

UNIVERSITÉ D'ALGER
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT ÉLECTRICITÉ

14/74

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
المكتبة
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

100

PROJET DE FIN D'ETUDES

CALCUL DES CIRCUITS
PRINCIPAUX D'UN POSTE
ELECTRIQUE
(APPLICATION A LA CENTRALE D'ALGER PORT)

PROPOSÉ PAR :
Mr. P R E D A

ETUDIÉ PAR :
OULD-RABAH K. et BENCHEIKH B.

(I-) A MES PARENTS

(B. BENCHEIKH)

(I-) LA MEMOIRE DE MES PARENTS

(K. OULD RABAH)

Que toutes les personnes qui ont
contribué d'une manière ou d'une autre
à notre formation trouvent ici nos
vifs remerciements.

S O M M A I R E

	Pages
INTRODUCTION.....;	1
X CHAPITRE I : Généralités sur les postes électrique ;	3
I.1- Définitions.....	4
I.2. Eléments constitutifs d'un poste.....	5
I.3. Circuits principaux.....	6
I.3.1. Circuits de lignes.....	8
I.3.2. Circuits de générateurs.....	9
I.3.3. Jeux de barres.....L.	10
I.3.4. Choix d'un schéma.....A.	12
I.4. Centrale d'Alger Port II.....	13
CHAPITRE II : Les Courts-circuits.....	18
II.1. Généralités.....	19
II.2. Courant de C^t-C^t triphasé symétrique.....	
II.2.1. Cas simplifié.....	20
II.2.2. Cas réel.....	25
CHAPITRE III : Calcul des I_{cc} - Application.....	29
III.1. Système de grandeurs réduites.....	30
III.2. Première variante.....	31
III.3. Deuxième variante.....	46
X CHAPITRE IV : Choix des disjoncteurs.....	54
X CHAPITRE V : Dimensionnement des jeux de barre.....	64
V.1. Calcul de la Section.....	65
V.2. Vérification aux efforts électrodynamiques..	69
V.3. Vérification aux efforts thermiques	76
V.4. Vérification à la chute de tension	81
CONCLUSION	83

INTRODUCTION

Pendant le fonctionnement des installations des postes et Centrales électriques il peut apparaître des perturbations du régime normal. Celles-ci provoquent des processus transitoires électromagnétiques se manifestant par des variations importantes du courant, de la tension, de la fréquence ... dont les conséquences peuvent être graves.

Le caractère complexe de ces régimes transitoires dépend des facteurs suivants :

- Structure du système électro-énergétique.
- Possibilité d'avoir des avaries simultanées.
- Variation en fonction du courant (donc du temps)

des réactances des circuits magnétiques non linéaires (générateurs, transformateurs).

Parmi les causes les plus fréquentes des régimes transitoires, on distingue :

- Les courts-circuits (triphasé, biphasé, monophasé etc..)
- Les Synchronisations imparfaites des machines.
- L'excitation ou la désexcitation rapide des machines synchrones.

Généralement le cas le plus grave et le plus rencontré est celui des courts-circuits apparaissant à cause de la rupture des conducteurs, de l'isolation, des fausses manoeuvres, des surtensions etc...

Bien que n'étant pas fréquents (5%) le court-circuit TRIPHASE(métallique) est le plus dangereux, par conséquent

nous nous intéresserons uniquement à ce cas qui englobe les autres.

Nous établirons dans un premier temps les valeurs maximales des I_{CC} qui nous permettront de procéder à un choix judicieux des disjoncteurs. Dans un second temps nous étudierons les effets thermiques et électrodynamiques de ces courants afin de dimensionner les jeux de barres.

Les valeurs minimales de ces I_{CC} serviront à la protection par relais qui ne fait pas objet de notre étude.


Comme il s'agit de calculer les circuits principaux de la Centrale d'Alger Port II composée de 2 turbo-alternateurs, nous devons envisager les 2 variantes d'alimentations du défaut en énergie électrique :

1^{ère} variante : 2 alternateurs en service avec ou sans Système énergétique.

2^e variante : 1 alternateur avec ou sans S.E.

On appelle système énergétique S.E. la source équivalente de l'ensemble des sources extérieures à notre installation qui contribuent à l'alimentation du défaut.

A la fin, nous comparerons nos résultats à ceux de la Centrale pour en tirer une conclusion.

 H A P I T R E I



Généralités sur les postes électriques



I. DEFINITIONS

On désigne sous l'appellation générale de poste, des ouvrages d'importance et de nature très différentes selon le rôle qu'ils remplissent dans la production, le transport et la distribution de l'énergie électrique.

En effet, les postes groupent l'ensemble des installations qui permettent :

a) à la production :

- la jonction entre les machines génératrices et les lignes à haute tension et très haute tension par l'intermédiaire de transformateurs : ce sont les postes éleveurs d'usine.

b) au cours du transport :

- d'une part, la mise en connexion entre elles des différentes lignes à haute tension et très haute tension constituant le réseau de transport d'énergie (380, 225, 150, 90 kv) soit directement si elles sont à la même tension, soit par l'intermédiaire de transformateurs si elles sont à des tensions différentes,

- d'autre part, la liaison entre les lignes du réseau de transport et les artères à haute tension (90, 63, 45 kv) constituant le réseau général d'alimentation de la distribution.

Ces installations constituent les postes d'interconnexion ou de réparation à haute tension.

c) à la distribution :

- la jonction entre le réseau à haute ou très haute tension et les lignes de haute tension Distribution (30, 20, 15, 5 kv) par l'intermédiaire de transformateurs abaisseurs. Ce sont les postes de distribution HT/HTD

- la répartition à différents consommateurs ou à différentes régions de l'énergie à haute tension Distribution et le réseau récepteur à basse tension (380, 220 V) par l'intermédiaire de transformateurs abaisseurs.

Ces installations constituent les postes de répartition H T D ou les postes de transformation H T D/ B T.

.../...

Ces différents types de postes dont les rôles respectifs diffèrent profondément les uns des autres, ne peuvent obéir aux mêmes règles constructives et notre étude se limitera aux postes élévateurs d'usine.

II ELEMENTS CONSTITUTIFS D'UN POSTE

--:--:--:--:--:--:--:--:--:--:--:--:--:--

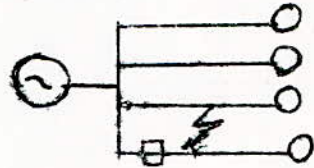
Un poste à haute ou très haute tension comprend :

- des installations à haute tension groupant, en général à l'extérieur, les appareillages et les raccordements nécessaires pour assurer la connexion des différentes lignes entre elles suivant un schéma déterminé.

- des installations à basse tension de contrôle et de commande qui permettent d'influer par la manoeuvre ou la modification du comportement des appareils haute tension sur la structure du réseau, en fonction des conditions d'exploitation ou des perturbations pouvant survenir sur celui-ci.

Ces installations comportent essentiellement :

- les équipements propres à assurer la qualité de l'exploitation, c'est-à-dire limiter les perturbations sur le réseau général en éliminant automatiquement les portions de réseaux sur lesquelles des incidents surviennent (systèmes de protections)

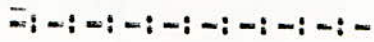


- les équipements propres à permettre le contrôle du fonctionnement ou du comportement correct de l'appareillage HT dans les conditions pour lesquelles ce matériel a été construit, ainsi que ceux destinés à renseigner l'exploitant sur les modifications de structure du schéma HT par le fait du fonctionnement des protections et des manoeuvres automatiques consécutives (signalisations de déclenchement, réenclenchements, défauts etc...)

- les organes de commande d'ouverture, de fermeture, de mise en marche et d'arrêt du matériel du poste, ainsi que ceux nécessaires au contrôle de la bonne exécution des manoeuvres (commande et signalisation de position des appareils).

.../...

III CIRCUITS PRINCIPAUX D'UN POSTE



Les circuits électriques principaux sont les circuits parcourus par l'énergie qui circule des générateurs aux consommateurs. En général, ces circuits comprennent des générateurs, des transformateurs, des disjoncteurs, des sectionneurs, des jeux de barres, des selfs, des fusibles de moyenne tension et des appareils de protection contre les surtensions.

- Les disjoncteurs sont des appareils de commutation en charge utilisés pour effectuer des manoeuvres en régime normal et pour interrompre automatiquement le circuit en cas de défaut. La commande des disjoncteurs est électrique ou pneumatique, mais elle peut être locale, ou à distance, manuelle ou automatique.

- Les sectionneurs sont des appareils avec lesquels on réalise la séparation visible des circuits ou éléments de circuits de manière à assurer la sécurité du personnel chargé de l'entretien et de la réparation du matériel. On ne peut pas les manoeuvrer en charge car ils n'ont pas la possibilité d'étendre l'arc électrique.

- Les selfs sont montés dans les circuits de lignes ou sur les barres collectrices pour diminuer le courant de court-circuit.

- Les barres sont des circuits auxquels peuvent être reliées toutes les machines, alternateurs, transformateurs et toutes les lignes de même tension qui y aboutissent. Suivant l'importance du circuit on utilise un, deux, trois jeux de barres.

III -1- LES CIRCUITS DE LIGNES

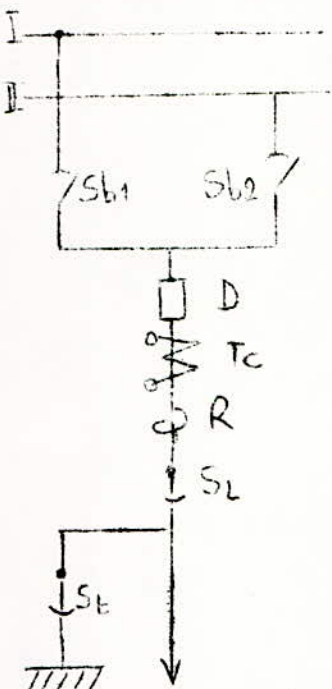


Dans les circuits de lignes on utilise 1, 1,5 ou 2 disjoncteurs. Le cas le plus utilisé est le circuit de ligne avec un seul disjoncteur.

III-1.1- Le circuit de ligne avec un disjoncteur :

Considérons le circuit de ligne suivant raccordé aux systèmes de barres à l'aide des sectionneurs de barres (Sb1 et Sb2) qui comprend aussi un transformateur de courant Tc, une self simple (R), un sectionneur de ligne (S1) et un sectionneur de mise à la terre (St)

.../...



Le disjoncteur de ligne (D) sert à coupler et à découpler le circuit en régime normal et aussi en régime de court-circuit. Les sectionneurs de barres et de ligne sont montés de part et d'autre du disjoncteur. Quand on a des travaux à faire sur la ligne, les sectionneurs sont nécessaires pour réaliser l'isolation visible du reste des installations qui peuvent être sous tension. Même si la ligne est radiale, il faut ouvrir le sectionneur de ligne pour prévenir l'apparition en sens contraire d'une tension accidentelle.

