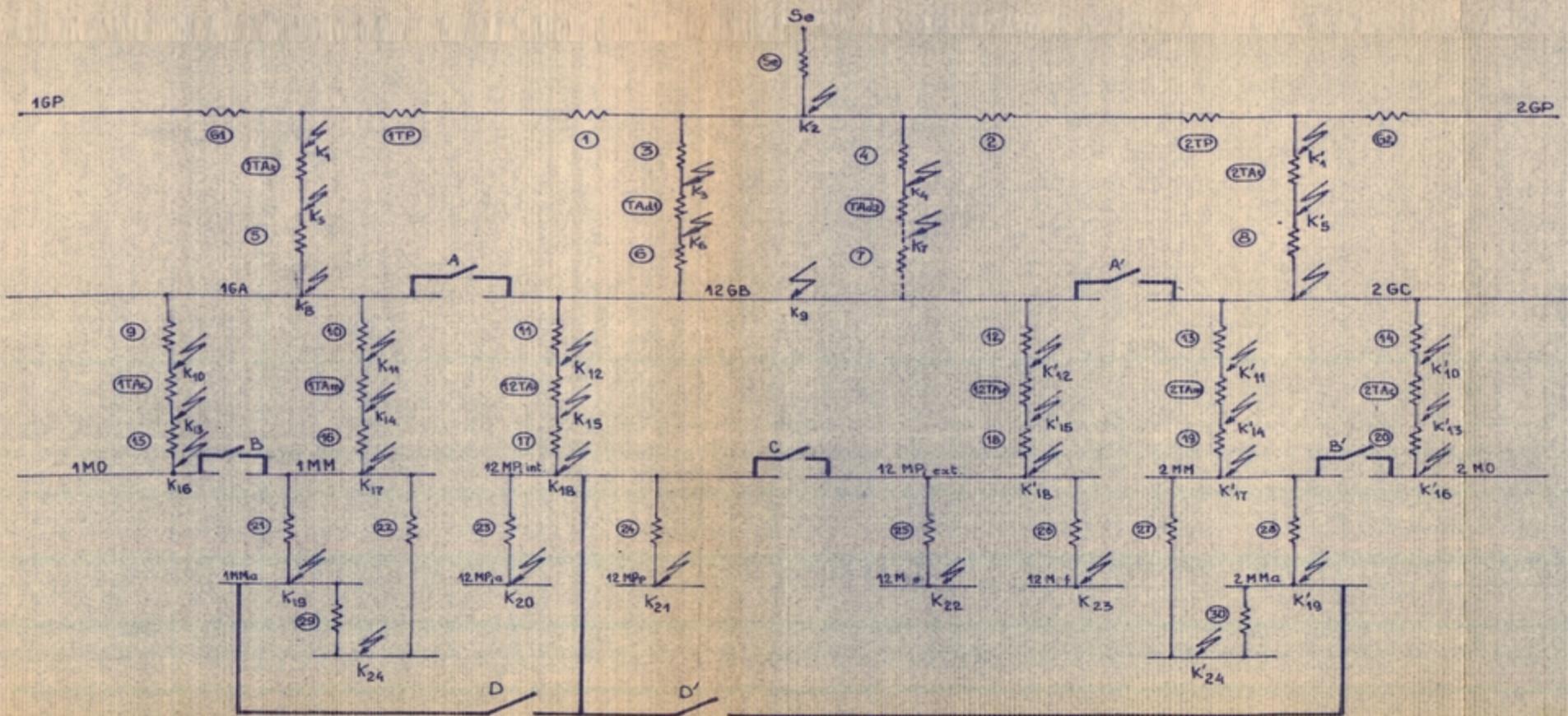


Tableau récapitulatif des différents courants de CC
surtransitoire et de durée.

LIEU de CC	I" en kA	I _∞ en kA
K ₂	9,6	6,98
K ₃ # K ₄	9,6	6,98
K ₅ = K' ₅	14,9	13,5
K ₆	7,8	7,1
K ₇	5,83	5,3
K ₈ = K' ₈ } K ₉ }	14,8	13,4
K ₁₀ = K' ₁₀ } K ₁₁ = K' ₁₁ } K ₁₂ = K' ₁₂ }	14,4	13,1
K ₁₃ = K' ₁₃ } K ₁₄ = K' ₁₄ } K ₁₅ = K' ₁₅ }	13,75	12,5
K ₁₆ = K' ₁₆ } K ₁₇ = K' ₁₇ }	13,2	12
K ₁₈ = K' ₁₈	11,7	10,65
K ₁₉ = K' ₁₉	11,4	10,3
K ₂₀	6,1	5,55
K ₂₁	10,9	9,9
K ₂₂	11,4	10,3
K ₂₃	9,5	8,65
K ₂₄ = K' ₂₄	6,1	5,55

X - III - EFFET THERMIQUE
=====

Au moment du court-circuit, le courant s'élève très rapidement pouvant atteindre des dizaines de KA. La chaleur dégagée dans le conducteur est très intense et peut entraîner sa fusion. On doit donc vérifier les sections choisies à la stabilité thermique.

La chaleur produite par effet joule se divise en 2 parties :

- La chaleur emmagasinée dans le conducteur qui a pour expression :

$$C M \delta \zeta$$

- C : chaleur spécifique du matériau
- M : masse du matériau
- $\delta \zeta$: différence de température entre le milieu ambiant et le conducteur

- La chaleur transmise au milieu ambiant.

Elle s'exprime par :

$$\lambda S T \delta t$$

- λ : Coefficient de transmission de la chaleur vers le milieu ambiant
- S : Surface latérale
- t : temps

La chaleur totale produite par effet joule est donc la somme de ces 2 valeurs :

$$Ri^2 \delta t = C M \delta \zeta + \lambda S \zeta \delta t \quad \text{Le 2^e terme est}$$

faible par rapport au 1^{er}. On le néglige et ainsi on place le conducteur dans la situation la plus défavorable c'est-à-dire qu'il conserve toute la chaleur produite par l'effet joule . Donc on aura :

$$Ri^2 \delta t = C M \delta \zeta = P \delta t$$

On peut assimiler $\delta \zeta = \delta \theta$

La résistance et la chaleur spécifique sont variables

en fonction de la température θ .

$$R = R_0 (1 + \alpha \theta) \quad \text{avec } R_0 \text{ la résistance à } 0^\circ\text{C}$$

$$C = C_0 (1 + \beta \theta) \quad C_0 \text{ la chaleur spécifique à } 0^\circ\text{C}$$

$$R_0 = \rho_0 \frac{l}{S} \quad \text{et} \quad M = \gamma l S \quad \gamma = \text{masse spécifique}$$

D'où la chaleur dégagée s'écrira :

$$i^2 R_0 (1 + \alpha \theta) dt = C_0 (1 + \beta \theta) M d\theta$$

$$\text{ou encore } i^2 \frac{\rho_0 l}{S} (1 + \alpha \theta) dt = C_0 \gamma l S (1 + \beta \theta) d\theta$$

$$\Rightarrow \frac{l}{S^2} i^2 dt = \frac{C_0 \gamma}{\rho_0} \frac{(1 + \beta \theta)}{(1 + \alpha \theta)} d\theta$$

Pour un temps t de court-circuit, on aura :

$$\frac{l}{S^2} \int_0^t i^2 dt = \frac{C_0 \gamma}{\rho_0} \int_{\theta_i}^{\theta_f} \frac{1 + \beta \theta}{1 + \alpha \theta} d\theta$$

avec θ_i = température initiale

θ_f = température finale

Le second terme s'intègre facilement et donne :

$$\frac{C_0 \gamma}{\rho_0} \int_{\theta_i}^{\theta_f} \frac{1 + \beta \theta}{1 + \alpha \theta} d\theta = \frac{C_0 \gamma}{\rho_0} \left[\frac{\alpha - \beta}{\alpha^2} \ln(1 + \alpha \theta_f) + \frac{\beta}{\alpha} \theta_f \right] - \frac{C_0 \gamma}{\rho_0} \left[\frac{\alpha - \beta}{\alpha^2} \ln(1 + \alpha \theta_i) + \frac{\beta}{\alpha} \theta_i \right]$$

$A(\theta_f)$
 $A(\theta_i)$

On aboutit finalement à :

$$\frac{l}{S^2} \int_0^t i^2 dt = A(\theta_f) - A(\theta_i)$$

$A(\theta)$ est une fonction tabulée et il existe des courbes donnant A connaissant θ , d'où l'abaques 7 pour les différents matériaux utilisés (Acier, aluminium, cuivre).

Pour déterminer la section S , il faut trouver la valeur de l'intégrale $\int_0^t i^2 dt$

On sait que le courant i est la somme de 2 courants, la composante périodique i_p et la composante apériodique i_a .

donc $\int_0^t i^2 dt = \int_0^t (i_p + i_a)^2 dt$ en négligeant $2i_p i_a$

$$\int_0^t i^2 dt = \int_0^t i_p^2 dt + \int_0^t i_a^2 dt = \int_0^t I_p^2 dt + \int_0^t I_a^2 dt$$

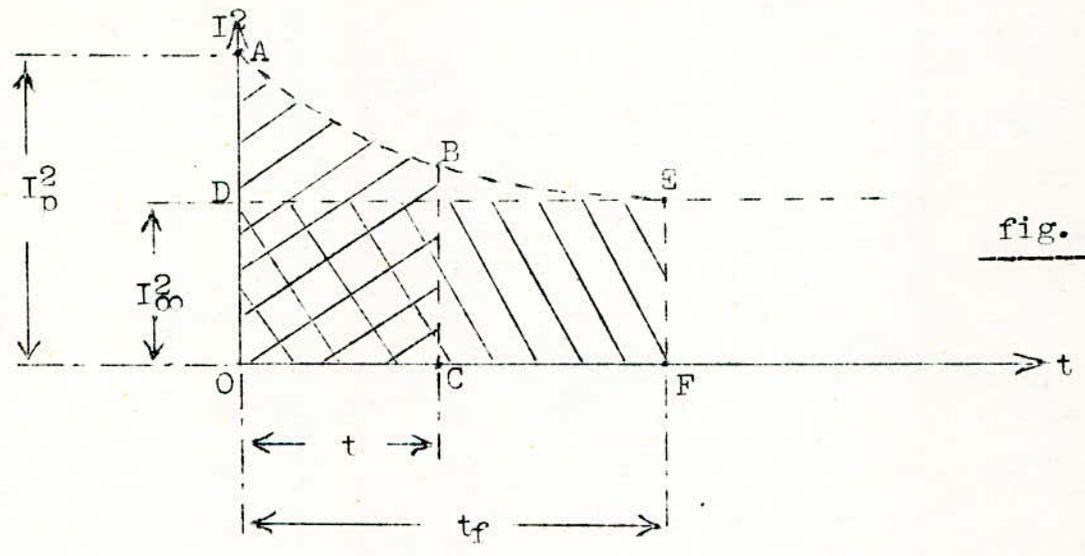


fig. 7

L'intégrale $\int_0^t I_p^2 dt$ est représentée par la surface OABC de la figure 7.

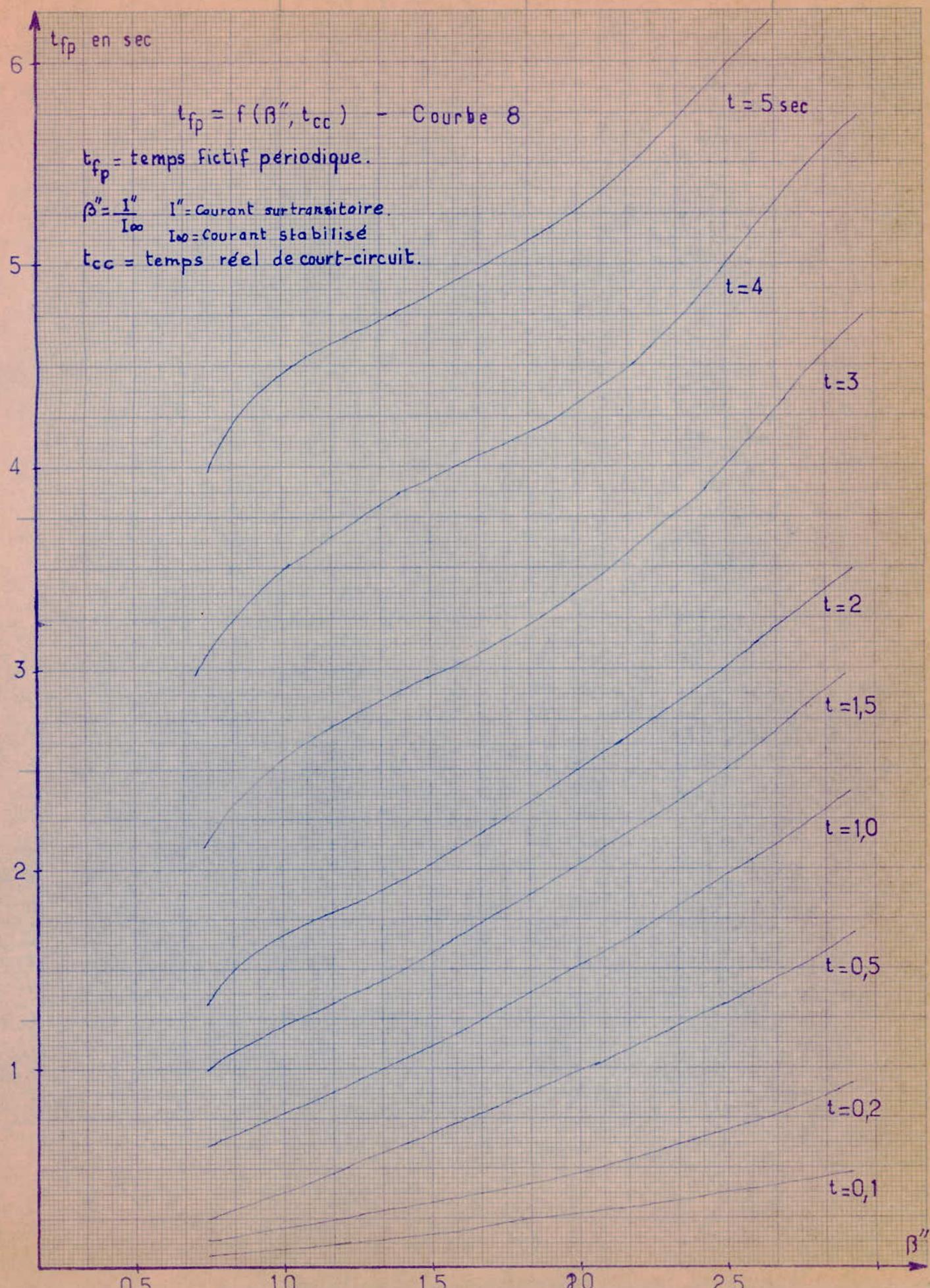
On détermine une surface ODEF égale à OABC, rectangle dont le côté OD représente I_∞^2 . Il nous suffit donc de trouver un temps t_f (temps fictif) tel que $I_\infty^2 t_f$ représentera la surface du rectangle ODEF = OABC.

t_f sera donc le temps nécessaire pour que la chaleur dégagée sous le courant I_∞ soit égale à celle dégagée pendant le temps réel et sous le courant surtransitoire I'' .

$$\left. \begin{aligned} \int_0^t I_p^2 dt &= I_\infty^2 t_{fp} \\ \int_0^t I_a^2 dt &= I_\infty^2 t_{fa} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \int_0^t I^2 dt = I_\infty^2 (t_{fp} + t_{fa})$$

$$\underline{t_{fp} + t_{fa} = t_f}$$

t_{fp} est donné par des courbes en fonction de $\beta'' = \frac{I''}{I_\infty}$
voir abaque 8 ci-dessous.



Quant à t_{fa} , on le calculera analytiquement :

$$I_{\infty}^2 t_{fa} = \int_0^t I_a^2 dt \quad \text{or} \quad I_a = \sqrt{2} I'' e^{-t/Ta}$$

$$\text{donc } t_{fa} = \frac{\int_0^t (\sqrt{2} I'' e^{-t/Ta})^2 dt}{I_{\infty}^2} \quad \text{ou} \quad t_{fa} = 2 \left(\frac{I''}{I_{\infty}} \right)^2 \int_0^t e^{-2t/Ta} dt$$

$$t_{fa} = \beta''^2 Ta (1 - e^{-2t/Ta}) \quad \left\{ \begin{array}{l} Ta \text{ est de l'ordre de} \\ 0,05 \text{ seconde} \\ t \text{ temps de CC} = 0,1 \text{ sec} \end{array} \right.$$

d'où $e^{-2t/Ta} = e^{-0,2/0,05} = e^{-4} \approx 0$ (valeur très petite)

$$\text{ce qui donne } \underline{t_{fa} = \beta''^2 Ta}$$

$$\text{Finalement } \frac{I}{S^2} \int_0^t i^2 dt = A(\theta_f) - A(\theta_i) = \frac{I}{S^2} I_{\infty}^2 t_f$$

$$\text{où } S^2 = \frac{I_{\infty}^2 t_f}{A(\theta_f) - A(\theta_i)} \quad S = \frac{I_{\infty} \sqrt{t_f}}{\sqrt{A(\theta_f) - A(\theta_i)}}$$

$$\text{On pose } \sqrt{A(\theta_f) - A(\theta_i)} = C$$

La valeur de C est donnée pour certains matériaux en fonction de la température limite, telle que pour le cuivre où l'on ne doit pas dépasser la température de 250°C pendant le temps du CC.

En régime de fonctionnement normal, la température maximum admissible est de l'ordre de 70°C.

La température du milieu ambiant étant comprise entre 25 et 30°C, les valeurs de C sont:

	Câbles à $U \leq 10 \text{ kV}$	Câbles 20 : 35 kV
Cuivre	C = 140	C = 110
Aluminium	C = 85	C = 70

XI - 7.77 VERIFICATION des CONDUCTEURS
à la STABILITE THERMIQUE

Pour ce calcul, on choisira les points de court-circuit pour lesquels le conducteur se trouvera en amont.

En tant qu'application, considérons toujours l'exemple du point de CC K18 :

- Pour le régime de fonctionnement normal, le conducteur en amont a les caractéristiques suivantes :

$$\begin{aligned}
 S_n &= 400 \text{ mm}^2 \\
 I_n &= 560 \text{ A (courant nominal qui le traverse)} \\
 U_n &= 380 \text{ V} \\
 S_p &= 370 \text{ kVA (la puissance qu'il transite)}
 \end{aligned}$$

- en régime défavorable :

$$\left. \begin{aligned}
 I'' &= 11,7 \text{ kA} \\
 I_{\infty} &= 10,65 \text{ kA}
 \end{aligned} \right\} \text{ d'où on tire } \beta'' = \frac{I''}{I_{\infty}} = 1,1$$

A l'aide de la courbe 8 $t_{fp} = f(\beta'')$, on tire t_{fp} pour un t_{cc} (temps de CC) $\approx 0,2$ sec

$$\underline{t_{fp} = 0,2 \text{ sec}}$$

Pour $t_{fa} = \beta''^2 \cdot T_a$ $T_a \approx 0,05$ donc $t_{fa} = (1,1)^2 \cdot 0,05$

$$\underline{t_{fa} = 0,06 \text{ sec}}$$

$$t_f = t_{fp} + t_{fa} = 0,26 \text{ sec} \implies \underline{t_f \approx 0,26 \text{ sec}}$$

Donc $S_{cc} = \frac{I_{\infty}}{C} \cdot \sqrt{t_f} = \frac{10650}{140} \cdot \sqrt{0,26} = 38,5 \text{ mm}^2$

$$\underline{S_{cc} = 38,5 \text{ mm}^2}$$

La section qui résistera pendant le CC sera $S_{cc} = 38,5 \text{ mm}^2$ ($\approx 40 \text{ mm}^2$) , ce qui veut dire que la section $S_n = 400 \text{ mm}^2$ choisie en régime normal résistera à ce CC.

Dans le cas où l'on trouverait une section S_{cc} supérieure à S_n , on augmenterait la section S_n à la section normalisée immédiatement supérieure à S_{cc} soit S'_n .

Après cela, on refera le chemin inverse. On déterminera le temps maximum pour lequel la section choisie S_n ou éventuellement S'_n résistera au CC de la manière suivante :

$$S_n = \frac{I_{\infty}}{C} \sqrt{t_f} \rightarrow t_f = \left(\frac{S_n \cdot C}{I_{\infty}} \right)^2 \quad \text{or} \quad t_{fa} = \beta''^2. T_a \text{ res-}$$

tera constant.

$$\rightarrow t_{fp} + t_{fa} = \left(\frac{S_n \cdot C}{I_{\infty}} \right)^2 \rightarrow t_{fp} = \left(\frac{S_n \cdot C}{I_{\infty}} \right)^2 - t_{fa}$$

et à l'aide des courbes 8 $t_{fp} = f(\beta'')$, β'' étant donné on aura ce temps maximum t'_{cc} et qui servira justement au temps maximum à ne pas dépasser pour notre protection.

$$\text{donc } t_{fp} = \left(\frac{S_n \cdot C}{I_{\infty}} \right)^2 - t_{fa} \quad \text{avec } \begin{cases} S_n = 400 \text{ mm}^2 \\ t_{fa} = 0,06 \text{ sec} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{t_{fp} \approx 26 \text{ sec}}}$$

D'après les courbes 8 $\rightarrow t_{cc} \approx 20 \text{ sec}$ (qui dépasse d'ailleurs ce que nous fournit l'abaque).

Cela signifie que le câble supporte le court-circuit pendant un temps largement suffisant afin de mettre en jeu la protection.

Dans les autres cas, on essayera d'assurer un temps d'au moins $t_{cc} \geq 2$ à 5 sec pour limiter les échauffements exagérés dans notre conducteur.

Ce calcul sera donc répété pour tous les points de CC en aval d'un conducteur ou câble dans notre installation dont nous regroupons les résultats dans le tableau 7 suivant:

Tableau des sections vérifiées thermiquement

Lieu de CC en aval d'un conducteur	I'' en kA	I _{cc} en kA	Sections nominales S _n en mm ²	t _{cc} en sec	Sections corrigées S' _n en mm ²	t' _{cc} en sec
K ₃ = K ₄	9,6	6,98	16	< 0,1	70	2
K ₈ = K' ₈	14,8	13,4	185	2	-	-
K ₉						
K ₁₀ = K' ₁₀	14,4	13,1	25	< 0,1	50	0,25
K ₁₁ = K' ₁₁						
K ₁₂ = K' ₁₂						
K ₁₆ = K' ₁₆	13,2	12	400	# 20	-	-
K ₁₇ = K' ₁₇						
K ₁₈ = K' ₁₈	11,7	10,65	400	# 25	-	-
K ₁₉ = K' ₁₉	11,4	10,3	95	2	-	-
K ₂₀	6,1	5,55	16	< 0,1	25	0,4
K ₂₁	10,9	9,9	185	7	-	-
K ₂₂	11,4	10,3	70	1,1	-	-
K ₂₃	9,5	8,65	95	2,5	-	-
K ₂₄ = K' ₂₄	6,1	5,55	16	< 0,1	25	0,4

Tableau : 7

XII - 7 H U T E de T E N S I O N
- * + - + - + - + - + - + - + - + - + -

Le transfert d'énergie est lié par la condition que celui-ci ne doit pas s'accompagner d'une chute de tension exagérée. On veillera à ne pas dépasser les chutes de tension suivantes :

- Réseaux de distribution BT - U_{adm} : 3 à 5 % de U_n
- MT - U_{adm} : 3 à 6 %
- H - U_{adm} : 5 à 8 %

Dans notre étude, on se trouve en MT qui concerne la force motrice. On tiendra compte d'une chute de tension admissible ΔU_{adm} de 3 à 6 % de U_n .

$$\Delta U \% = \frac{P.R + Q.X}{10.U^2} \quad \rightarrow \quad \begin{cases} P & \text{en kW} \\ Q & \text{en kVA} \\ U & \rightarrow \text{kV} \end{cases}$$

Pour cela, on se référera aux tableaux de puissances afin d'avoir les puissances de pointe et aux courbes 3 et 4 des réactances et résistances en fonction de la section S_n ou S'_n . Les distances sont données sur le schéma unifilaire.

* Application pour le conducteur en amont au point K_{I8}

$$U_n = 0,380 \text{ kV} ; \begin{cases} P_p = 330 \text{ kW} \\ Q_p = 168 \text{ kVA} \end{cases} ; S_n = 400 \text{ mm}^2 ; L = \begin{matrix} 15 \text{ m} \\ = 0,015 \text{ km} \end{matrix}$$

$$\text{Les abaques 3 et 4 donnent : } \rightarrow \begin{cases} r = 0,07 \text{ } \Omega/\text{km} \\ x = 0,06 \text{ } \Omega/\text{km} \end{cases}$$

$$\Delta U \% = \frac{330.(0,07.0,015) + 168(0,06.0,015)}{10.(0,380)^2} = 0,45 \%$$

$$\underline{\Delta U = 0,45 \%} \quad \text{la chute de tension dans le conducteur est faible} \quad \Delta U < \Delta U_{adm} = 6 \%$$

Dans le cas où la chute de tension trouvée dépasse la chute de tension admissible, on augmentera la section du conducteur, sa résistance et sa réactance diminueront et l'on fera vérifier la relation suivante :

$$\Delta U \% \leq \Delta U_{adm} \%$$

+ Vérification des conducteurs à la chute de tension

| conducteur en amont des points | S_n en mm^2 | L en m | U en % | sections corrigées S_n'' en mm^2 | U en % |
|--------------------------------|-----------------|--------|---------------------|--------------------------------------|--------|
| $K_3 = K_4$ | 70 | 40 | $2,5 \cdot 10^{-4}$ | - | - |
| $K_8 = K_9$ | 185 | 31 | $3,2 \cdot 10^{-3}$ | - | - |
| K_9 | 185 | 44 | $1,2 \cdot 10^{-3}$ | - | - |
| $K_{10} = K'_{10}$ | 50 | 15 | $6,2 \cdot 10^{-3}$ | - | - |
| $K_{11} = K'_{11}$ | | | | | |
| $K_{12} = K'_{12}$ | 50 | 15 | $6,5 \cdot 10^{-3}$ | - | - |
| $K_{16} = K'_{16}$ | 400 | 15 | 0,086 | - | - |
| $K_{17} = K'_{17}$ | | | | | |
| $K_{18} = K'_{18}$ | 400 | 15 | 0,45 | - | - |
| $K_{19} = K'_{19}$ | 95 | 35 | 0,36 | - | - |
| K_{20} | 25 | 40 | 3,8 | - | - |
| K_{21} | 185 | 40 | 0,65 | - | - |
| K_{22} | 70 | 4 | $9 \cdot 10^{-2}$ | - | - |
| K_{23} | 95 | 50 | 0,7 | - | - |
| $K_{24} = K'_{24}$ | 25 | 45 | 0,35 | - | - |

Tableau : 8

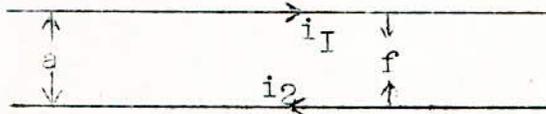
On remarque que toutes les sections ^{sont} vérifiées en chute de tension (cela provient qu'il s'agit de faibles distances).

XIII - LZ ES EFFORTS ELECTRODYNAMIQUES

-----ooo00ooo-----

Deux conducteurs parcourus par des courants électriques i_1 et i_2 sont soumis à des forces :

- attractives si les 2 courants sont de même sens
- répulsives pour des courants de sens contraires.



La force électrodynamique par unité de longueur s'exprime :

$$f = \frac{\mu_0}{2 \cdot \Pi \cdot a} \cdot i_1 \cdot i_2 \quad \left\{ \begin{array}{l} \mu_0 = \text{perméabilité} \\ \text{du milieu} \end{array} \right.$$

* Cas d'un circuit monophasé $i = i_m \sin wt$

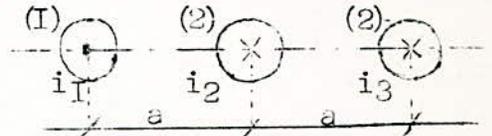
$$\rightarrow f = \frac{\mu_0}{2 \cdot \Pi \cdot a} i_m^2 \sin^2 wt = \frac{\mu_0}{2 \cdot \Pi \cdot a} i_m^2 \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2wt \right]$$

Cette force a une composante constante: $\frac{\mu_0}{4 \cdot \Pi \cdot a} i_m^2$

et une composante sinusoidale périodique de double

fréquence : $\frac{\mu_0}{4 \cdot \Pi \cdot a} i_m^2 \cos 2wt$

* Cas d'un court-circuit triphasé dont les 3 barres sont Parallèles et dans le même plan :



$$\begin{cases} i_1 = i_m \sin wt \\ i_2 = i_m \sin (wt - \frac{2\Pi}{3}) \\ i_3 = i_m \sin (wt - \frac{4\Pi}{3}) \end{cases}$$

On a considéré le cas où $i_1 = i_m \sin(wt + \alpha - \phi) \Rightarrow \alpha - \phi = 0$

Ce qui donne pour les forces:

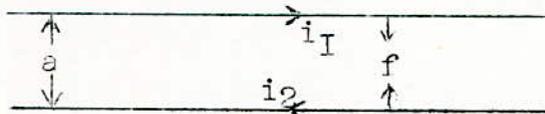
$$\begin{cases} f_1 = f'_{12} + f'_{13} = \frac{\mu_0}{2\Pi a} i_1 i_2 + \frac{\mu_0}{2\Pi a} i_1 i_3 = \frac{\mu_0}{2\Pi a} i_1 (i_2 + \frac{i_3}{2}) : \text{barres 1 et 3} \\ f_2 = f'_{23} + f'_{21} = - \left[\frac{\mu_0}{2\Pi a} i_2 i_3 - \frac{\mu_0}{2\Pi a} i_1 i_2 \right] = - \frac{\mu_0}{2\Pi a} i_2 (i_3 - i_2) : \text{barre 2} \end{cases}$$

XIII - LZ ES EFFORTS ELECTRODYNAMIQUES

-----ooOoo-----

Deux conducteurs parcourus par des courants électriques i_1 et i_2 sont soumis à des forces :

- attractives si les 2 courants sont de même sens
- répulsives pour des courants de sens contraires.