Les sectionneurs montrent d'une façon visible si le circuit est fermé ou ouvert. Le sectionneur de mise à la terre est monté dans la ligne après le sectionneur de ligne. Il est nécessaire pour faciliter la mise à la terre de ligne, quand on effectue des travaux. Ainsi l'installation est protégée contre l'apparition de tension inverse (dans les réseaux bouclés)

Le blocage mécanique du sectionneur de mise à la terre permet son couplage seulement si le sectionneur de ligne est ouvert. En général, la manoeuvre des sectionneurs se fait quand l'interrupteur est ouvert. Cependant, dans le cas d'installations avec deux jeux de barres, on peut manoeuvrer les sectionneurs avec le disjoncteur fermé. Ainsi si les deux jeux de barres se trouvent à la même tension le circuit peut passer d'un système de barres à un autre sans interruption.

Si Sb1 est fermé et Sb2 ouvert, on ferme Sb2 puis on ouvre Sb1. La manoeuvre est possible puisque des deux côtés du sectionneur la tension est la même.

La self est une bobine sans noyau, montée en série dans le circuit. Elle est parcourue par la totalité du courant. Donc la section de la bobine est égale à la section du circuit principal afin que les pertes d'énergie et de tension en régime normal soient petites. Les dimensions de la bobine de réactance sont grandes (1 à 2 mètres)

Si le circuit est constitué de lignes aériennes on ne monte pas de self puisque la réactance de ligne est assez grande.

Le transformateur de courant est monté dans les circuits de ligne (en aval de l'interrupteur). Il a généralement deux bobinages secondaires de 5 A, l'un pour l'alimentation des appareils mesure et l'autre pour l'alimentation d'autres circuits secondaires (protection, automatisations...)

.../...

Si le poste électrique est petit et si les consommateurs ne sont pas d'une grande importance (non industriels) on peut utiliser un seul jeu de barres (fig 4) donc un seul sectionneur de barres.

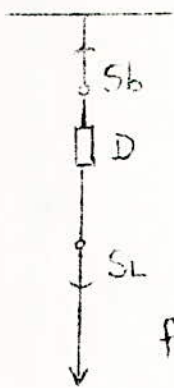


fig 4

Dans ce cas, on peut se passer du sectionneur de mise à la terre.

Ces circuits sont économiques mais n'assurent pas un fonctionnement continu. En effet le consommateur est privé d'énergie électrique lorsque il y a un court-circuit ou lorsqu'on fait l'entretien.

Dans le souci d'assurer une alimentation continue on envisage d'autres circuits.

III -1.2. Circuits de lignes avec 1,5 disjoncteurs

Ces circuits assurent davantage l'alimentation en énergie électrique. Ils utilisent 3 disjoncteurs pour 2 circuits (fig 6). On peut constater sur cette figure qu'on peut ouvrir n'importe quel disjoncteur sans couper le circuit extérieur, ce qui est un grand avantage.

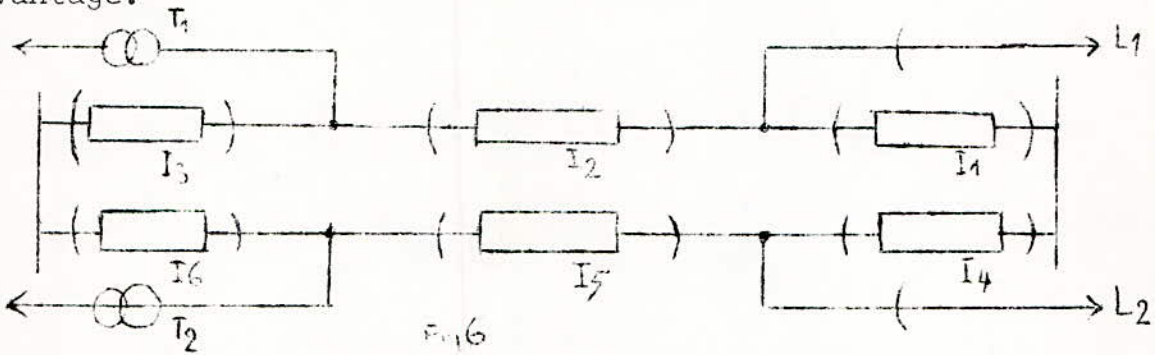


Fig 6

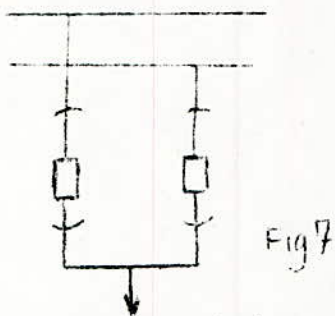
L'inconvénient de cette installation est d'être chère. Pendant qu'un disjoncteur est ouvert (en révision par exemple), la ramification où se trouve ce disjoncteur a une sécurité réduite ; Par exemple : si I1 est ouvert et qu'il apparaît un défaut sur le transformateur T1, les disjoncteurs I2 ET I3 DECLANCHENT ET LA LIGNE LI RESTE SANS TENSION.

III -1.3. Les circuits de lignes avec deux disjoncteurs

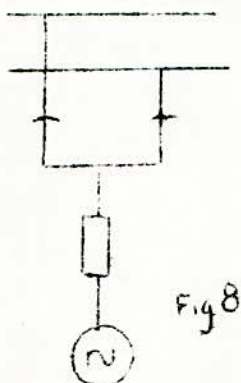
Ces circuits ont une sécurité très grande puisqu'on peut manoeuvrer les sectionneurs d'une branche lorsque le disjoncteur correspondant est ouvert, et ceci sans interrompre le circuit qui est alors alimenté par l'autre branche. Ce système possède une grande élasticité mais a l'inconvénient d'être cher.

.../...

C'est pour cette raison qu'il n'est employé qu'aux points très importants des systèmes électro-énergétiques.



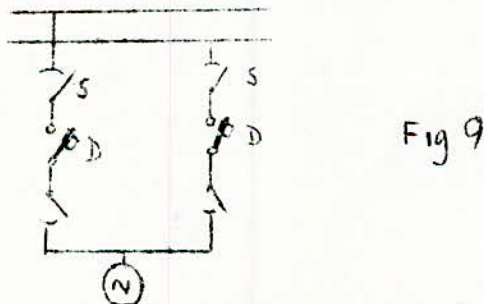
III.2 Les circuits de générateurs :



Entre le disjoncteur

Ce circuit peut utiliser un seul disjoncteur, et le générateur on ne monte pas de sectionneur puisque le générateur ne débite pas lorsque le disjoncteur est ouvert. Ce sectionneur devient nécessaire si le générateur alimente les services propres. Sur le circuit de générateur on n'utilise pas de selfs car en régime normal ceci entraînerait des chutes grandes de tension et donc des variations trop grandes de la tension lors des variations normales de charge.

Si une sécurité plus grande est nécessaire pour le circuit de générateur on utilise deux disjoncteurs (fig 9)



Si la centrale se trouve à une grande distance des consommateurs on utilise souvent le système bloc générateur-transformateur (fig 10) qui ne possède pas de barres et souvent pas de disjoncteur à la sortie du générateur.



SP: Service Propre

Fig 10

III 3. LES JEUX DE BARRES

III 3.1. Circuits à un seul jeu de barres (fig 11)

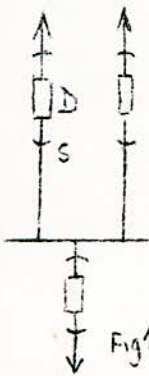


Fig 11

La liaison avec le jeu de barres de chacun de ces départs (départs ou arrivées de lignes, transformateurs eux-mêmes) s'effectue à l'aide d'un disjuncteur D. Chaque disjuncteur doit être séparé du jeu de barres par un sectionneur S. Le schéma à 1 jeu de barres présente comme dans le cas d'1 circuit de ligne à 1 seul disjuncteur de sérieux inconvénients lorsque la continuité de service doit être assurée en toutes circonstances ; en effet :

- un incident sur le jeu de barres ou l'entretien de celui-ci entraîne la mise hors tension de tout le poste ;
- ce schéma ne permet pas l'alimentation séparée de groupes de départs par des sources différentes.

Afin de rendre le schéma à un seul jeu de barres utilisable, on a cherché à le perfectionner au moyen de divers artifices parmi lesquels on peut citer :

- l'installation d'un sectionneur sur les barres SB de manière à transformer le poste à un jeu de barres (fig 11) en un poste à deux demi-jeux de barres (fig 12) permettant le fonctionnement en réseaux séparés pour les départs prédéterminés.

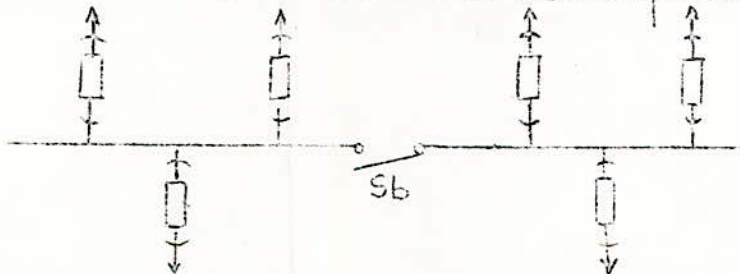


Fig 12

Le jeu de barres bouclé (fig 13) comportant plusieurs sectionneurs, permettant d'isoler, en cas de besoin, une partie du poste sans arrêter la totalité de l'installation.

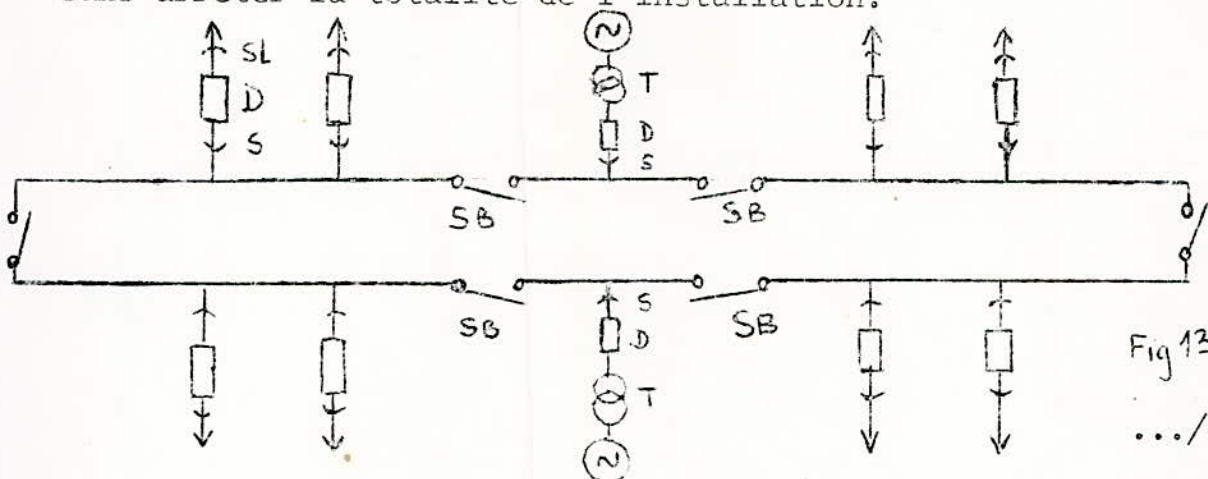


Fig 13

.../...