La force électrodynamique par unité de longueur s'exprime :

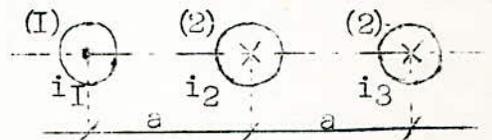
$$f = \frac{\mu_0}{2 \cdot \Pi \cdot a} \cdot i_1 \cdot i_2 \quad \left\{ \begin{array}{l} \mu_0 = \text{perméabilité} \\ \text{du milieu} \end{array} \right.$$

* Cas d'un circuit monophasé $i = i_m \sin wt$

$$\rightarrow f = \frac{\mu_0}{2 \cdot \Pi \cdot a} i_m^2 \sin^2 wt = \frac{\mu_0}{2 \cdot \Pi \cdot a} i_m^2 \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2wt \right]$$

Cette force a une composante constante: $\frac{\mu_0}{4 \cdot \Pi \cdot a} i_m^2$
 et une composante sinusoidale périodique de double fréquence : $\frac{\mu_0}{4 \cdot \Pi \cdot a} i_m^2 \cos 2wt$

* Cas d'un court-circuit triphasé dont les 3 barres sont Parallèles et dans le même plan :



$$\begin{cases} i_1 = i_m \sin wt \\ i_2 = i_m \sin (wt - \frac{2\Pi}{3}) \\ i_3 = i_m \sin (wt - \frac{4\Pi}{3}) \end{cases}$$

On a considéré le cas où $i_1 = i_m \sin(wt + \alpha - \phi) \Rightarrow \alpha - \phi = 0$

Ce qui donne pour les forces:

$$\begin{cases} f_1 = f'_{12} + f'_{13} = \frac{\mu_0}{2\Pi a} i_1 i_2 + \frac{\mu_0}{2\Pi a} i_1 i_3 = \frac{\mu_0}{2\Pi a} i_1 (i_2 + \frac{i_3}{2}) : \text{barres 1 et 3} \\ f_2 = f'_{23} + f'_{21} = - \left[\frac{\mu_0}{2\Pi a} i_2 i_3 - \frac{\mu_0}{2\Pi a} i_1 i_2 \right] = - \frac{\mu_0}{2\Pi a} i_2 (i_3 - i_2) : \text{barre 2} \end{cases}$$

Ces 2 équations peuvent s'écrire :

$$f_1 = \frac{\mu_0}{2 \cdot \Pi \cdot a} i_{\max}^2 \sin wt \left[\sin(wt - \frac{2\Pi}{3}) + \frac{1}{2} \sin(wt - \frac{4\Pi}{3}) \right]$$

$$f_2 = - \frac{\mu_0}{2 \cdot \Pi \cdot a} i_{\max}^2 \sin(wt - \frac{2\Pi}{3}) \left[\sin(wt - \frac{4\Pi}{3}) - \sin wt \right]$$

Les valeurs extrêmes de ces 2 forces qui donnent la plus grande sollicitation, s'obtiennent en annulant leurs dérivées par rapport au temps d'où :

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{1\max} = 0,81 \cdot \frac{\mu_0}{2\Pi a} \cdot i_{\max}^2 = f_{3\max} \\ f_{3\max} \simeq 0,87 \cdot \frac{\mu_0}{2\Pi a} \cdot i_{\max}^2 \end{array} \right.$$

Dans le cas défavorable pour les efforts électrodynamiques correspond au courant de choc et en circuit inductif, ce qui se résume par : $I_m = 0 ; t = 0 ; \alpha = 0$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1 = i_{pm} \left[\sin(wt + \psi) - e^{-t/Ta} \cdot \sin \psi \right] \\ i_2 = i_{pm} \left[\sin(wt + \psi - \frac{2\Pi}{3}) - e^{-t/Ta} \sin(\psi - \frac{2\Pi}{3}) \right] \\ i_3 = i_{pm} \left[\sin(wt + \psi - \frac{4\Pi}{3}) - e^{-t/Ta} \sin(\psi - \frac{4\Pi}{3}) \right] \end{array} \right.$$

avec $i_{pm} = \sqrt{2} I''$ et $I'' =$ valeur efficace du courant de CC.

$$\psi = \alpha - \phi_k$$

La force f_2 s'écrit :

$$f_2 = - \frac{\mu_0}{2\Pi a} 2I''^2 \left[\sin(wt + \psi - \frac{2\Pi}{3}) - e^{-t/Ta} \sin(\psi - \frac{2\Pi}{3}) \right] \times$$

$$\left\{ \sin(wt + \psi - \frac{4\Pi}{3}) - \sin(wt + \psi) - e^{-t/Ta} \left[\sin(\psi - \frac{2\Pi}{3}) - \sin \psi \right] \right\}$$

Après transformations trigonométriques :

$$f_2 = - \frac{\mu_0}{2\Pi a} 2I''^2 \left[- \cos(wt + \psi - \frac{\Pi}{6}) + e^{-t/Ta} \cos(\psi - \frac{\Pi}{6}) \right] \times$$

$$\left[\sqrt{3} \sin(wt + \psi - \frac{\Pi}{6}) + e^{-t/Ta} \cdot \sqrt{3} \sin(\psi - \frac{\Pi}{6}) \right]$$

- 77 -

$$\text{ou } f_2 = \frac{\mu_0}{2\pi I a} 2I''^2 \frac{\sqrt{3}}{2} \left[\underbrace{\sin(2\omega t + 2\psi - \frac{\pi}{3})}_{\text{double fréquence}} - 2 \underbrace{e^{-t/T_a} \sin(\omega t + 2\psi - \frac{\pi}{3})}_{\text{1 fréquence}} \right] +$$

comp. non amortie C_1 comp. amortie C_2

$$+ e^{-\frac{t}{T_a}} \frac{1}{2} \sin(2\psi - \frac{\pi}{3}) \Bigg]$$

ne dépend pas de la fréquence

comp. non périodique non constante C_3

donc $f_2 = Q (C_1 + C_2 + C_3)$ ou $f_2 = h (t , \psi)$
 et $\psi = \alpha - \varphi_k$

Calculons la valeur maximum de f_2

On pose $2\psi - \frac{\pi}{3} = 0$ la relation se simplifia
 et par suite :

$$f_2 = \frac{\mu_0}{2\pi I a} 2I''^2 \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\underset{\uparrow C'_1}{\sin 2\omega t} - 2 \underset{\uparrow C'_2}{e^{-t/T_a} \sin \omega t} \right)$$

On représentera la variation de C'_1 composante à fréquences double et d'amplitude fixe et C'_2 celle à fréquence normale et amplitude variable.

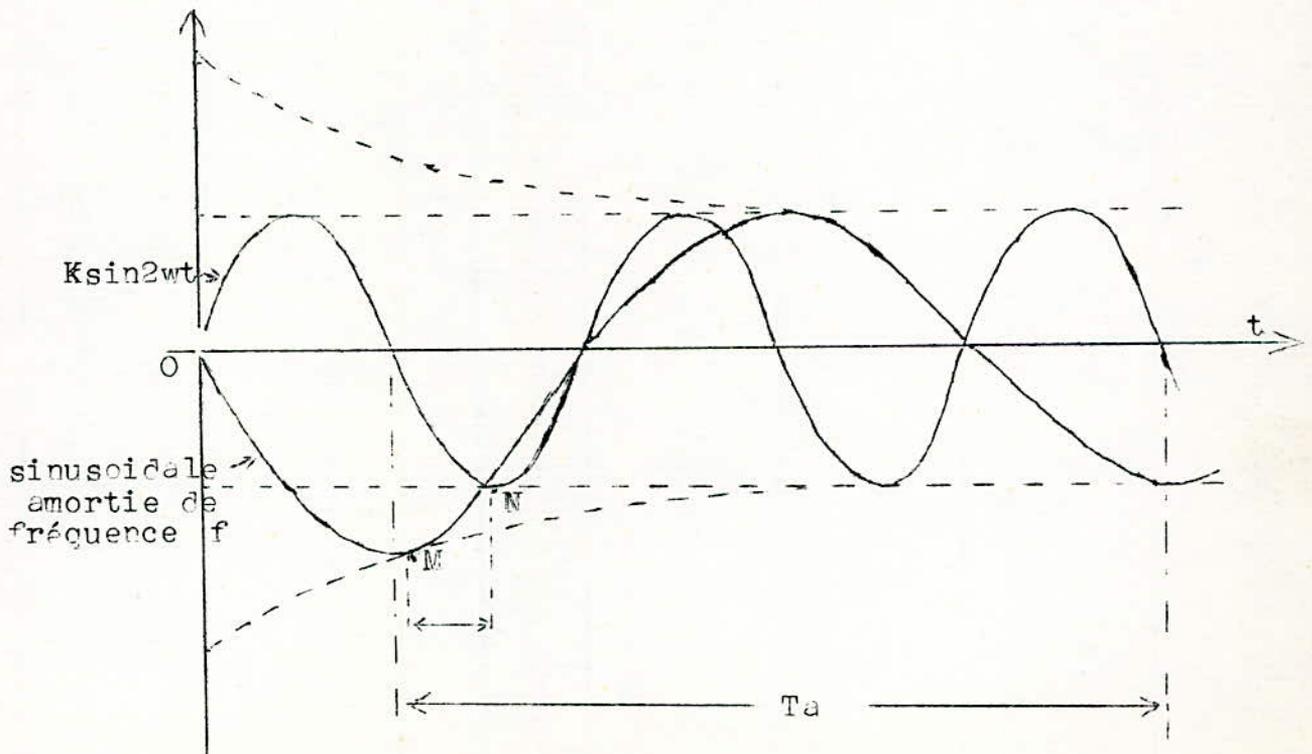


fig. 8

La situation la plus défavorable se trouve quand les points M et N se situeraient au même instant (voir fig. 8)
 Donc la solution $2\psi - \frac{\pi}{3} = 0$ n'est pas valable.

$$\text{Le point M s'obtient quand } 2\omega t + 2\psi - \frac{\pi}{3} = \frac{3\pi}{2} \quad (a)$$

$$\text{et le point N " " " } \omega t + 2\psi - \frac{\pi}{3} = \frac{\pi}{2} \quad (b)$$

On pourrait déduire la valeur de ψ et le temps t de la force maximum possible : f_2 .

En retranchant membre à membre (a) et (b), on aura :

$$(2\omega t + 2\psi - \frac{\pi}{3}) - (\omega t + 2\psi - \frac{\pi}{3}) = \frac{3\pi}{2} - \frac{\pi}{2}$$

$$\Rightarrow \omega t = \pi \rightarrow t = \frac{\pi}{2\pi f} = 0,01 \text{ sec } \quad \underline{t = 0,01 \text{ s}}$$

$$\text{La 2}^{\text{e}} \text{ équation nous donne pour } \omega t = \pi \rightarrow \psi = -\frac{\pi}{12}$$

La force maximum possible correspondant au courant de choc est = $f_{2\text{choc}} (t = 0,01 \text{ s } ; \psi = -\frac{\pi}{12} ; \omega t = \pi)$

$$\Rightarrow f_2 = \frac{\mu_0}{2\pi a} 2I''^2 \frac{\sqrt{3}}{2} \left[\sin(2\pi - \frac{2\pi}{12} - \frac{\pi}{3}) - 2e^{-0,01/Ta} \sin(\pi - \frac{2\pi}{12} - \frac{\pi}{3}) + e^{-0,01/Ta} \sin(-\frac{2\pi}{12} - \frac{\pi}{3}) \right]$$

$$\text{ou } f_2 = \frac{\mu_0}{2\pi a} 2I''^2 \frac{\sqrt{3}}{2} \left[\sin\frac{3\pi}{2} - 2e^{-0,01/Ta} \sin\frac{\pi}{2} + e^{-0,01/Ta} \sin(-\frac{\pi}{2}) \right]$$

$$\Rightarrow f_2 = \frac{\mu_0}{2\pi a} 2I''^2 \frac{\sqrt{3}}{2} \left[-1 - e^{-0,01/Ta} - e^{-0,01/Ta} \right]$$

carré parfait

$$\text{donc } f_2 = -0,87 \cdot \frac{\mu_0}{2\pi a} 2I''^2 (1 + e^{-0,01/Ta})^2 = f_{2\text{choc}}$$

$$\text{or } (1 + e^{-0,01/Ta})^2 = K_{\text{choc}} \text{ maximum qd } t=0,01 \text{ s}$$

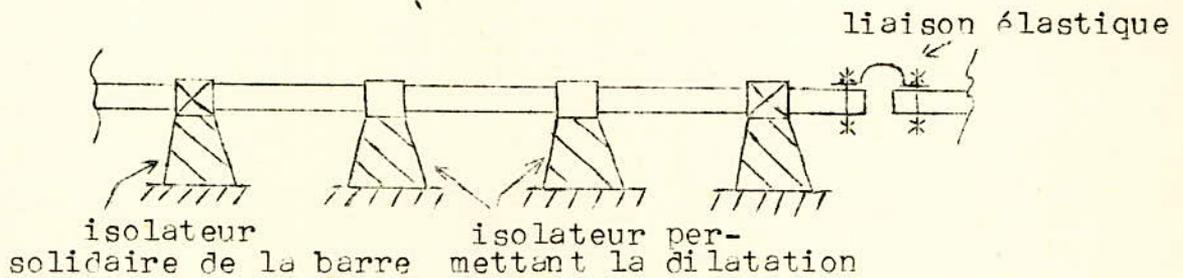
$$K_{\text{choc}} \simeq 1,8$$

$$f_{2\text{choc}} = -0,87 \frac{\mu_0}{2\pi a} K_{\text{choc}}^2 2 I''^2$$

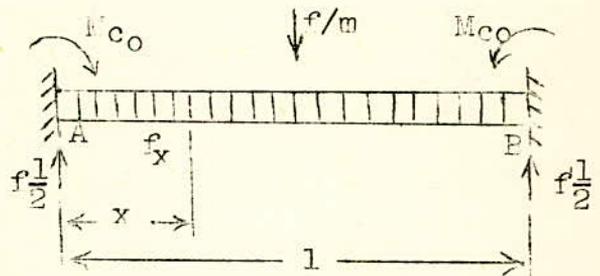
XIV - 77 TABILITE ELECTRODYNAMIQUE
des BARRES COLLECTRICES

Les barres collectrices des postes et centrales se trouvent posées sur des isolateurs-supports et la force due au courant qui les traverse est une charge uniformément répartie.

Le jeu de barres est constitué de tronçons jointifs par liaison élastique pour permettre la dilatation. Parmi les isolateurs, certains sont solidaires à la barre et les autres ne font que le supports et permettent également la dilatation du jeu de barres.



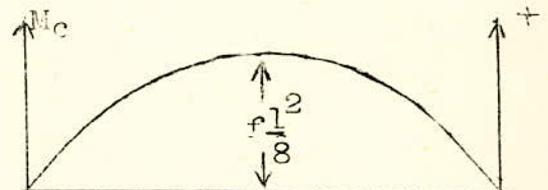
Notre barre se comporte comme étant doublement encadrée à double appui et à charge uniformément répartie (fig. ci-contre)



En appliquant les principes de la R.d.M. :

Le moment à la distance x est donné par

$$M_{c_x} = M_{c0} + f \frac{lx}{2} - f \frac{x^2}{2}$$



Le moment maximum se trouve au milieu de la barre, donc à $x = \frac{l}{2}$ et donc $M_{c_{max}} = f \cdot \frac{l^2}{8}$

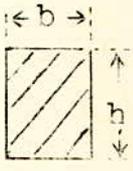
Mais pour une barre doublement encadrée : $M_{c_{max}} = f \cdot \frac{l^2}{12}$

On considère pour cela la situation intermédiaire moyenne

$$M_{cmax} = f \cdot \frac{l^2}{10} \quad \text{d'une barre semi-encastree}$$

Le module de resistance des materiaux est donne par

$$\sigma_{max} = \frac{M_{cmax}}{w} \quad \text{avec} \quad w = \frac{bh^2}{6} \quad \text{pour des barres rectangulaires}$$



Il faut faire verifier $\sigma_{max} \leq \sigma_{adm}$

$\rightarrow \sigma_{adm}$ = contrainte admissible de la barre.

Or $\sigma_{adm} < \sigma_{rup}$ $\rightarrow \sigma_{rup}$ est la contrainte de rupture du materiau

On introduira un coefficient de securite de 1,5 a 2 de maniere a avoir des efforts electrodynamiques toujours faibles

Jusqu'ici, on a considere des efforts statiques sur la barre. Il existe des forces dont les composantes sont proportionnelles a 2f (double frequence), a f (une fois la frequence) et a une composante aperiodique de constante de temps T_a et une composante aperiodique de constante de temps $\frac{T_a}{2}$.

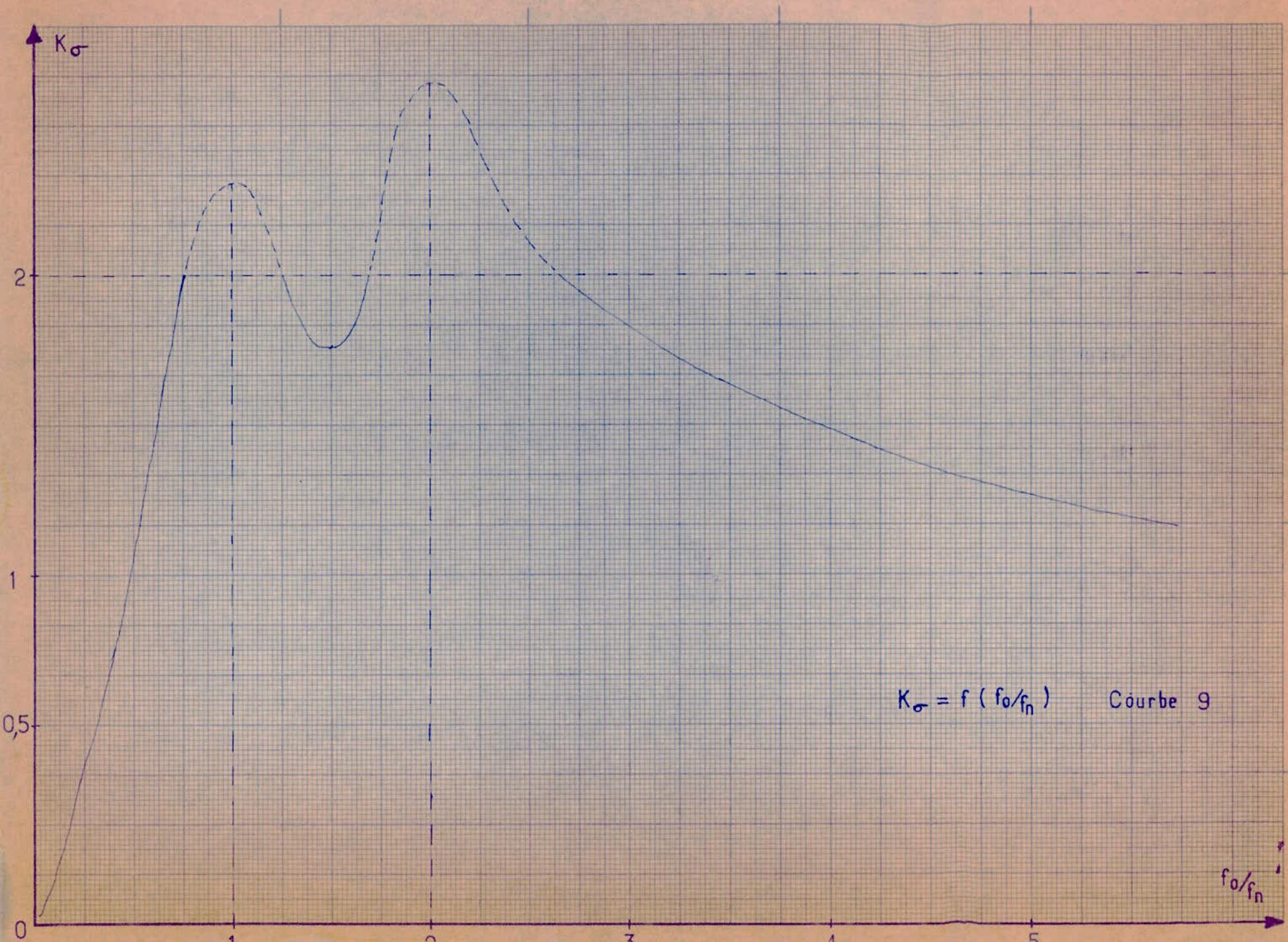
La barre risque d'avoir une frequence propre egale a celle des frequences des forces et par consequent le phenomene de resonance peut se produire.

Les frequences des 2 premieres oscillations resteront inchangees $f_1 = 100$ Hz et $f_2 = 50$ Hz car ce sont celles du reseau.

Par contre, on doit intervenir sur la frequence d'oscillation de la barre, soit sur ses dimensions soit modifier la distance entre les points d'appui.

$$\text{On a } \frac{\sigma_{max.dyn.}}{\sigma_{max.stat.}} = K_{\sigma} \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{max.dyn.} = \text{contrainte maximum dynamique} \\ \sigma_{max.stat.} = \text{contrainte maximum statique} \end{array} \right.$$

K_{σ} est donne par la courbe 9; $K_{\sigma} = \left(\frac{f_0}{f_n}\right)$



$K_\sigma = f(f_0/f_n)$ Courbe 9

Il est préférable de se situer à $K_0 < 1 \rightarrow \frac{f_0}{f_n} < 0,5$
 ou $\frac{f_0}{f_n} > 3$

La détermination de la fréquence propre de la barre est donnée par :

$$f_0 = C_1 \cdot C_2 \cdot \frac{3}{412} \sqrt{\frac{E \cdot J}{\rho \cdot q}}$$

C_1 est un coefficient: pour une barre simple
 $C_1 = 1$

C_2 tient compte des barres dérivations aux appareils

E = module d'élasticité

$$\begin{cases} E_{\text{cuivre}} = 13000 \text{ kgf/mm}^2 \\ E_{\text{aluminium}} = 7000 \text{ kgf/mm}^2 \end{cases}$$

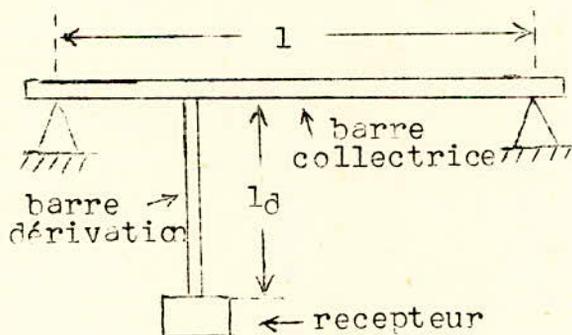
J = moment d'inertie pour la section considérée de la barre

ρ = densité du matériau

$$\begin{cases} \rho_{\text{cuivre}} = 8,9 \cdot 10^3 \text{ kgf/m}^3 \\ \rho_{\text{aluminium}} = 2,7 \cdot 10^3 \text{ kgf/m}^3 \end{cases}$$

q = section de la barre

Dans le cas où on dispose de barres : dérivations qui desservent les appareils, le coefficient C_2 varie, et il sera de même pour le moment d'inertie de la barre : J



- $J_d = J$ si $l_d \leq 0,6l$

la barre dérivation étant rigide

- $J_d < J$ si $l_d < 0,3l$

Deux cas peuvent se présenter: celui où la barre dérivation est rigide de longueur l_{dr} ou élastique l_{de}

Le coefficient C_2 se calcule dans les 2 cas par :

$$C_{2r} = \sqrt{\frac{I + \frac{I}{64} \cdot \frac{J_r}{J} \left(\frac{l}{l_{dr}}\right)^3 u_r}{I + 0,6 \cdot \frac{q_r}{l} \cdot \frac{l_r}{l} u_r}}$$

$$C_{2e} = \sqrt{\frac{I + \frac{I}{16} \cdot \frac{J_e}{J} \left(\frac{l}{l_e}\right)^3 u_e}{I + \frac{q_e}{q} \cdot \frac{l_e}{l} u_e}}$$

q_r et q_e sont les sections des barres rigides ou élastiques
 u_r et u_e facteurs de non symétrie et sont donnés par la
 courbes IO $u = f\left(\frac{la}{l}\right)$

avec la = distance entre la barre dérivation et l'isolateur le plus proche

Dans le cas de plusieurs barres dérivations rigides et élastiques, on a /

$$C_2 = \sqrt{\frac{I + \frac{I}{64} \sum_r \frac{J_r}{J} \left(\frac{l}{l_r}\right)^3 u_r + \frac{I}{16} \sum_e \frac{J_e}{J} \left(\frac{l}{l_e}\right)^3 u_e}{I + 0,6 \sum_r \frac{q_r}{q} \cdot \frac{l_r}{l} u_r + \sum_e \frac{q_e}{q} \frac{l_e}{l} u_e}}$$

D'après la relation : $\sigma_{dyn} = K_\sigma \cdot \sigma_{stat}$

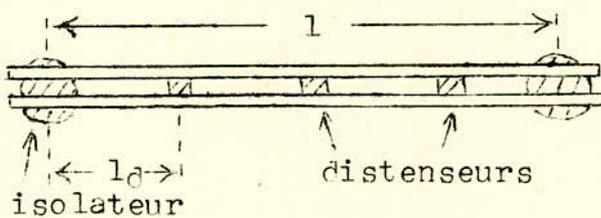
et $\sigma_{dyn} \leq 2 \sigma_{courbure} \leftarrow$ limite d'élasticité

$$\Rightarrow \sigma_{dyn} \leq 2 \sigma_{0,2c}$$

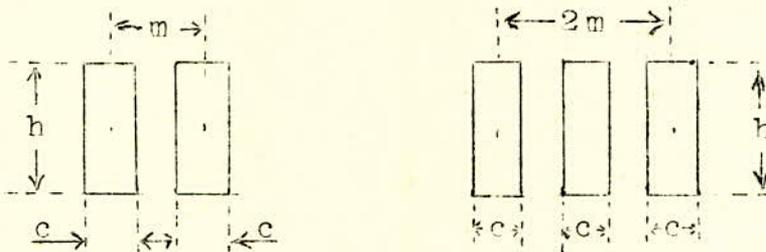
$$\begin{cases} \sigma_{0,2c}^{cuivre} = 2400 \text{ kgf/cm}^2 \\ \sigma_{0,2c}^{aluminium} = 700 \text{ kgf/cm}^2 \end{cases}$$

Jusqu'ici, on a considéré une seule barre collectrice. Mais il existe des barres formées de 2 ou 3 autres élémentaires.

Le coefficient C_I se détermine par Abaque / $\left\{ \begin{array}{l} C_I = f\left(\frac{M}{t m l}\right) \\ \text{pour différents } K \end{array} \right.$

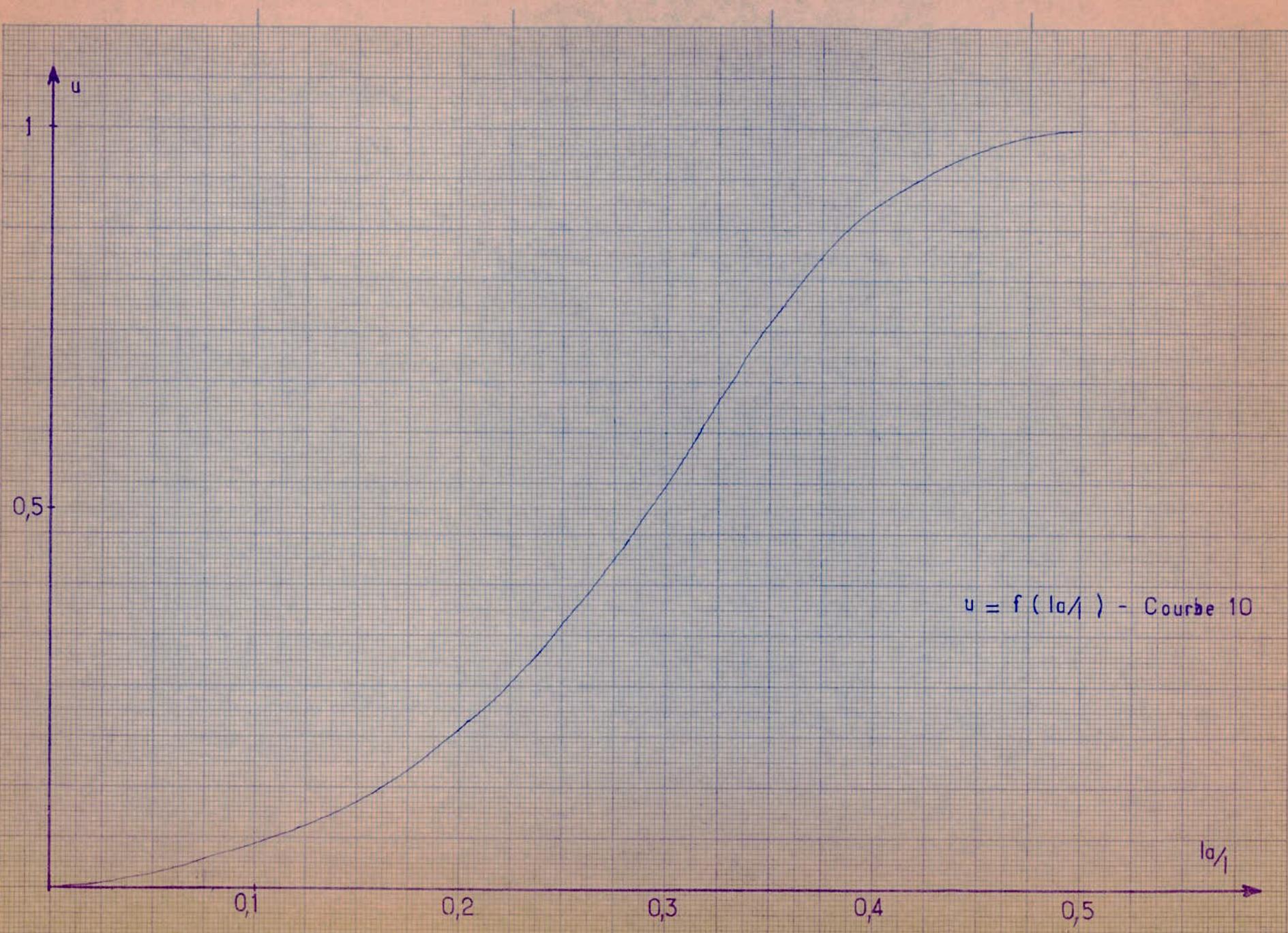


M = masse de la barre
 t = nombre de barres = 2
 l = longueur de la barre
 $m = \frac{I}{l_d^2}$ et K : nombre de distenseurs = 3



Etude de la répartition des courants dans les barres

- élémentaires :
- 2 barres élémentaires : 50 % de I dans chacune d'elle
 - 3 barres élémentaires : 40 % pour chacune des barres extrêmes et 20 % de I pour celle du milieu.



$u = f(la/l) - \text{Courbe 10}$

- 84 -

* Expressions des forces de Choc

- 2 barres élémentaires :

$$f_{2\text{choc}} = K_f \frac{p_c}{2II} (0,5 \cdot 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I'')^2 \cdot \frac{I}{m}$$

- 3 barres élémentaires :

$$f_{I\text{choc}} = K_{f2I} \frac{p_c}{2II} (0,4 \cdot 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I'') \cdot (0,2 \cdot 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I'') \cdot \frac{I}{m} +$$

$$+ K_{f3I} \frac{p_c}{2II} (0,4 \cdot 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I'')^2$$

coefficients de proportionnalité de chacune des barres élémentaires.

$$" = f_{2I\text{choc}} + f_{3I\text{choc}}$$

Les coefficients K_f sont des coefficients de forme donnés par abaques:

$$K_f = f \left(\frac{m - c}{h + c} \right)$$

La vérification à la stabilité électrodynamique s'opère ainsi :

$$M_{\text{stat.}} = \frac{f_{I\text{choc}} \cdot l_d^2}{IO}$$

donc $\tilde{\sigma}_{\text{stat.}be} = \frac{M_{\text{stat.}}}{W_{be}}$ avec W_{be} : module de résistance de la barre élémentaire

Si $K_\sigma = 1 \rightarrow$ on peut appliquer $\tilde{\sigma}_{\text{dyn.}be} \approx \tilde{\sigma}_{\text{stat.}be}$

sinon $\rightarrow \sigma = \sigma_{ph} + \sigma_{be}$ avec $\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{ph} : \text{contrainte de la phase} \\ \sigma_{be} : \text{contrainte de la barre élémentaire} \end{array} \right.$

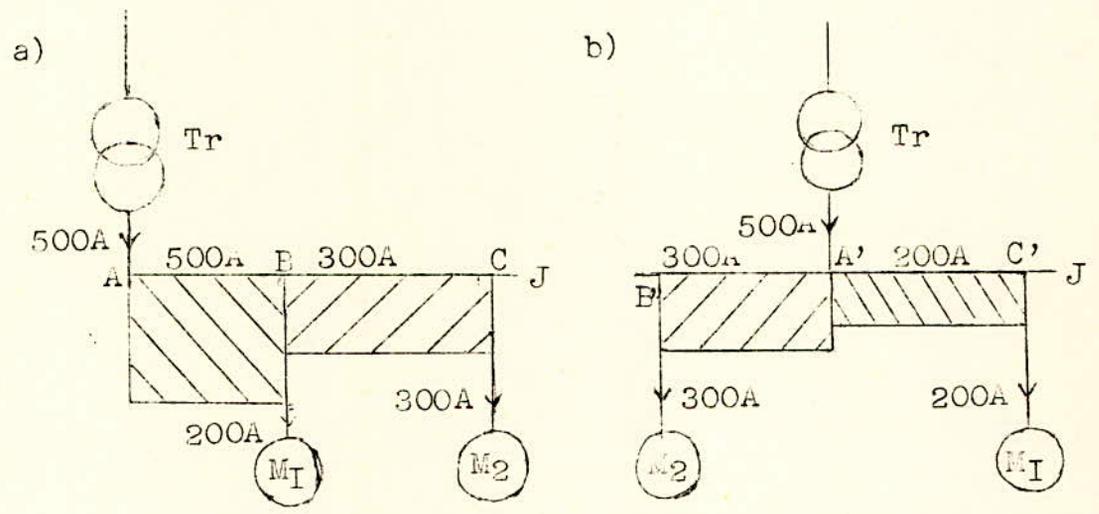
et $\sigma \ll 2\sigma_{0,2c}$

XV - VII) RINCIPE de DIMENSIONNEMENT
des JEUX de BARRES

La circulation du courant le long des Barres collectrices dépend de l'ordre de placement des diverses cellules et cette étude est importante pour le choix de la section optimum du jeu de barres ayant plusieurs départs et arrivées.