Cette combinaison améliore le fonctionnement en réseaux séparés et facilite l'entretien.
 Bien que ce schéma ne permette pas une grande souplesse d'exploitation il est utilisé souvent dans les postes élévateurs d'usines, lorsque les départs vers le réseau ne sont pas trop nombreux.

III -3.2. Circuit à deux jeux de barres normales

Dans la plupart des postes d'interconnexion ou de répartition HT, on utilise deux jeux de barres normales sectionnables ou non. Ces deux jeux de barres pouvant être éventuellement raccordés entre-eux par une travée de couplage (fig 14).

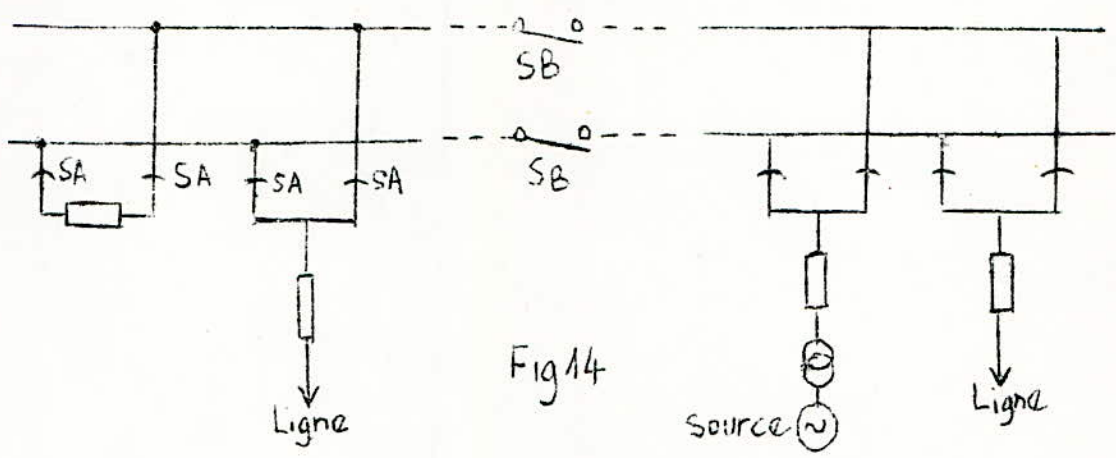


Fig 14

Dans un tel schéma (fig 14) on trouve en amont du disjoncteur de chaque départ, deux sectionneurs d'aiguillage SA permettant de raccorder le départ à l'un ou à l'autre des jeux de barres.

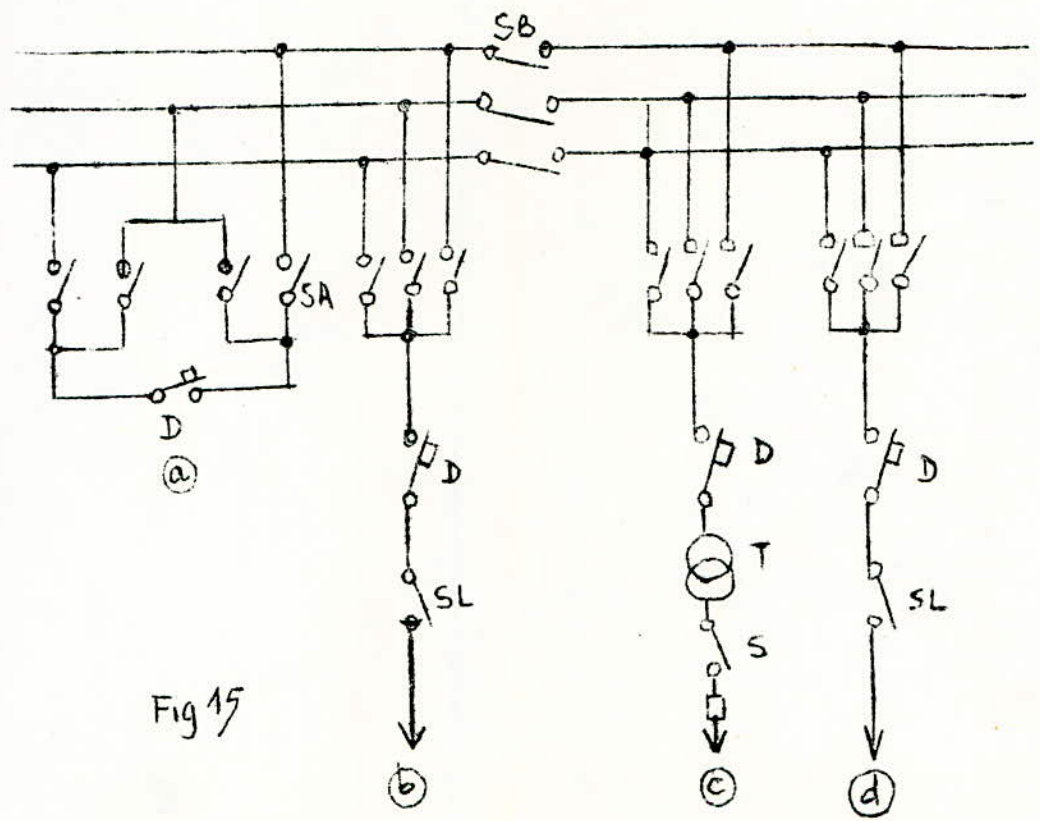
L'emploi de ces deux jeux de barres permet :

- la continuité du service dans le cas d'indispensabilité de l'un d'entre eux.
- la marche en réseau séparés de la combinaison quelconque des départs ;
- l'utilisation éventuelle de la travée de couplage pour dépanner un départ dont le disjoncteur est défaillant (après shuntage de ce dernier) ;
- la mise en parallèle aisée de groupes de départs au moyen du disjoncteur de couplage.

.../...

III -3.3. Circuit à trois jeux de barres normales

Dans certains grands postes, afin de faciliter encore la marche en réseaux séparés de groupes de départs, dans le but de diminuer les courants de court-circuit sur les barres des postes, on est parfois amené à utiliser des schémas à 3 jeux de barres normales (fig 15)



- B. O = barres omnibus
- (a) : couplage
- (b) : départ ou arrivée (ligne aérienne)
- (c) : transformateur
- (d) : départ ou arrivée (câble)

III -4- Choix d'un schéma :

Les différents types de schémas examinés ci-dessus peuvent être classés les uns par rapport aux autres en fonction des critères suivants :

.../...

- souplesse de l'exploitation
- facilité d'entretien
- élimination des défauts
- coût des ouvrages

Ces critères interviennent dans le choix d'un schéma qui dépendra en définitive de celui d'entre-eux auquel l'exploitant attribue le plus d'importance.

Généralement le plus adopté pour l'équipement est le schéma à 2 jeux de barres normales dont 1 seul peut n'être installé qu'en 1ère étape mais dont la possibilité d'adjonction ultérieure du 2ème est réservée.

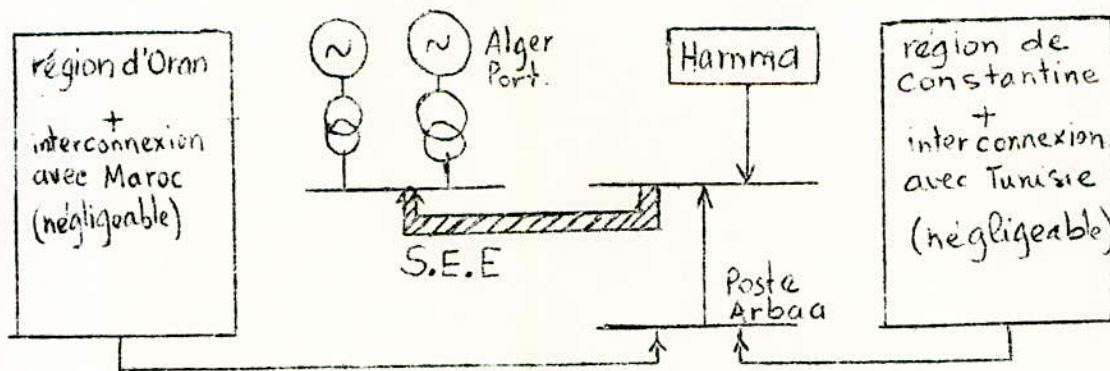
C'est ce type qui existe à la centrale d'Alger-Port II.

IV. Généralités sur la centrale d'Alger-Port II

---:---:---:---:---:---:---:---:---:---:---:---:---:---:---:---:---

Il serait intéressant de situer la centrale d'Alger dans le réseau national avant d'en parler directement. Le dispatching national ci-joint nous montre la contribution de cette centrale au réseau national et nous permet de voir aisément l'apport en énergie des autres centrales lors d'un défaut au niveau de celle qui nous concerne.