Il s'agit donc de répartir convenablement les départs et arrivées de manière à avoir un courant plus ou moins uniformisé circulant dans notre jeu de barres.

L'exemple suivant illustre cette explication :



Deux cas se présentent pour l'alimentation de ces 2 Moteurs

a) les moteurs sont placés du même côté de A

La portion AB est parcourue par le courant $I = 500A$

b) les moteurs sont placés de part et d'autre de A'

Dans ce cas, le courant maximum dans le jeu de barres devient de 300A dans la portion A'B'.

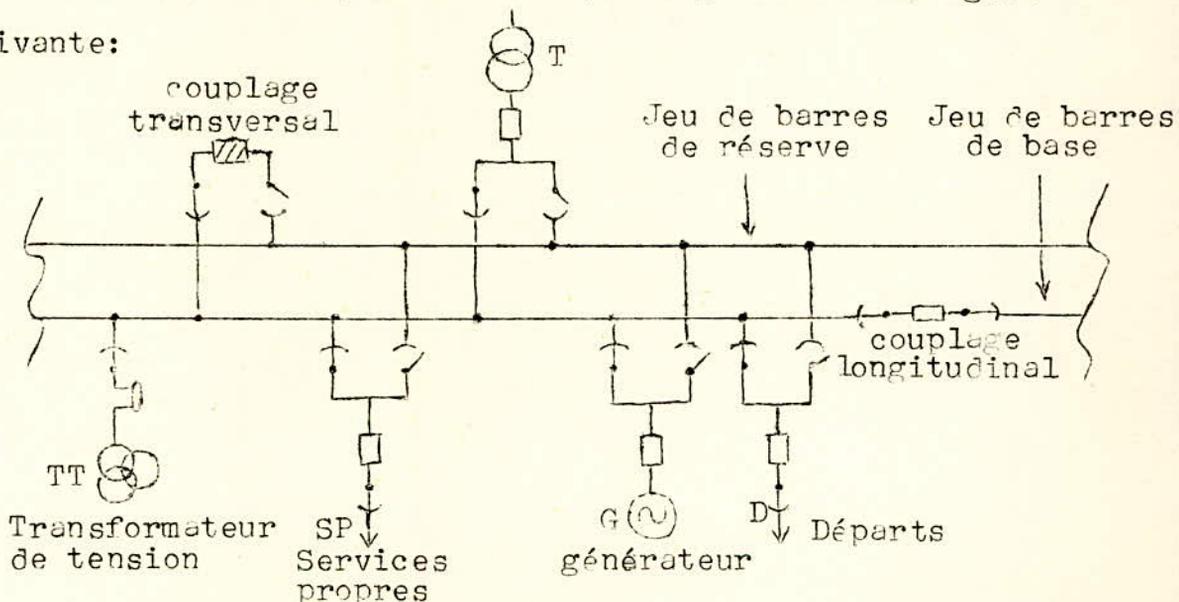
Si nous dimensionnons la barre d'après la charge de la portion AB, nous aurons un important surdimensionnement. Le placement des circuits semble plus correct dans la fig. b et on obtient une charge plus uniforme le long de la barre.

La circulation des courants le long des barres collectrices est établie tant en régime normal de fonctionnement qu'en divers régimes exceptionnels: exemple d'un générateur déconnecté puis chacun des autres à leur tour, des transformateurs etc.... On doit préciser les consommateurs qui peuvent être sacrifiés quand nous sommes obligés de faire une limitation d'énergie électrique et quelque fois, elle s'introduit en vue d'éviter une charge excessive sur un tronçon de barre en régime d'avarie.

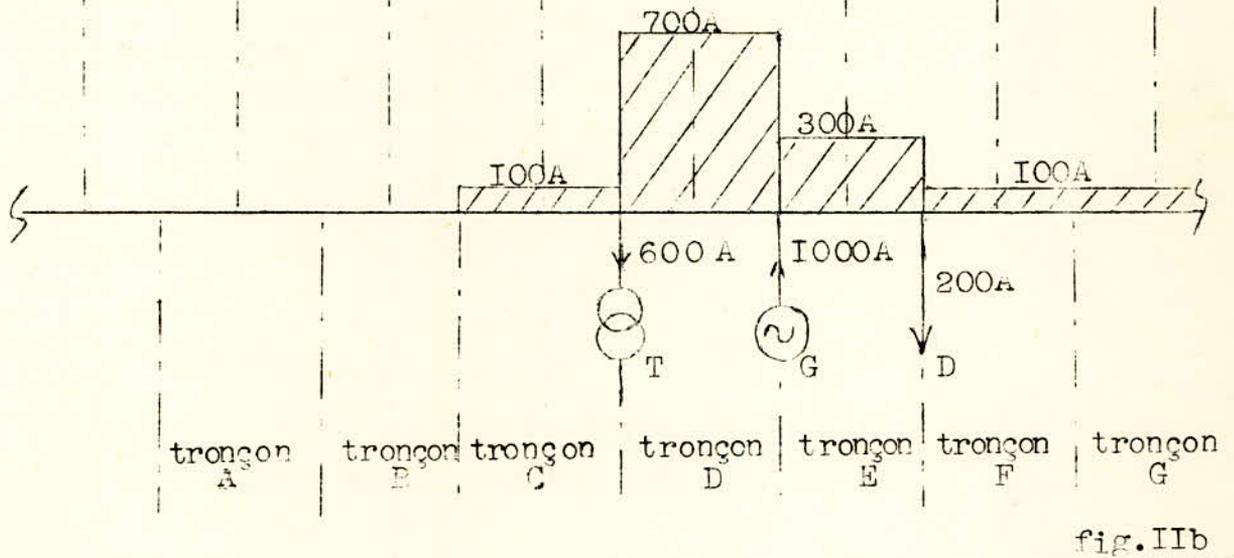
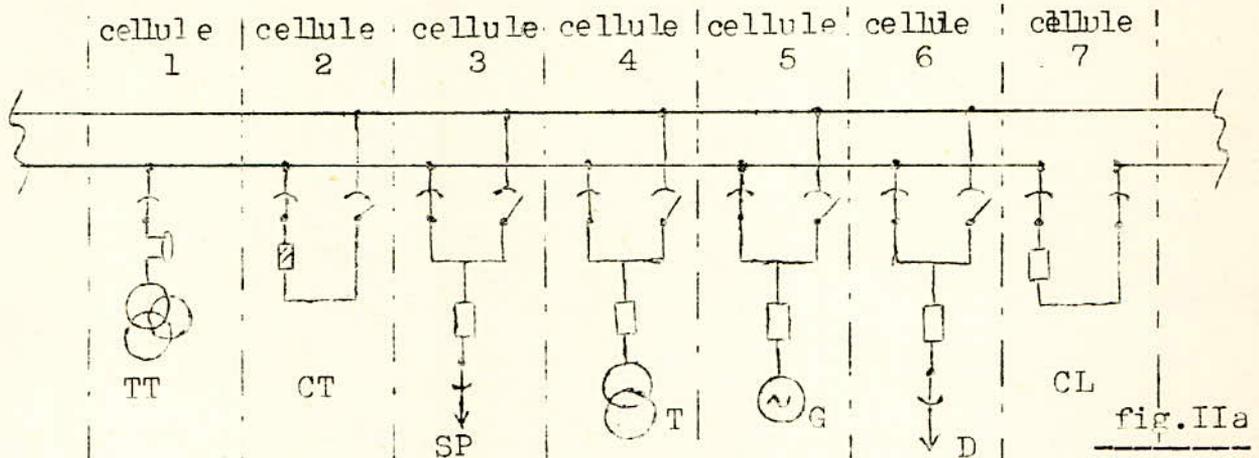
D'où, à l'établissement de la répartition des circuits le long des barres collectrices, on tiendra compte du régime normal de fonctionnement, du régime particulier et même du régime d'avarie.

En principe à une répartition ^{convenable} du nombre de départs et arrivées, il faut tenir compte du nombre de cellules en espace, de même que l'existence des cellules des couples et des transformateurs de mesure qui n'ont pas les mêmes dimensions que les cellules de départs.

La portion du schéma de principe donne la figure suivante:



En connaissant le schéma de principe (fig.9), il faut représenter sur une figure la meilleure répartition en cellule.



C'est un exemple de répartition des divers éléments du schéma mais non la meilleure solution.

Généralement, dans un bureau d'étude, les courbes de charge des consommateurs sont fournies. Elles sont très irrégulières et sous forme d'escalier (partie déjà exposée).

On prendra les courbes de charges journalières pour les jours caractéristiques de l'année, pour les périodes des 4 saisons de l'année, une courbe de charge pour un jour chargé de travail et une courbe pour un jour convenable. En somme, on aura 8 courbes de charges environ (2 pour chaque saison) à l'aide desquelles nous étudierons la meilleure répartition

des circuits le long du jeu de barres pour avoir un dimensionnement appréciable et une charge plus uniforme.

Un tableau du type ci-dessous regroupera toutes ces données:

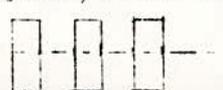
| Régimes de fonctionnement | Périodes d'après courbes de charges journalières | Courants sur les tronçons | | |
|---------------------------|--|---------------------------|-----------|-----|
| | | tronçon A | tronçon B | ... |
| Régime normal | 1 | | | |
| | 2 | | | |
| | 3 | | | |
| Générateur I déconnecté | 1 | | | |
| | 2 | | | |
| | 3 | | | |
| Tranfo. I déconnecté | 1 | | | |
| | 2 | | | |
| | 3 | | | |
| | | | | |

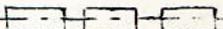
Ce tableau a été établi pour 3 périodes (1, 2 et 3) correspondant à une courbe de charge à 3 marches (T_1 , T_2 et T_3)

A partir de ce tableau, on repèrera sur chaque ligne le maximum de courant. On dimensionnera donc notre jeu de barre suivant la valeur minimum de ces maximums.

* Choix des barres collectrices en fonction de la chaleur dégagée en régime normal.

Les barres collectrices sont choisies pour une température qui ne dépasse pas 70°C en régime de fonctionnement normal. Cette température limite est établie d'après les conditions d'oxydation des contacts. Le tableau 9 donne les sections des barres en fonction des courants admissibles en régime normal de fonctionnement et pour une température $< 70^{\circ}\text{C}$.

Les valeurs du tableau 9 sont données pour des barres placées verticalement sur un même plan, dans le cas de 2 ou 3 barres élémentaires par phase. ---  ---

Si les barres sont disposées horizontalement  les courants du tableau doivent être diminués de 5% pour les barres de section jusqu'à 600mm² et de 8% au delà.

De plus, les courants admissibles ont été indiqués pour une température du milieu ambiant de 25°C. Si la température devient différente de cette valeur, les courants du tableau seront multipliés par un coefficient de correction donné par le tableau suivant:

| temp. du milieu ambiant °C | coef. de correction | temp. du milieu ambiant °C | coef. de correction |
|----------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|
| -5 | 1,29 | 25 | 1,00 |
| 0 | 1,24 | 30 | 0,94 |
| 5 | 1,20 | 35 | 0,88 |
| 10 | 1,15 | 40 | 0,81 |
| 15 | 1,11 | 45 | 0,74 |
| 20 | 1,05 | 50 | 0,67 |

* Tableau des sections de jeux de barres en fonction des courants admissibles

| Dimension de la barre | | | CUIVRE | | | ALUMINIUM | | |
|-----------------------|-------------|----------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| largeur
mm | épais
mm | section
mm ² | 1 barre
élé. | 2 bar.
élé. | 3 bar.
élé. | 1 bar.
élé. | 2 bar.
élé. | 3 bar.
élé. |
| 15 | 3 | 45 | 210 | - | - | 165 | - | - |
| 20 | | 60 | 275 | - | - | 251 | - | - |
| 25 | | 75 | 340 | - | - | 265 | - | - |
| 30 | | 90 | 405 | - | - | 305 | - | - |
| 30 | 4 | 120 | 475 | - | - | 365 | - | - |
| 40 | | 160 | 625 | - | - | 480 | - | - |
| 40 | 5 | 200 | 700 | - | - | 540 | - | - |
| 50 | | 250 | 860 | - | - | 665 | - | - |
| 60 | | 300 | 1025 | - | - | 705 | - | - |
| 50 | 6 | 300 | 955 | - | - | 740 | - | - |
| 60 | | 360 | 1125 | 1740 | 2240 | 870 | 1350 | 1720 |
| 80 | | 480 | 1480 | 2110 | 2720 | 1150 | 1630 | 2100 |
| 100 | | 600 | 1810 | 2470 | 3170 | 1425 | 1935 | 2500 |
| 60 | 8 | 480 | 1320 | 2160 | 2790 | 1025 | 1680 | 2180 |
| 80 | | 640 | 1690 | 2620 | 3370 | 1320 | 2040 | 2620 |
| 100 | | 800 | 2080 | 3060 | 3930 | 1625 | 2390 | 3050 |
| 120 | | 960 | 2400 | 3400 | 4340 | 1900 | 2650 | 3380 |
| 60 | 10 | 600 | 1475 | 2560 | 3300 | 1155 | 2010 | 2650 |
| 80 | | 800 | 1900 | 3100 | 3990 | 1480 | 2410 | 3100 |
| 100 | | 1000 | 2310 | 3610 | 4650 | 1820 | 2860 | 3650 |
| 120 | | 1200 | 2650 | 4100 | 5200 | 2070 | 3200 | 4100 |

XVII - II - CALCUL du JEU de BARRES 5,5 kV

Le problème que l'on se propose d'étudier consiste en la recherche du courant maximum du jeu de barres 5,5 kV (1GA, 12GB, 2GC), le placement des différents éléments le long de ces barres collectrices a été fait (établi par SONELGAZ).

Dans un premier temps, on considèrera que le courant appelé par un consommateur est la somme arithmétique des courants nominaux des différents moteurs.

Le jeu de barres se présente ainsi /

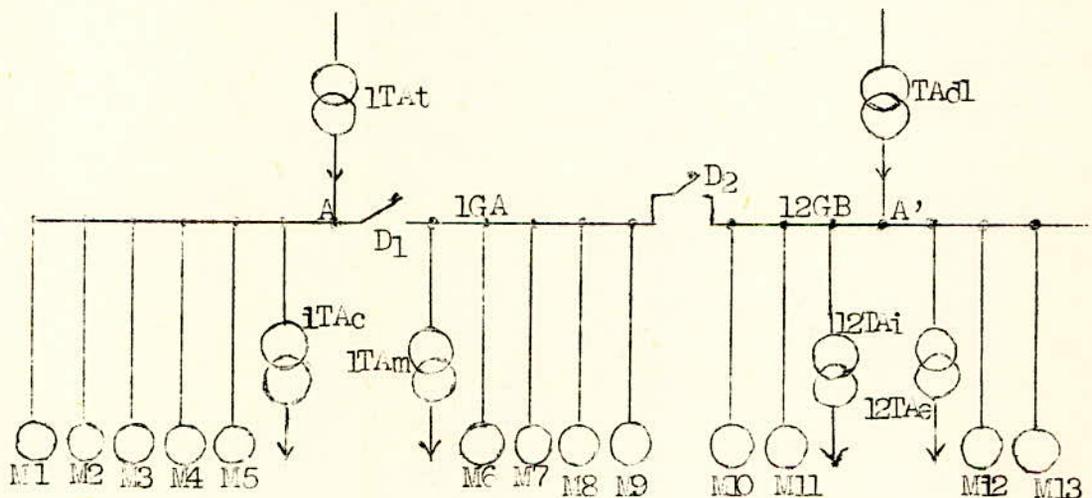


fig. 12

+ Calcul des courants appelés par les moteurs.

- Pompes alimentaires M1, M2, et M6 de 960 CV

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi \eta} = \frac{710}{\sqrt{3} \cdot 5,5 \cdot 0,9 \cdot 0,92} = 93 \text{ A}$$

- Ventilateurs soufflage-tirage M3 et M7 - 660 CV

$$I = 63 \text{ A}$$

- Pompes d'extraction M4 et M8 - 225 CV

$$I = 28 \text{ A}$$

- Pompes de circulation M5 et M9 - 195 CV

$$I = 18,5 \text{ A}$$

- Compresseur et surpresseur respectivement M10, M11, M12 et M13 de 150 CV - I = 14 A

Parmi les 9 moteurs du jeu de barres 1GA ou 2GC, 4 sont de réserve de même que sur les 4 moteurs du 12GB, 2 sont de réserve.

2 cas de fonctionnement peuvent se présenter :

A/ - marche normale

1TAt alimente 1GA (ou 2TAt alimente 2GC)

TAd1 alimente 12GB

Le disjoncteur D₂ reste ouvert

Tous les moteurs de réserve sont situés du même côté de la branche d'alimentation.

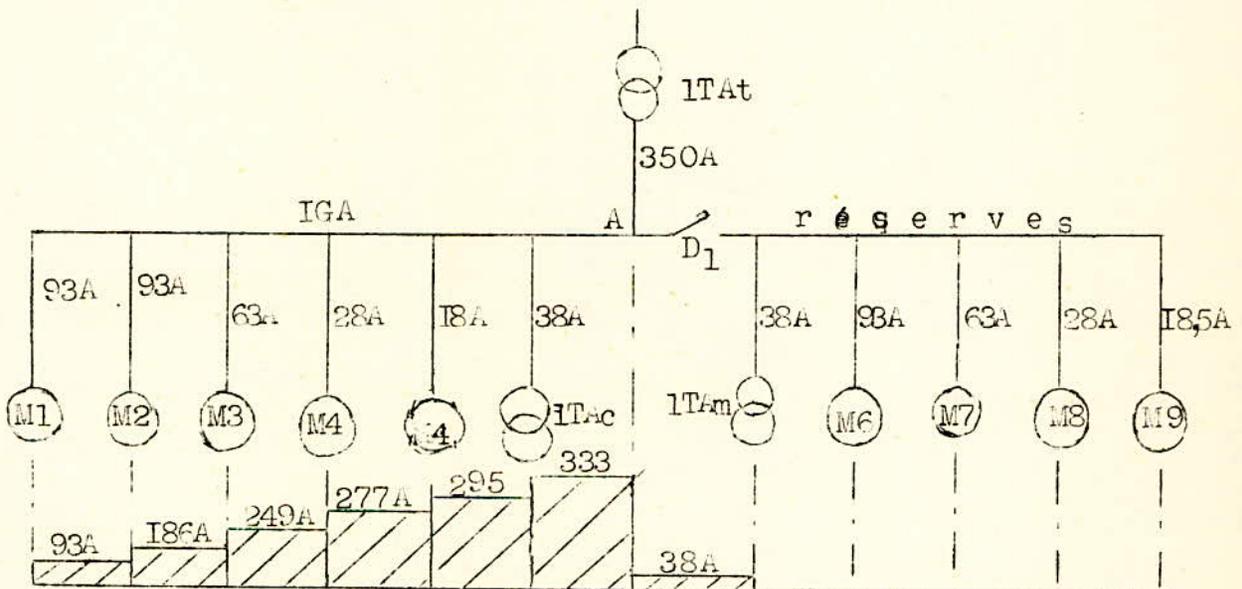


fig. 13

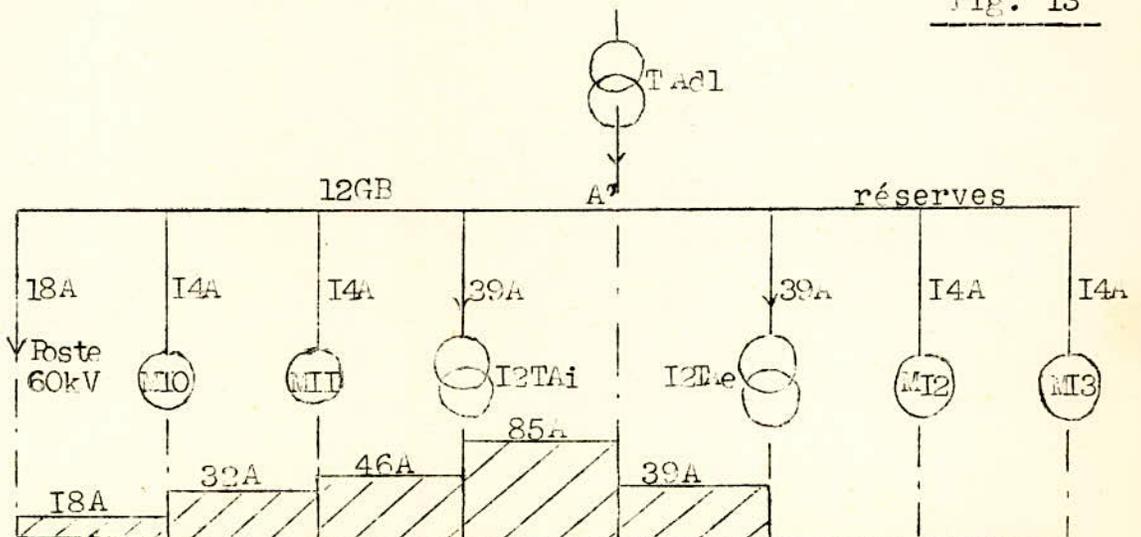


fig. 14

Le cas de la figure 13 donne un courant de : $I_{\max} = 333 \text{ A}$
Celui de la figure 14, donne $I_{\max} = 81 \text{ A}$

R/ - 1GA et 12GB sont alimentés par 1Tat :

Le transformateur ^{TAd1} se trouve en panne et TAd2 n'assure pas le secours, le disjoncteur D2 se ferme.

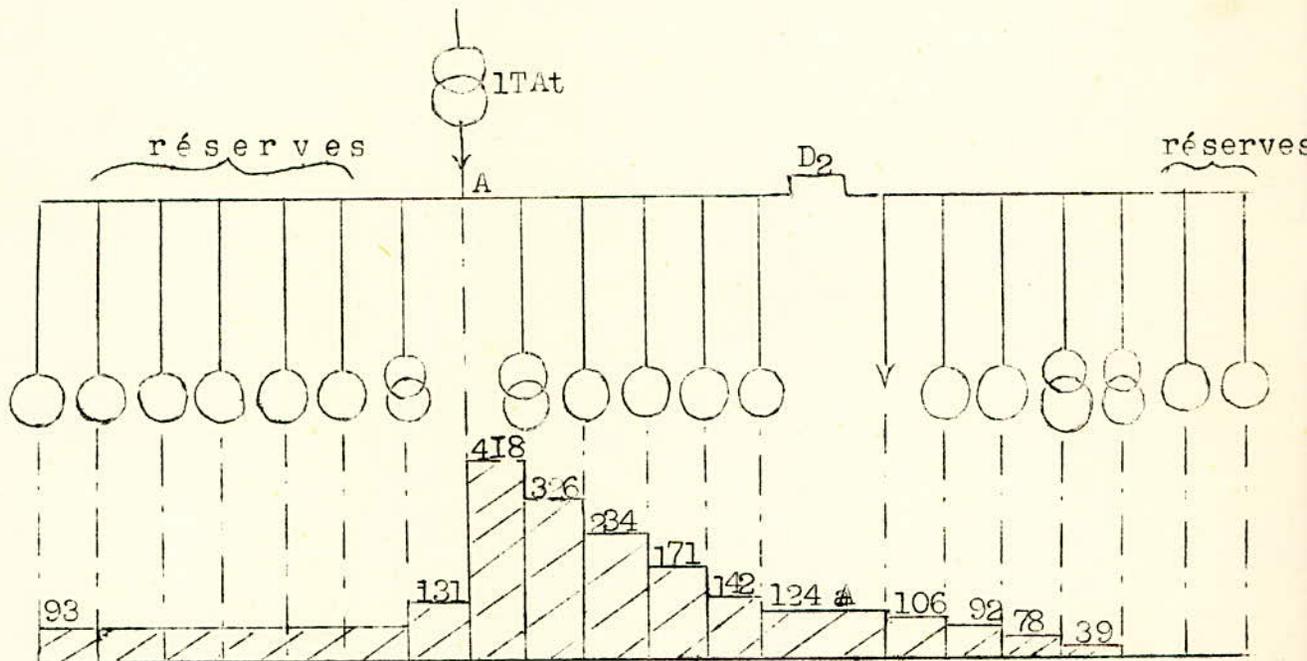


fig. 15

Le cas le plus défavorable se présente quand le maximum en service des moteurs se trouve à droite du point A. On a supposé que les 4 moteurs de réserve du 1GA étaient à gauche de A (fig. 15).

Dans ce cas $I_{\max} = 415,5 \text{ A}$

Mais le courant calculé précédemment ($I_{\max} = 415,5 \text{ A}$) a été pris comme étant la somme des différents courants. En réalité, il faut tenir compte des coefficients d'utilisation des divers moteurs (principe déjà exposé) et calculer le courant appelé. On étudiera le cas de la fig. 15 et on

- la puissance appelée par les moteurs de 1GA situés à droite de A (Tableau 12)
- la puissance appelée par 1GA, 12GB et 1TAm (Tableau 13)

08/421
921
2085

JEU DE BARRES 1GA

- Tableau 12 -

| MOTEURS | n nombre | PUISSANCE | | m P _{max} / P _{min} | P _{mj} / P _i | COSφ / Tgφ | P _i | | n ₁ | P _{i1} | P* | n ₁ / n | ne* | n _e * · n | K _M | P _p | Q _p | S _p |
|----------------------|----------|----------------|--------------|---------------------------------------|----------------------------------|------------|---------------------|-----------------------|----------------|-----------------|-----|--------------------|------|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | unitaire
kW | totale
kW | | | | Ku · P _i | P _{mj} · Tgφ | | | | | | | | | | |
| | | | | | Ku | | P _{mj} | Q _{mj} | | | | n* | | ne | | kW | kVAr | kVA |
| Pompe alimentaire | 1 | 708 | 708 | | 0,9 | 0,92 0,44 | 637,2 | 253 | | | | | | | | | | |
| ventilateur | 1 | 486 | 486 | | 0,9 | 0,92 0,44 | 437 | 188 | | | | | | | | | | |
| Pompe d'extraction | 1 | 165 | 165 | | 0,9 | 0,92 0,44 | 149 | 61 | | | | | | | | | | |
| Pompe de circulation | 1 | 145 | 145 | | 0,9 | 0,92 0,44 | 132 | 581 | | | | | | | | | | |
| | 4 | - | 1504 | | 0,9 | | 1355 | 560 | 2 | 1194 | 0,8 | 0,66 | 0,92 | 3,68 | 1,1 | 1650 | 610 | 1660 |

JEUX DE BARRES 1GA-12GB-1TAm

- Tableau 13 -

| MOTEURS | n nombre | PUISSANCE | | m P _{max} / P _{min} | P _{mj} / P _i | COSφ / Tgφ | P _i | | n ₁ | P _{i1} | P* | n ₁ / n | ne* | n _e * · n | K _M | P _p | Q _p | S _p |
|---------|----------|----------------|--------------|---------------------------------------|----------------------------------|------------|---------------------|-----------------------|----------------|-----------------|------|--------------------|------|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | unitaire
kW | totale
kW | | | | Ku · P _i | P _{mj} · Tgφ | | | | | | | | | | |
| | | | | | Ku | | P _{mj} | Q _{mj} | | | | n* | | ne | | kW | kVAr | kVA |
| 1 GA | 4 | - | 1503 | | 0,9 | | 1355 | 560 | 2 | 1194 | 0,88 | 0,66 | 0,92 | 3,68 | 1,1 | 1650 | 610 | 1660 |
| 12 GB | 94 | - | 1054 | | 0,48 | | 507 | 234 | 4 | 440 | 0,42 | 0,043 | 0,2 | 18,8 | 1,2 | 740 | 308 | 850 |
| 1TAm | 57 | - | 518 | | 0,5 | | 254,4 | 140,1 | 2 | 170 | 0,33 | 0,035 | 0,25 | 14,3 | 1,25 | 320 | 140 | 360 |
| | 155 | - | 3175 | | 0,68 | | 2116,4 | 934 | 2 | 1194 | 0,4 | 0,013 | 0,1 | 15,4 | 1,2 | 2500 | 934 | 2660 |

Le courant maximum réellement appelé est de :

$$I = \frac{S_p}{\sqrt{3} U_n} = \frac{2665}{\sqrt{3} \cdot 5,5} = 280 \text{ A} \quad \underline{\underline{I_{max} = 280 \text{ A}}}$$

H - CALCUL de la SECTION

Le Tableau 9 donnant la section en fonction du courant admissible nous permet d'avoir :

$$I_{max} = 280 \text{ A} \rightarrow S = 75 \text{ mm}^2 \quad \text{d'où } I_{adm} = 340 \text{ A}$$

(cas d'une seule barre élémentaire)

2 - VERIFICATION à l'EFFET THERMIQUE

$$\left\{ \begin{array}{l} I'' = 14,9 \text{ kA} \\ I_{\infty} = 13,5 \text{ kA} \end{array} \right. \rightarrow \beta'' = \frac{I''}{I_{\infty}} = 1,1 \Rightarrow t_{fp} = 0,6 \text{ s (Abaque 8)}$$

pour $t_{cc} = 0,2 \text{ s}$

et $t_{fa} = \beta''^2 \cdot T_a = 0,06 \text{ sec}$
 $\Rightarrow t_f = t_{fp} + t_{fa} = 0,66 \text{ sec}$

d'où $S_{cc} = \frac{I_{\infty}}{C} \cdot \sqrt{t_f} = 92 \text{ mm}^2$

On remarque : S_{cc} est supérieure à la section choisie S_n , on élève donc S_n :

$S_{cc} > S_n$ on prendra le section normalisée immédiatement supérieure : $S'_n = 90 \text{ mm}^2$

mais S'_n ne convient toujours pas car $S'_n < S_{cc}$

On prendra finalement $\rightarrow \underline{\underline{S''_n = 120 \text{ mm}^2}}$

Ce qui correspond à $I_{adm} = 475 \text{ A} > I_{max} = 280 \text{ A}$

- Calcul du temps pour lequel ce jeu de barres résistera à l'effet thermique :

$$t_f = \left(\frac{S''_n \cdot C}{I_{\infty}} \right)^2 \quad \left\{ \begin{array}{l} S''_n = 120 \text{ mm}^2 \\ C = 140 \\ I_{\infty} = 13500 \text{ A} \end{array} \right.$$

$$t_f = 1,57 \text{ sec} \quad \text{or} \quad t_{fa} = 0,06 \text{ sec}$$

$$\text{donc } t_{fp} = t_f - t_{fa} = 1,51 \text{ sec}$$

$$\text{ce qui nous donne pour } \beta'' = 1,1 \rightarrow \underline{t_{cc} = 4,2s}$$

La résistance de notre jeu de barres à l'effet thermique est suffisante pour un temps de court-circuit $t_{cc} < 4,2 \text{ sec}$

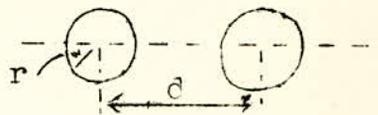
5 - VERIFICATION à la CHUTE DE TENSION

Dans les jeux de barres, la chute de tension ne doit pas dépasser une valeur supérieure de 2 %

Pour les barres collectrices, la résistance est négligeable devant la réactance. On considère seulement l'inductance qui est fonction du profil de la barre et de sa position relative entre les barres.