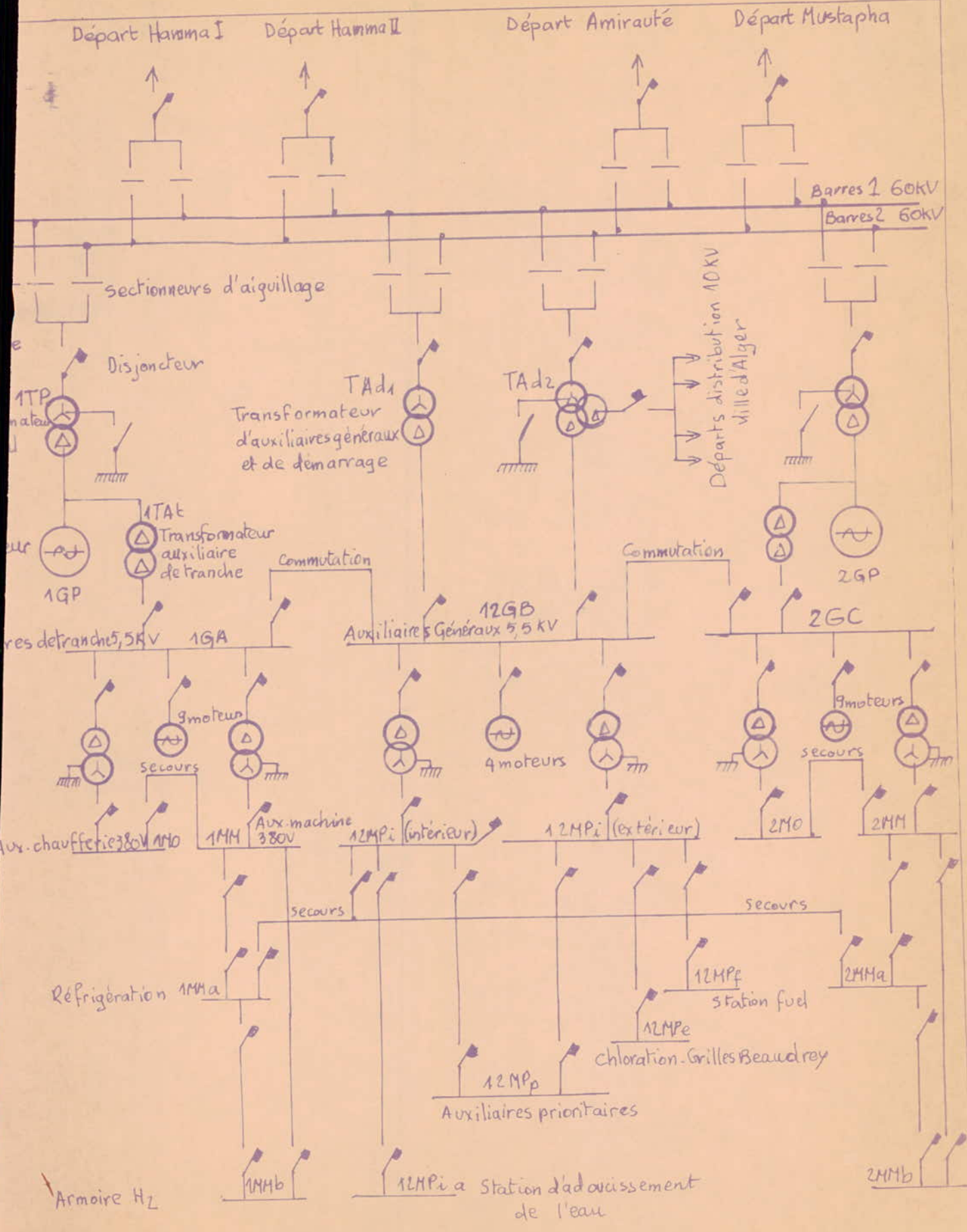
On remarque que vu les longues distances qui séparent notre centrale des autres (exceptée celle de Hamma) on a de grandes réactances donc une contribution relativement faible en puissance lors d'un défaut. Ainsi le système électro-énergétique équivalent sera formé par une grande part de Hamma et pour une petite part de toutes les autres sources alimentant le défaut par l'intermédiaire du poste de l'Arbaa. (voir fig ci-après)



La contribution des réseaux Marocain et Tunisien interconnectés au réseau Algérien est négligeable vu leur éloignement. Maintenant nous allons donner le schéma unifilaire de la centrale d'Alger-Port II ainsi que les caractéristiques électriques dont on a besoin.

.../...

SCHEMA ELECTRIQUE UNIFILAIRE

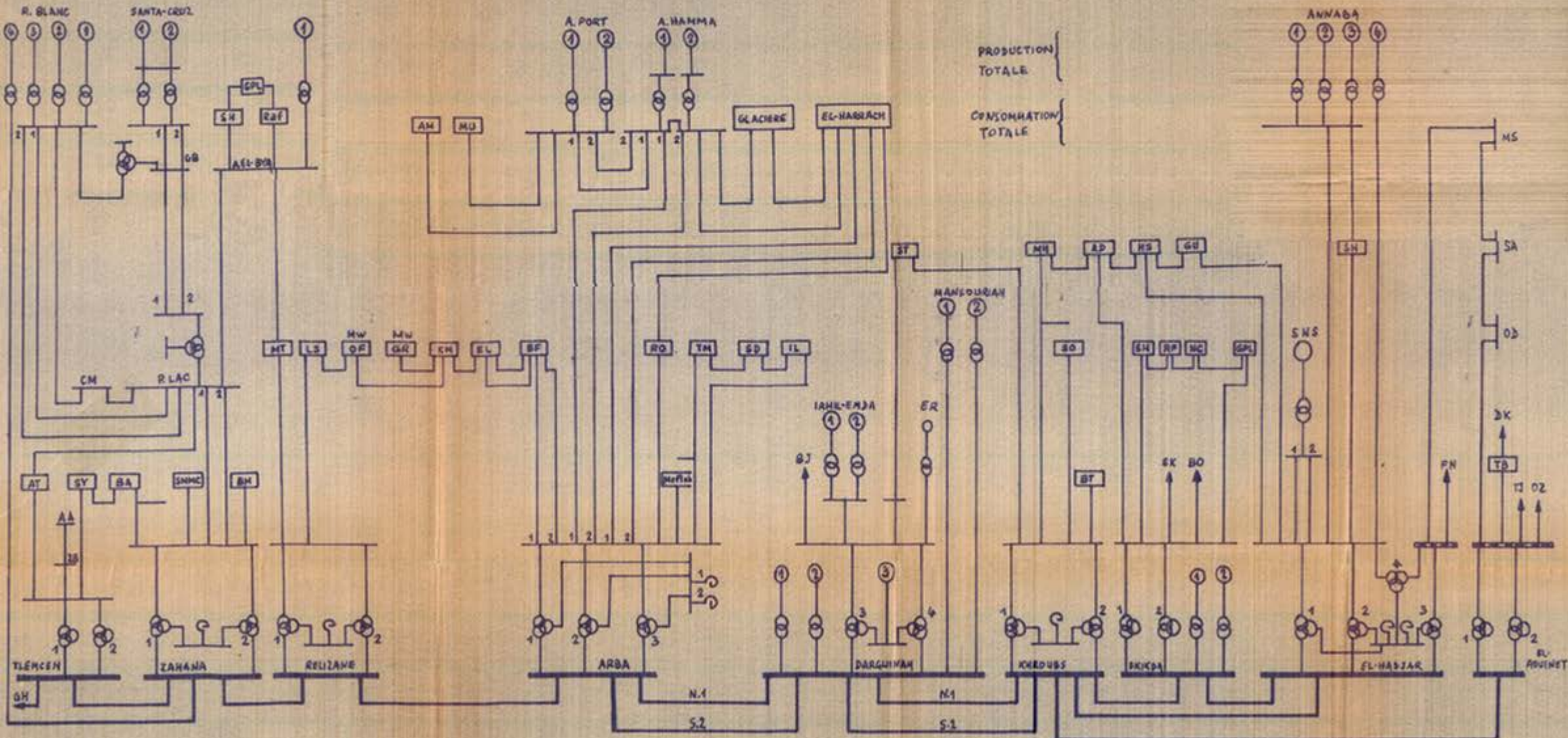


ALGERIA NATIONAL

COMPLEXE D'ORAN { PRODUCTION :
CONSUMMATION :

COMPLEXE D'ALGER { PRODUCTION :
CONSUMMATION :

COMPLEXE DE CONSTANTINE { PRODUCTION :
CONSUMMATION :



Dans ce schéma nous allons nous intéresser à la partie 60 KV soit les circuits principaux.

En régime normal les 2 jeux de barres ainsi que les 2 générateurs sont en service. Par contre pour Hamma un départ est en service l'autre en réserve. Sur chaque jeu de barres est branché 1 seul générateur ; ces 2 jeux de barres étant mis en parallèle par l'intermédiaire du disjoncteur de couple transversal constamment en service. Dans le cas d'une avarie ou d'un entretien d'un des 2 jeux de barres les 2 générateurs sont branchés sur l'autre jeu de barres ainsi que les consommateurs et départs.

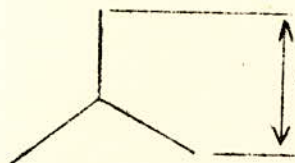
jeu de barres 60 KV

2 jeux en Cu, dimensionnés pour $I_n = 3000 \text{ A}$ et $I_{cc} = 25000 \text{ A}$
Chaque phase est constituée de 2 profilés en U : $100 \times 50 \times 5$
Les profilés sont supportés par des isolateurs du type colonne isolement 72,5 KV. Ces isolateurs sont fixés en diagonale.
L'entraxe des isolateurs supports d'une même phase est de 2,75m correspondant à la moitié du pas d'une cellule. Il y a 10 entraxes soit la longueur totale de la barre : $2,75 \text{ m} \times 10 = 27,5 \text{ m}$
L'entraxe entre phase est 1m80
Les jeux de barres sont coulissants avec point fixe à mi-longueur
Les profilés sont fixés sur les isolateurs par des serres, barres qui comportent également à la partie supérieure un raccord pour tube en dérivation de 60×70

Alternateur :

SW

- type..... Triphasé 10.300 V refroidissement hydrogène.
- Puissance..... 75 MVA avec pression hydrogène 2 bars et facteur de puissance 0,8
- Nombre..... 2
- Excitation..... Shunt avec survolteur-dévolteur en série dans l'enroulement d'excitation. Régulation de tension à amplificateurs magnétiques agissant sur l'enroulement de commande du survolteur-dévolteur.
- Réfrigération hydrogène.... 4 réfrigérants dans la carcasse de l'alternateur, traversés par l'eau d'extraction.



10.300 v , $I_{\text{par phase}} = 4200 \text{ A}$

$f = 50 \text{ Hz}$, $N = 3000 \text{ tr/min}$

.../...

Réactance surtransitoire $X''_d = 19,8 \%$

Transformateur principal :

SW

type..... Triphasé λ/Δ 10,3/60 KV

nombre..... 2

puissance..... 75 MVA avec réfrigération circulation d'huile forcée dans réfrigérant eau de mer.

Tension de court-circuit..... Ucc = 9,7 %

Diélectrique..... huile

Disjoncteurs types PMR 63-8 et PMR 63-16

-----oO00o-----

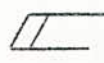
	UN	IN	P. coupure	Régime de fonctionnement	
AM	60 kv	800	24 KA	240 A	25 MVA
MU	"	"	"	240	25
Tad1	"	"	"	53	5,5
Tad2	"	"	"	290	30
Couplage	"	"	23 KA	720	75
Hamma II	"	"	"	720	75
Hamma I	"	"	"	720	75
Réserve	"	"	"	720	75
G1	"	"	"	720	75
G2	"	"	"	720	75

.../...

SECTIONNEURS

---oOo---

	UN	IN	Régime de fonctionnement
AM	60 KV	800 A	240
MU	"	800	240
Tad1	"	800	53
Tad2	"	800	290
Couplage:	"	1 600	720
Hamma I	"	1 600	720
Hamma II	"	1 600	720
Réserve	"	1 600	720
G 1	"	1 600	720
G 2	"	1 600	720

 H A P I T R E II

Les COURTS-CIRCUITS

GENERALITES

La valeur maximale du courant (I_{km}) apparaît pendant la première demie-période. Simultanément avec l'augmentation du courant dans le circuit avarié apparaît la diminution de la tension s'annulant au point de court-circuit. Les effets négatifs de cette baisse de tension peuvent être par exemple la diminution du couple moteur (proportionnel au carré de U) donc le décrochage des moteurs synchrones. Pour limiter ces effets les générateurs sont équipés de régulateur automatique de tension (RAT)

Ces grands courants ont d'autres effets, ceux qui sollicitent les installations thermiquement et dynamiquement.

Le calcul exact est difficile à cause de la complexité du processus transitoire ; en pratique on utilise les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Circuits magnétiques non saturés, donc schémas linéaires.
- Courants de magnétisation des transformateurs et auto-transformateurs négligeables.
- Résistances négligeables devant les réactances

$\gamma_k(U, I) = \frac{\pi}{2}$, donc addition des courants comme en continu.

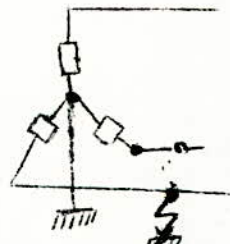
- Charges approximatives.

Ces simplifications dépendent du schéma à étudier et de la précision nécessaire pour le calcul : on admet des erreurs plus grandes dans le choix et la vérification des appareils et des barres.

Types de Courts-Circuits

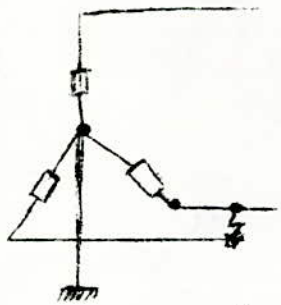
Courts-Circuits non symétriques.

* Monophasés



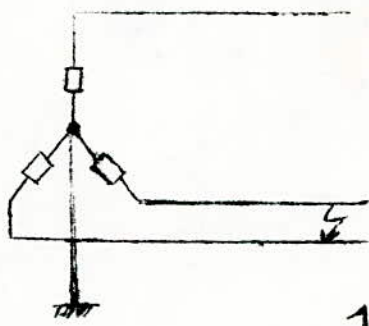
65 % de fréquence

* Biphassés sans terre



20 %

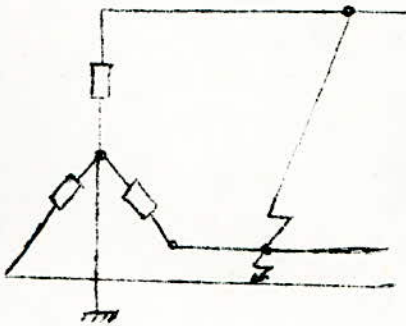
Biphassés avec terre



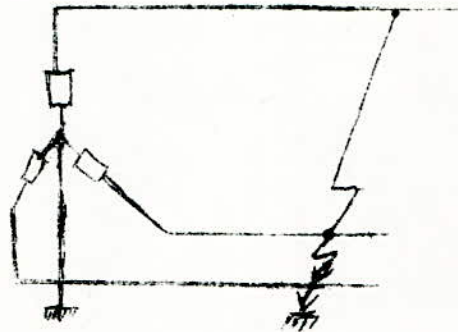
10 %

Courts-Circuits Symétriques

* Triphasés sans terre



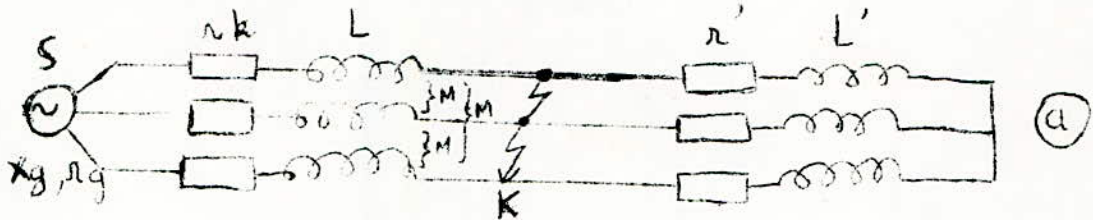
Triphasés avec terre



5 %

II - Courants de Courts-Circuits
Triphasés Symétriques

Considérons 1 circuit triphasé symétrique non ramifié dans lequel se produit un court-circuit.



II.1 Cas Simplifié

Nous simplifions l'étude en considérant que le court-circuit est alimenté par une source de puissance infinie donc d'impédance nulle ($X_g = 0, R_g = 0$), de tension sinusoïdale avec amplitude constante et de courant périodique d'amplitude constante.

Il ne s'agit là bien sûr^{que} d'un cas théorique qui va nous servir à déterminer l'allure des courants des courts-circuits, allure se rapprochant de celle du cas pratique réel que nous verrons plus loin.

II.1.1. Etablissements des équations

Vu la Symétrie on a :

$$\left. \begin{aligned} U_A &= U_m \sin (wt + \alpha) \\ U_B &= U_m \sin (wt + \alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ U_C &= U_m \sin (wt + \alpha - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \right\} \textcircled{1}$$

$$\left. \begin{aligned} i_A &= I_m \sin (wt + \alpha - \varphi) \\ i_B &= I_m \sin (wt + \alpha - \varphi - \frac{2\pi}{3}) \\ i_C &= I_m \sin (wt + \alpha - \varphi - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \right\} \textcircled{2}$$

α : Phase initiale de la tension

φ : Déphasage entre U et I

Le système d'équations qui décrit le régime de Court-circuit est :

$$\left. \begin{aligned} U_A &= r_K \cdot i_A + L \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt} \\ U_B &= r_K \cdot i_B + L \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt} + M \frac{di_A}{dt} \\ U_C &= r_K \cdot i_C + L \frac{di_C}{dt} + M \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} \end{aligned} \right\} \textcircled{3}$$

$i_A + i_B + i_C = 0$

En général pour une phase :

$u = r_K \cdot i + L k \frac{di}{dt}$ $\textcircled{4}$ avec $lk = L - M$

La solution est de la forme $i_k = I_{pm} \sin (wt + \alpha - \varphi_k) + C e^{-t/Ta} = i_p + i_a$ $\textcircled{5}$

Où $I_{pm} = \frac{U_m}{r_K}$

$i_p = i$ périodique

$i_a = i$ apériodique.

$r_K = \sqrt{\frac{r}{r} K + (\omega L K)^2}$ impédance du circuit court-circuité

$\varphi_K =$ avec $\text{tg } \frac{\varphi_K}{r_K}$

$Ta = \frac{LK}{\omega r_K}$

constante de temps du circuit.

C = constante dépendant des conditions initiales.

Soit :

$$\left. \begin{aligned} i_{kA} &= I_{pm} \sin (wt + \alpha - \varphi_k) + i_{aA} e^{-t/Ta} &= i_{pA} + i_{pA} \\ i_{kB} &= I_{pm} \sin (wt + \alpha - \varphi_k - \frac{2\pi}{3}) + i_{aB} e^{-t/Ta} &= i_{pB} + i_{pB} \\ i_{kC} &= I_{pm} \sin (wt + \alpha - \varphi_k - \frac{4\pi}{3}) + i_{aC} e^{-t/Ta} &= i_{pC} + i_{pC} \end{aligned} \right\} \textcircled{6}$$

Dans un circuit inductif le courant ne peut pas varier brusquement car il en résulterait une tension infinie.

(UL = L di/dt). Donc à T = 0 : Icc = In donc

(4)
$$\begin{aligned} I_{a0} &= I_{KA0} = i_{pA0} + i_{aA0} \\ i_{Bo} &= i_{KB0} = i_{pB0} + i_{aB0} \\ i_{Co} &= i_{KC0} = i_{pC0} + i_{aC0} \end{aligned}$$

En portant (2) et (6) dans (7) on détermine

(8)
$$\begin{aligned} i_{aA0} &= i_{A0} - i_{pA0} = I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{pm} \sin(\alpha - \varphi_K) \\ i_{aB0} &= \\ i_{aC0} &= \end{aligned}$$

En remplaçant (8) dans (6) on obtient :

(9)
$$\begin{aligned} 1/ i_{KA} &= I_{pm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) + \left[I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{pm} \sin(\alpha - \varphi_K) \right] e^{-t/\tau_a} \\ 2/ i_{KB} &= I_{pm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K - \frac{2\pi}{3}) + \left[I_m \sin(\alpha - \varphi - \frac{2\pi}{3}) - I_{pm} \sin(\alpha - \varphi_K - \frac{2\pi}{3}) \right] e^{-t/\tau_a} \\ 3/ i_{KC} &= I_{pm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K - \frac{4\pi}{3}) + \left[I_m \sin(\alpha - \varphi - \frac{4\pi}{3}) - I_{pm} \sin(\alpha - \varphi_K - \frac{4\pi}{3}) \right] e^{-t/\tau_a} \end{aligned}$$

Puisque r est négligeable devant X, $\varphi_K \approx \frac{\pi}{2}$

II. 1.2. Valeurs extrêmes :

On dérive (9) :

(10)
$$\begin{aligned} 1/ \frac{di_{KA}}{dt} = 0 &= \omega I_{pm} \cos(\omega t + \alpha - \varphi_K) - \frac{1}{\tau_a} \left[I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{pm} \sin(\alpha - \varphi_K) \right] e^{-t/\tau_a} \\ 2/ \frac{di_{KB}}{dt} = 0 &= I_{pm} \cos(\omega t + \alpha - \varphi_K) + \left[I_m \cos(\alpha - \varphi) - I_{pm} \cos(\alpha - \varphi_K) \right] e^{-t/\tau_a} \\ 3/ \frac{di_{KC}}{dt} = 0 &= e^{-t/\tau_a} \sin(\alpha - \varphi) = 0 \\ 4/ \frac{di_{KA}}{d\varphi} = 0 &= -I_m e^{-t/\tau_a} \cos(\alpha - \varphi) = 0 \end{aligned}$$

Valeurs maximales

$$\begin{aligned} 10 - 3 \Rightarrow \alpha = \varphi \\ 10 - 4 \Rightarrow I_m = 0 \end{aligned} \Rightarrow 10 - 1 \text{ et } 10 - 2 \Rightarrow \begin{cases} \varphi = 0 \\ t = 0,01 \text{ sec} \end{cases}$$

On introduit ces valeurs dans 9/1.2.3 on obtient :

$i_{KA} \text{ max} = 2 I_{pm}$	pour $\alpha = 0$	$U = 0$
$i_{KB} \text{ max} = 2 I_{pm}$	pour $\alpha = 2\pi/3$	
$i_{KC} \text{ max} = 2 I_{pm}$	pour $\alpha = 4\pi/3$	

Valeurs minimales

Il existe 4 cas de conditions d'obtention des minimums.

$$1^{\circ}) \begin{cases} 10 - 3 \rightarrow t = \infty \\ 10 - 4 \rightarrow \alpha - \varphi = \pm \frac{\pi}{2} \end{cases} \forall I_m$$