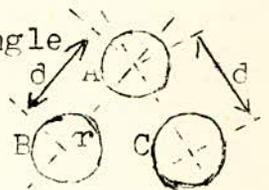
- pour les barres circulaires en monophasé :

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{d}{r} + 0,25 \right) 2l$$



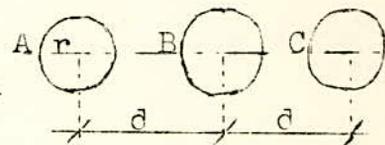
- En triphasé : barres disposées en triangle

$$L_A = L_B = L_C = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{d}{r} + 0,25 \right) l$$



barres alignées :

$$\begin{cases} L_A = L_C = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{d}{r} + 0,595 \right) l \\ L_B = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{d}{r} + 0,25 \right) l \end{cases}$$



Dans les barres rectangulaires, le champ magnétique est très compliqué à déterminer donc il est difficile d'avoir l'inductance exacte.

On utilise des relations approximatives qui donnent une précision suffisante de la valeur de cette inductance.

On utilise la notion de rayon équivalent R d'une barre tubulaire qui a les mêmes dimensions que la barre de rayon r , d'où dans le cas du monophasé :

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{d}{r} + 0,25 \right) 2l = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{d}{R} \right) 2l = L'$$

ou

$$\begin{aligned} \ln \left(\frac{d}{r} + 0,25 \right) &= \ln \frac{d}{R} \rightarrow \ln \frac{d}{r} \cdot \frac{R}{d} = -0,25 \\ \rightarrow \ln \frac{R}{r} &= -0,25 \rightarrow \frac{R}{r} = e^{-0,25} \Rightarrow R = r \cdot e^{-0,25} \end{aligned}$$

$$\underline{R = 0,779 r}$$

On procède de la même manière pour les autres cas.

Dans la majorité des cas, on utilise des barres rectangulaires pour les installations électriques intérieures.

Le rayon équivalent est $R = 0,2235 (b + h)$

L'impédance est $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ R étant négligeable

de même que $\frac{I}{C_w}$ devant L_w

donc $Z = L_w$

et $\underline{\Delta U = L_w I}$

I est le courant qui traverse la barre

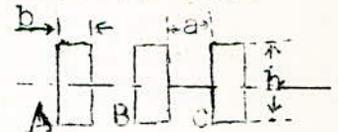
* Calcul du rayon équivalent et de l'inductance de notre jeu de barres.

Il s'agit de barres alignées :

$$S_n = 120 \text{ mm}^2 \Rightarrow b = 4 \text{ mm} ; h = 30 \text{ mm}$$

$$R = 0,2235 (b + h) = 7,6 \text{ mm}$$

$$\underline{R = 7,6 \text{ mm}}$$



$$\begin{cases} L_A = L_C = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{d^2 d}{R} \right) l = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{d}{R} + 0,346 \right) \cdot l \\ L_B = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{d}{R} \right) l \end{cases}$$

La longueur du jeu de barres est de : $l = 30 \text{ m}$

La distance entre phase est d'environ de $d = 50 \text{ cm}$

$$L_A = \frac{4 \pi 10^{-7}}{2 \pi} \left(\ln \frac{50}{0,76} + 0,346 \right) \cdot 0,030$$

$$\underline{L_A = 272 \cdot 10^{-4}}$$

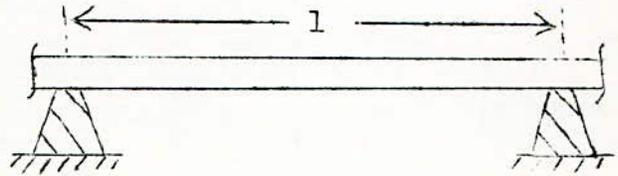
La chute de tension est : $\Delta U = L_w I$ avec $I = I_{adm} = 475 \text{ A}$

$$\Delta U = 2,9 \text{ V}$$

La chute de tension dans le jeu de barres est très faible puisqu'elle ne représente que 0,05 % de $U_n < U_{adm} = 2\%$

4 - VERIFICATION aux EFFORTS ELECTRODYNAMIQUES

On considère une portion de ce jeu de barres reposant entre 2 isolateurs.



- On a vu que la force de choc maximum qui peut s'exercer sur la barre centrale s'écrit /

$$f_{2choc} = (1,8)^2 \cdot 0,87 \cdot \mu_0 \cdot \frac{(\sqrt{2} I'')^2}{2\pi a} \quad \text{or} \quad \begin{cases} a = 50 \text{ cm} \\ I'' = 14,9 \text{ kA} \\ \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \end{cases}$$

ce qui donne $f_2 = 264 \text{ N/m}$

- Le moment statique exercé sur la barre sera alors :

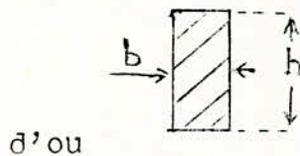
$$M_{cstat} = \frac{f_{choc} \cdot l^2}{10} \quad \text{pour } l = 2 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \underline{M_{cstat} = 105,6 \text{ N/m}}$$

et en kgf/cm^2 $M_{cstat} = 105,6 \cdot \frac{100}{9,81} = 1075 \text{ kgf/cm}^2$

- La contrainte statique sera :

$$\tilde{\sigma}_{stat} = \frac{M_{cstat}}{w} \quad w = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad \text{module de résistance de la barre rectangulaire}$$



d'ou

$$w = \frac{0,4 \cdot 3^2}{6} = \underline{0,6 \text{ cm}^3} = w$$

$$\underline{\tilde{\sigma}_{stat} = 1800 \text{ kgf/cm}^2}$$

On vérifie que $\tilde{\sigma}_{stat} < \tilde{\sigma}_{adm}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\sigma}_{adm} = 2400 \text{ kgf/cm}^2 \\ \text{pour le cuivre} \end{array} \right.$$

- Calcul des forces dynamiqués :

$$\tilde{\sigma}_{\max. dyn.} = K_{\sigma} \tilde{\sigma}_{\max. stat} \quad \text{avec} \quad K_{\sigma} = f\left(\frac{f_0}{f_n}\right)$$

la fréquence propre de la barre est f_0 :

$$f_0 = C_1 \cdot C_2 \cdot \frac{3}{4 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{\rho \cdot q}} \quad \text{et} \quad f_n = 50 \text{ Hz}$$

$$E = 13000 \cdot 10^6 \text{ kgf/m}^2$$

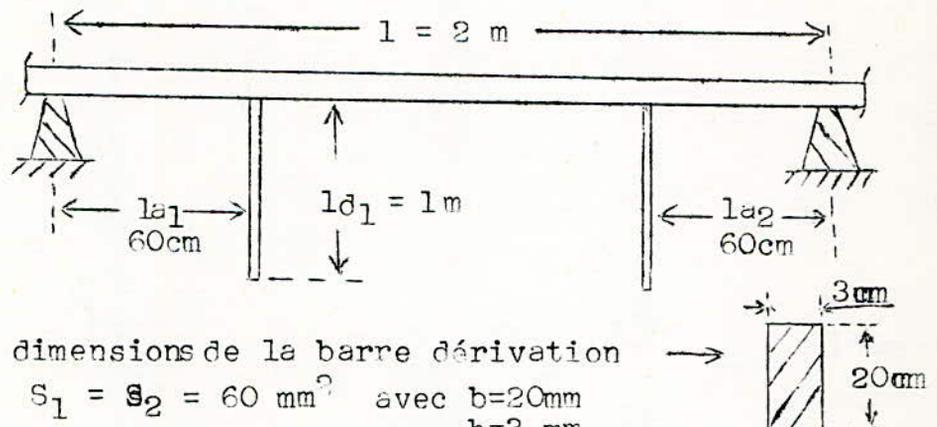
$$J = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot (3)^3 \cdot 10^{-6}}{12} = 9 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

$$\rho = 8,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$q = 120 \text{ mm}^2 = 120 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

La distance entre isolateurs est prise égale à : $l = 2\text{m}$

On a placé 2 barres dérivation entre isolateurs :



dimensions de la barre dérivation

$$S_1 = S_2 = 60 \text{ mm}^2 \quad \text{avec} \quad b = 20 \text{ mm} \\ h = 3 \text{ mm}$$

$$J_e = J_1 = J_2 = \frac{b \cdot h^3}{12} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

Les barres peuvent être considérées comme étant élastiques puisque :

$$\begin{cases} J_1 = J_2 < J \\ l_d < 0,6 \cdot l \end{cases}$$

$C_1 = 1$: nous n'avons qu'une seule barre par phase

Détermination de C_2 :

$$\frac{l_a}{l_e} = \frac{60}{200} = 0,3 \quad \text{et d'après la courbe } 10, u = f\left(\frac{l_a}{l}\right)$$

$$\Rightarrow u_e = 0,6$$

$$C_2 = \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{64} \sum_r \frac{J_r}{J} \left(\frac{1}{r}\right)^3 u_r + \frac{1}{16} \sum_e \frac{J_e}{J} \left(\frac{1}{e}\right)^3 u_e}{1 + 0,6 \sum_r \frac{q_r}{q} \cdot \frac{1_r}{1} u_r + \sum_e \frac{q_e}{q} \cdot \frac{1_e}{1} u_e}}$$

$$C_2 = \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{64} + \frac{1}{16} \cdot 2 \cdot \frac{2}{9} \frac{10^{-9}}{10^{-9}} \cdot \left(\frac{2}{1}\right)^3 \cdot 0,6}{1 + 2 \cdot \frac{60}{120} \cdot \frac{2}{1} \cdot 0,6}} = 0,725$$

$$\Rightarrow \underline{C_2 = 0,725}$$

Ce qui nous donne pour la fréquence propre de la barre

$$f_0 = 1 \cdot 0,725 \cdot \sqrt{\frac{13000 \cdot 9 \cdot 10^{-9}}{8,9 \cdot 10^3 \cdot 120 \cdot 10^{-6}}}$$

$$\underline{f_0 = 0,00757 \text{ Hz}}$$

Cette fréquence propre de la barre est très différente de la fréquence du réseau et d'après la courbe 9

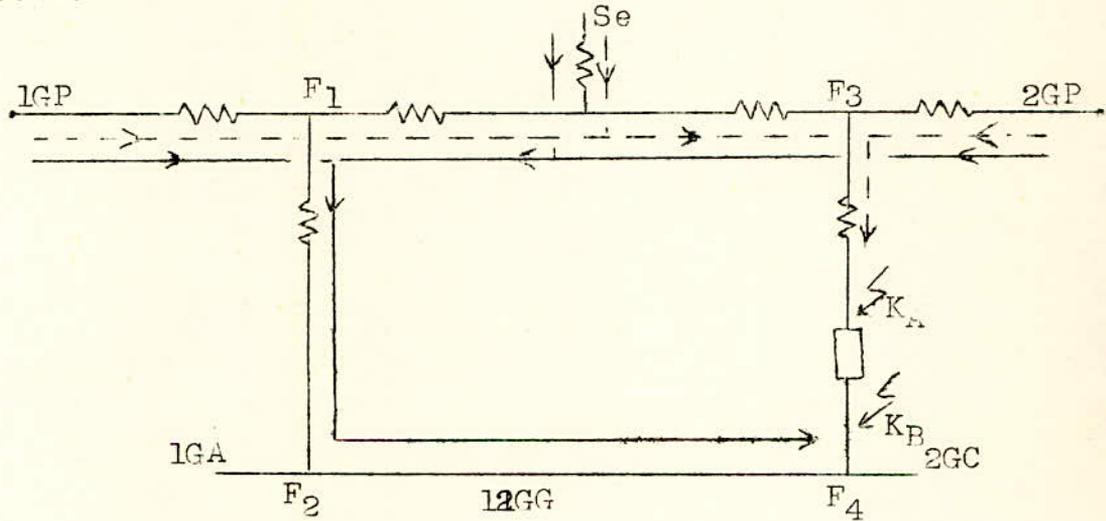
$$K_{\sigma} = f \left(\frac{f_0}{f_n} \right) \Rightarrow \frac{f_0}{f_n} \rightarrow 0 \Rightarrow K_{\sigma} \rightarrow 0$$

Les barres ne peuvent entrer en résonance, et les dimensions de la barre resteront inchangées.

$$\text{car } \sigma_{\text{dyn}} \rightarrow 0 \ll 2 \sigma_{0,2c} = 2400 \text{ kgf/cm}^2$$

XVII - I // HOIX des DISJONCTEURS

Pour pouvoir choisir un disjoncteur, il faut connaître le courant de court-circuit maximum auquel il peut être soumis. Pour ceci, il faut considérer les différents chemins qui peuvent véhiculer le courant vers les points de court-circuit. Pour les circuits bouclés, il faut calculer le courant de CC en amont et en aval de chaque disjoncteur et choisir celui-ci en fonction du plus grand courant.



On calcule le courant en K_A en considérant que le chemin électrique pris par le courant étant celui représenté en pointillé (le disjoncteur étant ouvert).

On fait le calcul en K_B en considérant que le chemin est celui représenté en trait continu.

Il y a un 3^e cas qui est celui où les 2 branches F_1F_2 et F_3F_4 alimentent le court-circuit soit en amont soit en aval du disjoncteur avant le déclenchement de celui-ci.

Le dernier cas est le plus défavorable et le courant

de court-circuit sera maximum puisque l'impédance équivalente de $F_1F_2 + F_3F_4$ (impédances en parallèle) est inférieure à celle de F_1F_2 et F_3F_4 .

Les courants de court-circuit qui tiennent compte de ce dernier cas ont été calculés précédemment.

Autre le courant de CC, les disjoncteurs sont choisis à l'aide des caractéristiques suivantes:

- tension nominale
- courant nominal
- type d'installation (intérieur ou extérieur)
- courant de coupure ou puissance de coupure.

Pour chaque disjoncteur, il faut donc préciser ces différentes caractéristiques :

- La tension nominale doit correspondre à la tension du réseau.

- Le courant nominal du disjoncteur doit être plus grand que le courant de charge maximum de durée du circuit où se trouve placé l'appareil.

Sachant que le courant admissible du disjoncteur est établi pour la température $t^{\circ}C = 40^{\circ}C$ et que la température ambiante de l'installation est inférieure à $40^{\circ}C$, le courant admissible du disjoncteur sera en réalité plus grand que celui indiqué sur l'appareil.

- Le courant de coupure est donné par des catalogues. C'est un courant qui est plus grand que la valeur efficace du courant de CC au moment de la séparation des contacts du disjoncteur (à $t = 0,1$ sec).

A $t = 0,1$ sec, après le CC, la composante apéri-

digue sera pratiquement amortie. On peut donc considérer uniquement le courant périodique.

Calcul des courants de déclenchement

Il est donné par l'expression :

$$I_d = \mu I''$$

μ est une fonction du temps de retard du disjoncteur et du rapport du courant surtransitoire au courant nominal $\frac{I''}{I_{Gn}}$.

μ est donnée par des courbes (courbes 11)

On calcule $\frac{I''}{I_{Gn}}$ en chaque point où existe un disjoncteur.

Exemple de calcul du courant de durée au Point K_3

$$I''_{K_3} = 7,4 \text{ kA} ; \quad I_{Gn_1} = 4,21 \text{ kA}$$

$$I_{Gn_2} = 4,21 \text{ kA}$$

$$\rightarrow \frac{I''_{K_3}}{I_{Gn}} < 1, \quad \text{donc} \quad \mu \approx 1$$

Dans ce cas, on considère que le courant de déclenchement I_d est égal au courant surtransitoire I'' de CC.

- Les disjoncteurs sont tous pour installations intérieures.

2 - CHOIX des SECTIONNEURS

Comme ces éléments ne travaillent pas en charge, le choix se fait alors en tenant compte de :

- Courant nominal
- tension nominale
- type d'installation intérieur ou extérieur.