En introduisant ces valeurs dans 9 on obtient $i_{kmin} = I_{pm}$

$$2^{\circ}) \text{ et } 3^{\circ}) \quad T=0 \text{ et } i_{u0} = 0 \rightarrow \begin{cases} I_m = 0 \text{ et } \alpha = \pm \frac{\pi}{2} \\ \alpha = \varphi = \pm \frac{\pi}{2} \forall I_m \end{cases} \Rightarrow \boxed{\begin{matrix} k_{min} = 0 \\ U = U_m \end{matrix}}$$

$$4^{\circ}) t=0 \quad I_m = 0 \quad \alpha = 0 \Rightarrow \boxed{\begin{matrix} k_{min} = 0 \\ U = 0 \end{matrix}}$$

Comme seulement le maximum nous intéresse penchons nous davantage sur ce cas et voyons maintenant non pas comme précédemment $I_m=0$ mais $I_m \neq 0$ c'est à dire que le circuit était en charge antérieurement au court-circuit.

$$10 - 4 \rightarrow \alpha - \varphi = \pm \frac{\pi}{2} \quad \xrightarrow{10-1 \text{ et } 10-2} \text{ pour phase A : } \alpha = K\pi \Rightarrow t = 0, 01 \text{ s}$$

$$\boxed{\begin{matrix} I_m \neq 0 \\ \alpha = K\pi, \alpha - \varphi = \pm \frac{\pi}{2} \\ t = 0, 01 \text{ sec} \end{matrix}}$$

$$\begin{aligned} B : \alpha - 2\frac{\pi}{3} &= K\pi \\ C : \alpha - 4\frac{\pi}{3} &= K\pi \end{aligned}$$

Le maximum a lieu pour $\left\{ \begin{matrix} \alpha = 0 \text{ et } \varphi = -\frac{\pi}{2} \\ \text{et } \alpha = \pi \text{ et } \varphi = -\frac{\pi}{2} \end{matrix} \right\}$ soit en régime capacitif.

$$\boxed{i_{kmax} = 2 I_{pm} + I_m} \quad \text{le même en A, B et C}$$

Dans le cas inductif $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ou $\varphi = 3\frac{\pi}{2}$ on a :

$$\boxed{i_{kmax} = 2 I_{pm} - I_m.}$$

résumé

Le régime capacitif avant l'apparition du court-circuit est le plus dangereux

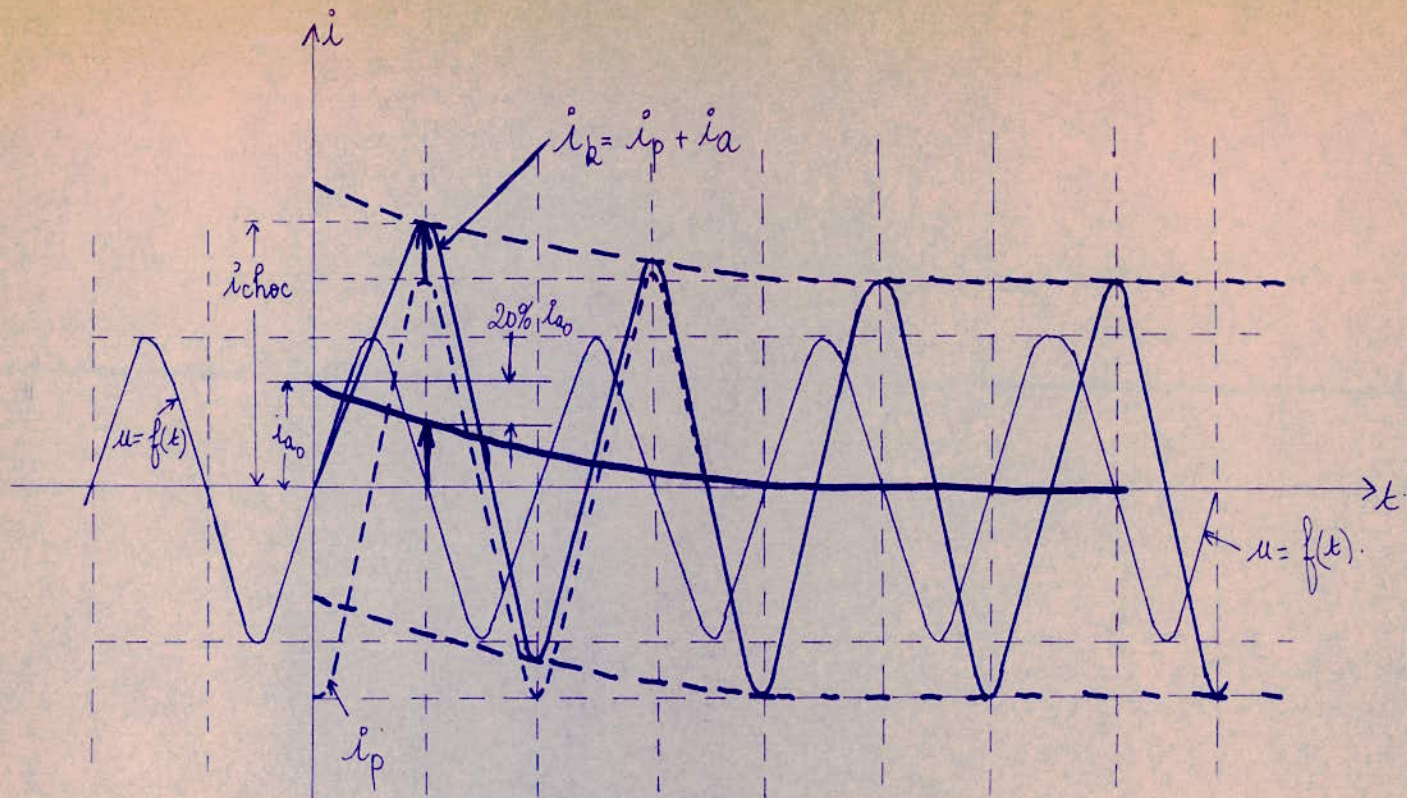
$$I_{Kmax} = 2 I_{pm} + I_m$$

Le régime inductif est moins dangereux car

$$I_{Kmax} = 2 I_{pm}$$

Mais habituellement en régime normal les circuits ne sont pas capacitifs. On considère donc le cas du régime inductif le plus dangereux soit celui de

$$\boxed{\begin{matrix} I_m = 0 \\ \alpha = \varphi = 0 \\ t = 0, 01 \text{ sec (phase A)} \end{matrix}} \Rightarrow \begin{matrix} i_{kmax} \\ U=0 \end{matrix} = 2 I_{pm} \quad (12)$$

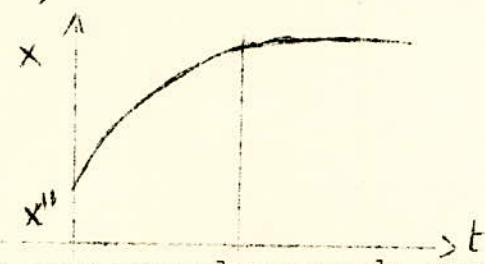


Variation du courant et de la tension traduisant la relation (12)

II .2. Cas réel

Maintenant nous allons supposer le cas pratique et réel celui du lieu de court-circuit alimenté par des générateurs synchrones et non par des sources infinies tel que nous l'avons supposé jus que là.

I_p n'a plus une amplitude constante mais décroissante car là réactance varie suivant la fig ci-dessous A partir d'un certain temps la courbe présente un palier et se stabilise ($I_{p\text{permanent}}$ noté I_{∞})



On voit bien qu'il y aura une plus grande contribution au début où la réactance est la plus faible (réactance subtransitoire à $t=0$)

Par rapport au cas de source ∞ nos amplitudes seront plus petites vu la réactance subtransitoire des générateurs synchrones.

Nous obtenons les figures suivantes qui ont la même allure que les figures des courants de puissance ∞ mais qui toutefois leur sont différentes.

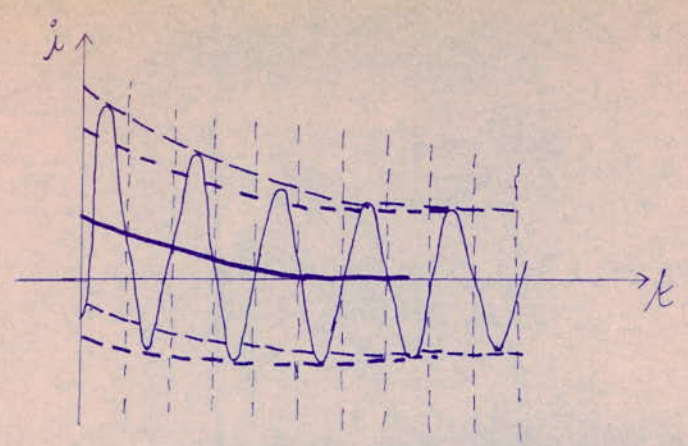
La réactance subtransitoire faible se traduira par un courant plus grand qu'on retrouve en valeur efficace au temps $t=0$

Tous les calculs que nous ferons seront donc pour le temps $t=0$ du court circuit et faits avec la réactance subtransitoire correspondant à la réactance des générateurs au début du court-circuit.

Nous utiliserons la méthode de transfiguration des schémas équivalents.

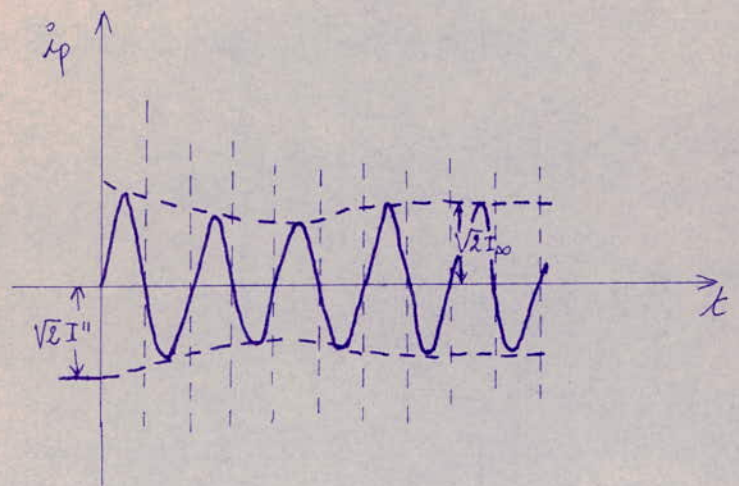
La méthode sera exposée au fur et à mesure de l'application.

Fig 1.



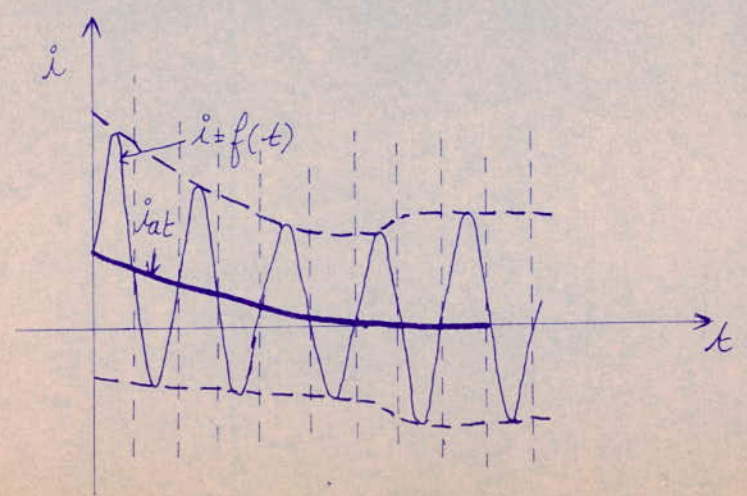
(Fig1) Variation du courant de cc total sans RAT

Fig 2



(Fig2) Composante périodique du courant de cc avec RAT

Fig 3

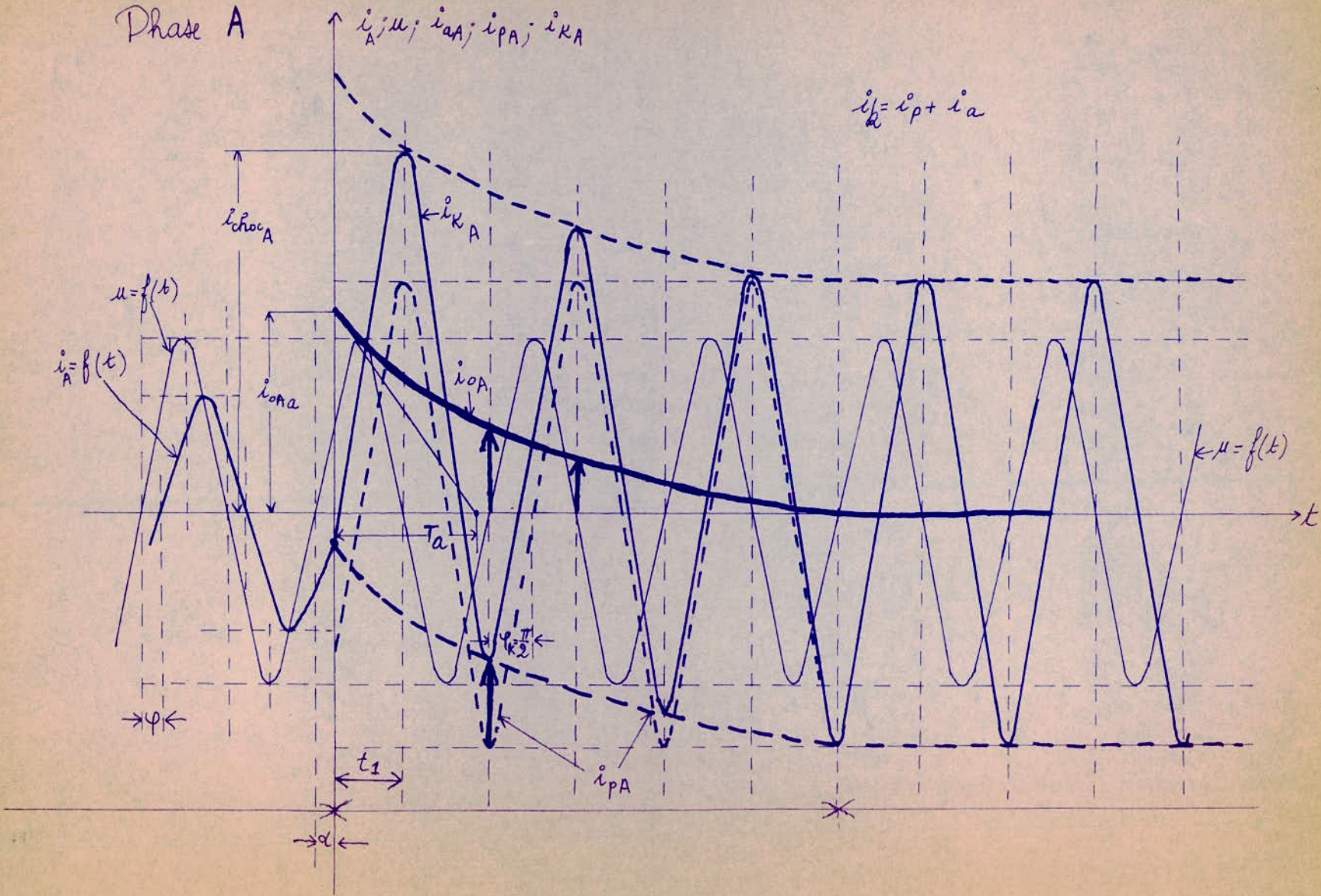


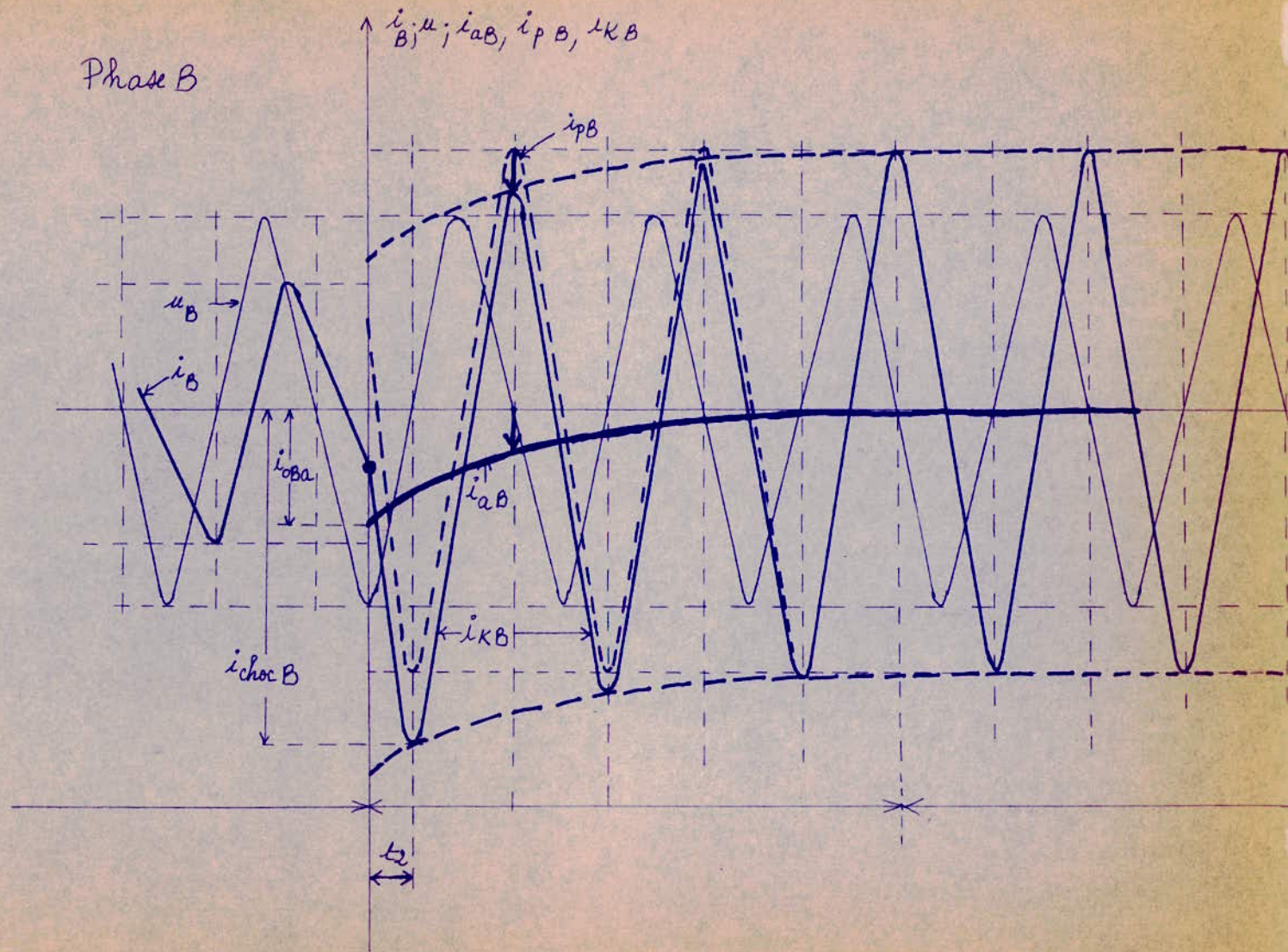
(Fig3) Variation du courant de cc total avec RAT