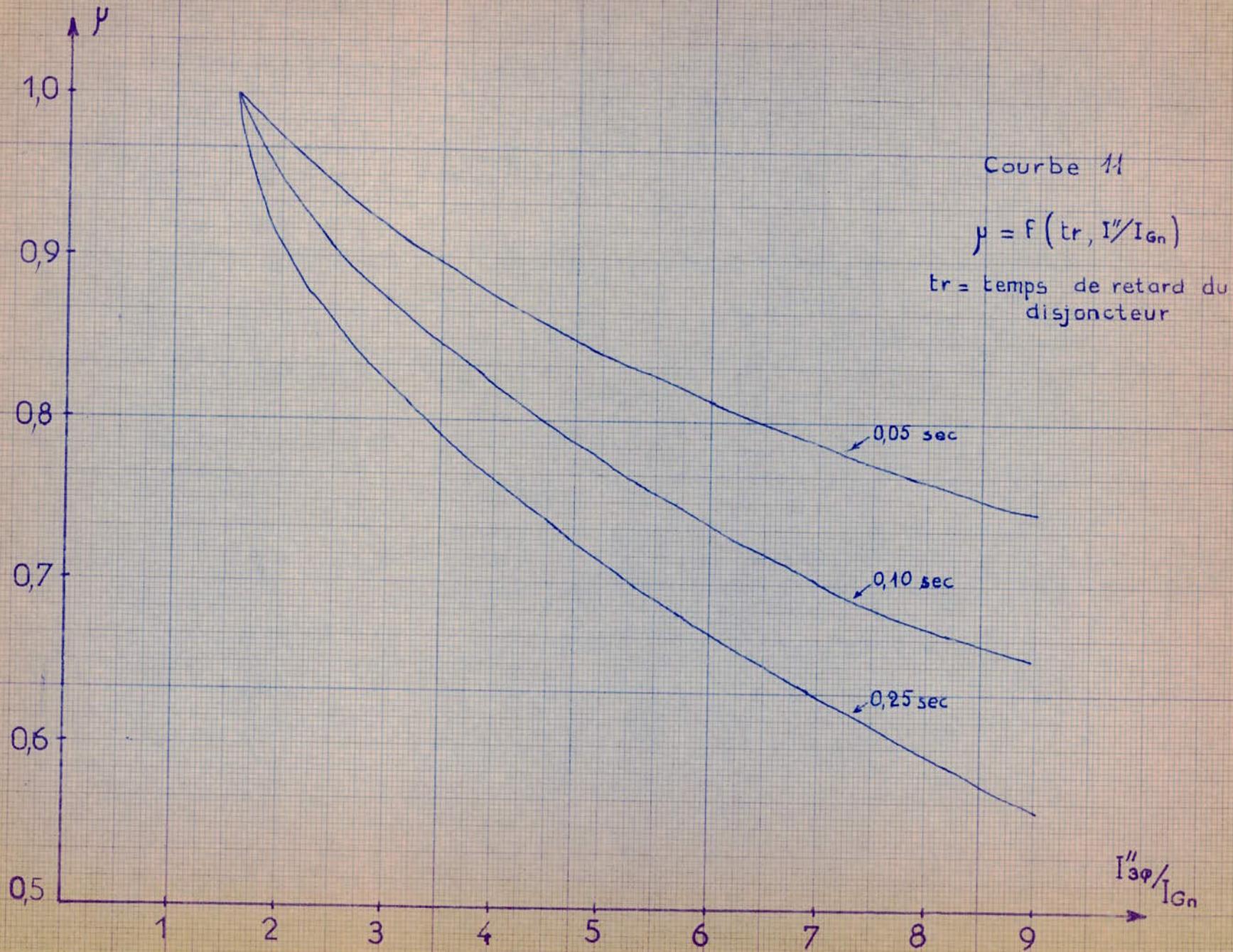


Tableau des courants périodiques de déclenchement des
disjoncteurs

| Lieux | I''
en kA | $\frac{I''}{I_{Gn}}$ | μ | I''_d
en kA |
|--|----------------|----------------------|-------------|------------------|
| K_9 | 7,4 | 0,87 | > 1 | 7,4 |
| $\left. \begin{array}{l} K_{10}=K_{11}=K_{12} \\ K'_{10}=K'_{12}=K'_{13} \end{array} \right\}$ | 14,4 | 1,708 | 0,94 | 13,5 |
| $\left. \begin{array}{l} K_{13}=K_{14}=K_{15} \\ K'_{13}=K'_{14}=K'_{15} \end{array} \right\}$ | 13,75 | 1,63 | 0,96 | 13,2 |
| $\left. \begin{array}{l} K_{16}=K_{17}=K_{18} \\ K'_{16}=K'_{17} \end{array} \right\}$ | 13,2 | 1,57 | 0,98 | 12,9 |
| K'_{18} | 11,7 | 1,39 | ≈ 1 | 11,7 |
| K'_{19} | 11,4 | 1,35 | > 1 | 11,4 |
| K_{20} | 10,9 | 1,3 | > 1 | 10,9 |
| K_{21} | 10,9 | 1,3 | > 1 | 10,9 |
| K_{22} | 11,4 | 1,35 | > 1 | 11,4 |
| K_{23} | 9,5 | 1,13 | > 1 | 9,5 |
| K_{24} | 6,1 | 0,8 | > 1 | 6,1 |

Tableau : 10

Tableau des caractéristiques des disjoncteurs

| Disjoncteurs | Données pour choisir les disjoncteurs | | | caractéristiques des disjoncteurs choisis | | |
|--|---------------------------------------|------------------------|-------------------------|---|------------------------|-----------------------|
| | U _n
en kV | I _n
en A | I _d
en kA | U _n
en kV | I _n
en A | I _p
MVA |
| P ₁ , p ₁ | 5,5 | 350 | 13,7 | 6 | 1250 | 250 |
| D ₁ , D ₂ }
d ₁ , d ₂ } | 5,5 | 38 | 13,5 | 6 | 630 | 250 |
| P ₂ , P ₃ }
p ₂ , p ₃ } | 0,38 | 550 | 12,9 | 0,4 | 800 | |
| D ₃ | 0,38 | 175 | 11,4 | 0,4 | 320 | |
| D ₄ | 0,38 | 175 | 11,4 | 0,4 | 320 | |
| D ₅ | 0,38 | 32 | 6,1 | 0,4 | 80 | |
| D ₅ | 0,38 | 32 | 6,1 | 0,4 | 80 | |
| d ₃ , p ₄ | 0,38 | 32 | 10,9 | 0,4 | 80 | |
| d ₄ , p ₅ }
d ₅ , p ₆ } | 0,38 | 330 | 10,9 | 0,4 | 800 | |
| d ₆ , p ₇ | 0,38 | 125 | 11,4 | 0,4 | 80 | |
| d ₇ , p ₈ | 0,38 | 170 | 9,5 | 0,4 | 320 | |

Tableau : 11

(Se référer au schéma: 6)

XVIII - IMITATION de la TEMPERATURE
dans les CONDUCTEURS

Pour assurer une longue vie aux câbles et appareils de protection, on limitera (lors d'un court-circuit) la température à une valeur acceptable.

Un câble traversé par un courant nominal se trouve à sa température initiale θ_i , avec

$$\theta_i = \theta_m + (\theta_{ad} - \theta_m) \cdot \left(\frac{I}{I_{ad}} \right)^2$$

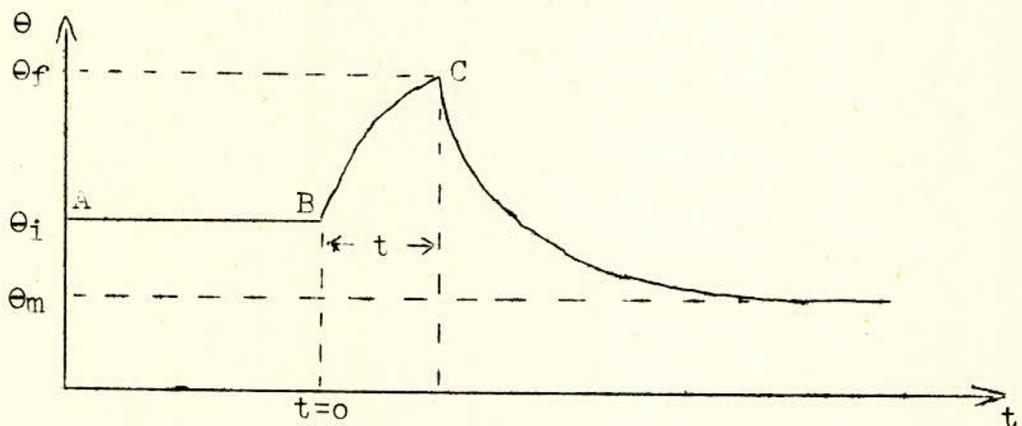
θ_m = température du milieu ambiant ($\theta_m = 25^\circ\text{C}$)

θ_{ad} = température admissible de durée ($\theta_{ad} = 70^\circ\text{C}$ pour le cuivre).

I_n = courant nominal

I_{ad} = courant admissible du conducteur.

Quand un CC apparaît, la variation de la température avec le temps est la suivante:



La portion ^{AB} de la courbe correspond à la température initiale θ_i du câble parcouru par son courant nominal en marche normale .

En B ($t=0$) apparaît un CC. La température passe de θ_i

à θ_f . Au point C_2 de la courbe intervient l'appareil de protection pour mettre le câble hors service. Sa température va chuter jusqu'à la température du milieu ambiant θ_m .

L'appareil de protection a mis un temps t (voir schéma) pour intervenir. Ce temps a permis à la température de passer de θ_i à θ_f .

Si on diminue t , θ_f diminuera.

Si maintenant, on s'impose une température $\theta_f = 250^\circ\text{C}$ acceptable par le cuivre, on peut calculer le temps t au bout duquel l'appareil de protection doit intervenir pour mettre hors service le conducteur.

L'énergie dégagée lors d'un CC peut s'exprimer de 2 manières :

$$E = R \cdot I^2 \cdot t \quad \text{en joule}$$

$$E = M \cdot C \cdot \Delta\theta \quad \text{en calorie}$$

$$RI^2t = MC \Delta\theta \cdot 4,18 \cdot 10^3 \quad C \text{ en kcal/kg.}^\circ\text{C}$$

$$M \text{ en kg}$$

On négligera la variation de R et de C en fonction de la température

$$R = R_c (1 + \alpha \theta)$$

$$C = C_o (1 + \beta \theta)$$

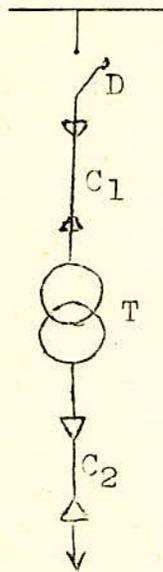
$$M = \rho LS \quad \rho \text{ en kg/m}^3$$

$$t = \frac{\rho L S C \Delta\theta \cdot 4,18 \cdot 10^3}{RI^2} = \frac{\rho L S C (\theta_f - \theta_i)}{RI^2}$$

Pour un disjoncteur qui protège plusieurs câbles en série, il faut que son déclenchement se réalise avant qu'aucun de ces câbles n'atteigne la température $\theta_f = 250^\circ\text{C}$

Exemple :

Soit un disjoncteur D qui protège deux câbles, C_1 et C_2 et un transformateur T.



Si lors d'un CC, C_1 atteint la température de 250°C en un temps $t = 0,5$ sec et C_2 n'atteint cette température qu'à 3 sec, il est évident que le déclenchement de D doit intervenir avant que C_1 n'atteigne 250°C , c'est-à-dire à un temps $t \ll 0,5$ sec après l'apparition du CC.

Exemple de calcul :

- { Jeu de barres 5,5 kV
- { Temps de déclenchement de P_1 et P_L .

$$I_{cc} = 14,9 \text{ kA} ; R = 2,8 \cdot 10^{-3} \Omega ; l = 30 \text{ m}$$

$$\rho = 8940 \text{ kg/m}^3 ; C = 0,091 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\theta_i = \theta_m + (\theta_{ad} - \theta_m) \cdot \left(\frac{I}{I_{ad}}\right)^2 \quad \text{avec} \begin{cases} \theta_m = 25^\circ\text{C} \\ \theta_{ad} = 70^\circ\text{C} \\ I = 280 \text{ A} \\ I_{ad} = 475 \text{ A} \end{cases}$$

$$\theta_i = 25 + (70 - 25) \cdot \left(\frac{280}{475}\right)^2 = 40^\circ\text{C}$$

$$RI^2t = MC \Delta\theta \cdot 4,18 \cdot 10^3 = \rho l S (\theta_f - \theta_i) \cdot 4,18 \cdot 10^3$$

$$\theta_f - \theta_i = 250 - 40 = 210^\circ\text{C} \quad t = \frac{8940 \cdot 120 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \cdot 210 \cdot 9,1 \cdot 10^{-2} \cdot 4,18 \cdot 10^3}{2,8 \cdot 10^{-3} \cdot (14,9)^2 \cdot 10^6}$$

$$t = 4,1 \text{ sec}$$

Pour des raisons de sécurité, on prendra la moitié de ce temps :

$$t' = \frac{t}{2} = 2,05 \text{ sec}$$

Tableau donnant le temps nécessaire pour que les câbles
passent de leur température initiale à la température
finale $\theta_f = 250 \text{ }^\circ\text{C}$;

| Lieux | I
A | I _{ad}
A | I _{cc}
kA | S
mm ² | θ_i
°C | $\Delta\theta$
°C | l
m | Rl
Ω | t
sec | Dis jonc
teur | t/2
sec |
|-----------------------------------|--------|----------------------|-----------------------|----------------------|------------------|----------------------|--------|----------------------|----------|---------------------------------|------------|
| C ₁ , C ₁ ' | 38 | 100 | 14,4 | 50 | 31,7 | 218 | 15 | $6,2 \cdot 10^{-3}$ | 2,4 | D ₁ =D ₂ | 1,2 |
| C ₅ , C ₅ ' | 39 | 100 | 14,4 | 50 | 32 | 218 | 15 | $6,5 \cdot 10^{-3}$ | 2,4 | d ₁ , d ₂ | 1,2 |
| C ₂ , C ₂ ' | 550 | 600 | 13,2 | 400 | 61 | 189 | 15 | $2,7 \cdot 10^{-4}$ | 11,3 | - | - |
| C ₆ , C ₆ ' | 570 | 600 | 13,2 | 400 | 65 | 185 | 15 | $7,5 \cdot 10^{-4}$ | 2,8 | - | - |
| C ₃ | 175 | 280 | 11,4 | 95 | 42,5 | 207 | 35 | $3,5 \cdot 10^{-3}$ | 3,8 | D ₃ , D ₄ | 1,9 |
| C ₄ | 32 | 100 | 6,1 | 25 | 29,5 | 220 | 15 | $9 \cdot 10^{-3}$ | 1,1 | D ₅ | 0,55 |
| C ₇ | 32 | 100 | 6,1 | 25 | 31,7 | 218 | 15 | $7,5 \cdot 10^{-3}$ | 0,88 | d ₃ | 0,44 |
| C ₈ , C ₉ | 330 | 370 | 10,9 | 185 | 60 | 190 | 4 | $3,6 \cdot 10^{-3}$ | 0,98 | d ₄ , d ₅ | 0,49 |
| C ₁₀ | 125 | 210 | 11,4 | 70 | 41 | 209 | 4 | $11,4 \cdot 10^{-4}$ | 2,6 | d ₆ | 1,3 |
| C ₁₁ | 170 | 280 | 9,5 | 95 | 41,6 | 208 | 5 | $5 \cdot 10^{-3}$ | 0,74 | d ₇ | 0,37 |
| ieu de
barres
5,5kV | 280 | 475 | 14,9 | 120 | 75 | 175 | 30 | $2,8 \cdot 10^{-3}$ | 4,1 | P ₁ , p ₁ | 2,05 |

Tableau : 12

Les disjoncteurs doivent déclencher avant les temps suivants :

| | | | | | |
|-------------|---|------------------------|------------|---|------------------------|
| $P_1 : p_1$ | - | $t = 2 \text{ sec}$ | Dd_3 | - | $t = 0,44 \text{ sec}$ |
| D_1, D_2 | - | $t = 1,2 \text{ s}$ | d_4, d_5 | - | $t = 0,49 \text{ sec}$ |
| D_3, D_4 | - | $t = 1,87 \text{ sec}$ | d_6 | - | $t = 1,3 \text{ sec}$ |
| D_5 | - | $t = 0,55 \text{ sec}$ | d_7 | - | $t = 0,37 \text{ sec}$ |
| d_1, d_2 | - | $t = 1,2 \text{ sec}$ | | | |

La selectivité exige une cascade de temps telle que

$$t_{P_1, p_1} > t_{D_1, D_2} > t_{P_2, P_3} > t_{D_3, D_4} > t_{p_4} > t_{D_5} > t_{P_5}$$

Tous les temps doivent être compris dans les intervalles calculés précédemment

POSITIONS DES DISJONCTEURS & DES CABLES-6-