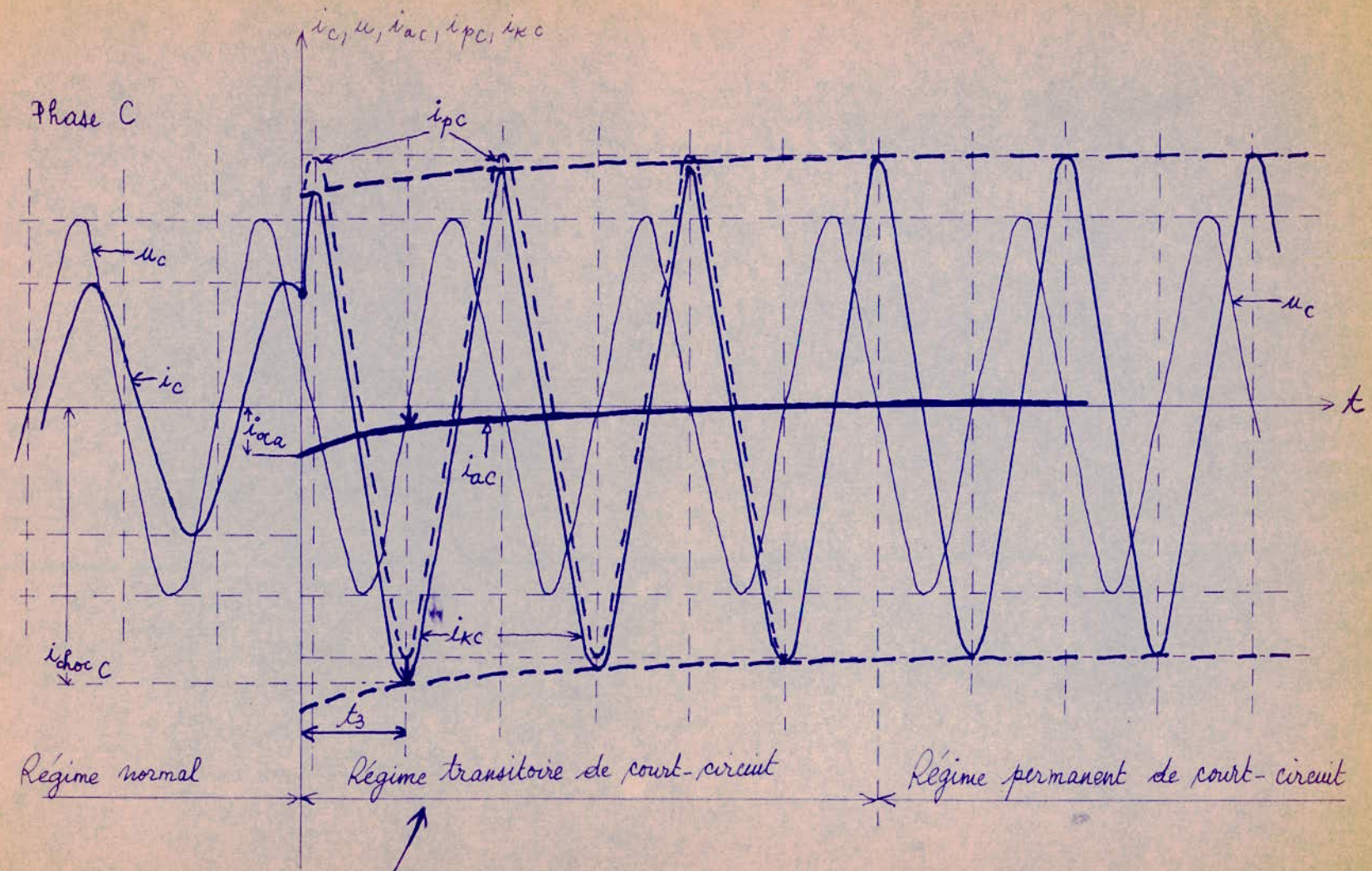
Phase A

$i_A; \mu; i_{aA}; i_{pA}; i_{KA}$

$$i_k = i_p + i_a$$







Le régime transitoire n'existe pas dans le cas de circuit sans réactance : $X_k = 0$

 H A P I T R E III

CALCUL DES COURANTS
DE COURT-CIRCUIT

- Application -

III-I Systèmes de grandeurs réduites

Ce système est utilisé pour simplifier les calculs des courants de court-circuits. La grandeur réduite d'une grandeur physique est un nombre qui s'obtient en rapportant cette grandeur à une grandeur physique de même nature qui a été choisie comme grandeur de mesure et nommée grandeur de base: les valeurs réduites n'ont donc pas de dimension.

Les quatre grandeurs utilisées habituellement sont (S,U,I,X) et seulement deux sont indépendantes; il faut donc choisir deux grandeurs de base: on choisit habituellement S_b et U_b et il en résulte I_b et X_b : $I_b = S_b / 3 U_b$; $X_b = U_b^2 / S_b$

On obtient les grandeurs de base réduites :

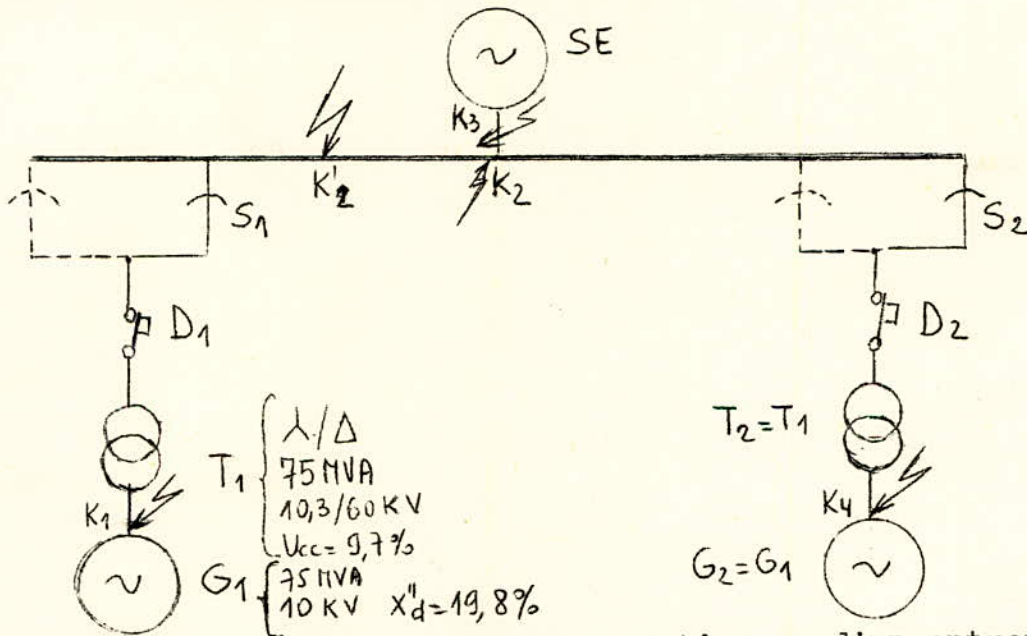
$$S_b^0 = S / S_b \quad U_b^0 = U / U_b \quad E_b^0 = E / U_b \quad I_b^0 = I / I_b \quad X_b^0 = X / X_b = X S_b / U_b^2$$

Habituellement le constructeur donne les caractéristiques des machines en grandeurs réduites nominales. Pour passer à la base choisie on utilise:

$$S_b^0 = S_n^0 S_n / S_b \quad U_b^0 = U_n^0 \cdot U_n / U_b \quad I_b^0 = I_n^0 \cdot I_n / I_b \quad X_b^0 = X_n^0 \cdot \frac{U_n^2 S_b}{U_b^2 S_n}$$

Généralement on prend comme tension de base la tension moyenne normale normalisée d'une tranche de circuit et comme puissance de base 100 MVA ou 1000 MVA .

III.2. Première variante : 2 alternateurs



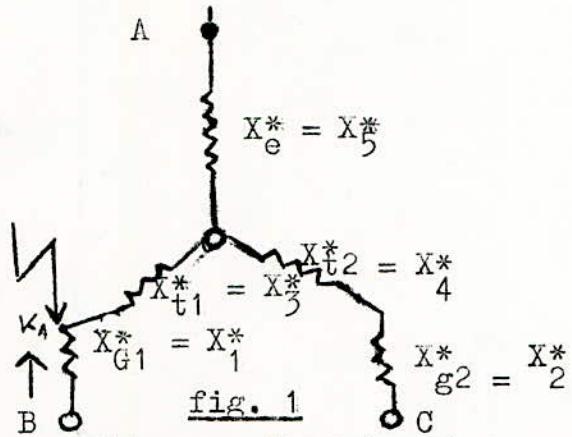
Ce schéma représente le cas d'une réparation ou d'un entretien d'un des deux jeux de barres. Dans une première étape nous considérons la puissance de court-circuit minimum du système énergétique et dans une deuxième étape sa puissance de court-circuit maxi. On remarque qu'il ya quatre points de court-circuits (K_1, K_2, K_3, K_4) mais nous n'allons pas faire le calcul pour K_4 car il a les memes effets que K_1 , à cause de la symétrie du circuit .

III.2.1. Court-circuit en K_1 (fig I)

III.2.1.1. Puissance de court-circuit minimum du SE

.../...

Le schéma ci-dessus peut se représenter en fonction des réactances des différents éléments.



Nous allons simplifier ce schéma en mettant les réactances en série ou en parallèle de façon à déterminer la réactance équivalente totale (X_{Σ}^*) jusqu'au point de court-circuit.

La grandeur réduite (rapportée aux grandeurs de base) de la composante périodique du courant à l'instant initial sera :

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

ou E''^* = tension subtransitoire du générateur en grandeur réduite.
 X_{Σ}^* = réactance équivalente entre la source et le lieu de court-circuit, en grandeur réduite.

Dans les calculs pratiques la tension surtransitoire E'' du générateur peut être considérée égale à : $E'' = 1,1 U_n$

où U_n = tension nominale du générateur.
 Puisqu'on considère $U_b = U_n$ et $E''^* = \frac{1,1 U_n}{U_b}$

on a

$$\begin{cases} E''^* = 1,1 \\ I''^* = \frac{1,1}{X_{\Sigma}^*} \end{cases}$$

Les réactances directes des différents éléments sont :

TRANSFORMATEURS :

La réactance est égale à la tension de court-circuit en %

$X_{t1} = X_{t2} = 9,7\% = 0,097$

ALTERNATEURS :

$X_{g1} = X_{g2} = 19,7\% = 0,197$

Calcul des réactances réduites de base :

Puissance apparente du générateur
 $S_n = 75 \text{ MVA}$

.../...

On choisit une puissance de base

$$S_b = 100 \text{ MVA}$$

On choisit aussi une tension de base

$$U_b = 10,3 \text{ KV}$$

On en déduit le courant de base

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}U_b} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,3} = 5,6 \text{ KA}$$

Nota : Ces grandeurs de base sont conservées dans toute l'étude.

Réactance réduite de base du générateur :

$$X_{g1}^* = X_{dg1}^* \cdot \frac{S_b}{S_{ng1}} = X_{bg2}^*$$

$$X_{g1}^* = X_{g2}^* = 0,197 \cdot \frac{100}{75} = 0,263$$

$$X_{g1}^* = X_{g2}^* = 0,263$$

Réactance réduite de base du transformateur :

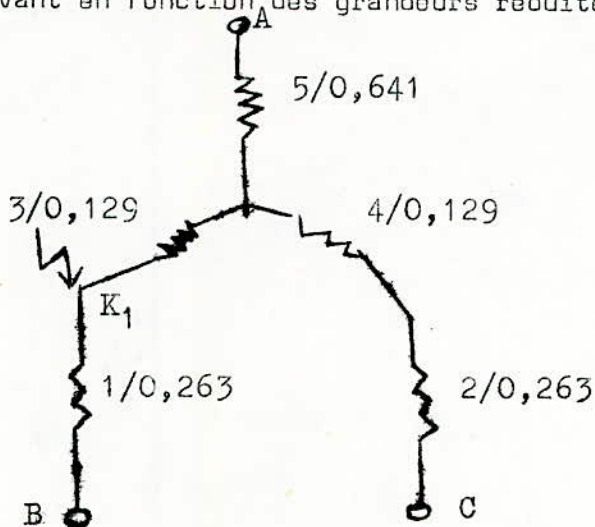
$$X_{t1}^* = X_{t2}^* = X_{tr}^* \cdot \frac{S_b}{S_{ntr}} = 0,097 \cdot \frac{100}{75} = 0,129$$

$$X_{t1}^* = X_{t2}^* = 0,129$$

Réactance réduite de base du système énergétique :

$$X_e^* = \frac{S_b}{S_{c.c. 156}} = 0,641$$

D'où le schéma suivant en fonction des grandeurs réduites :

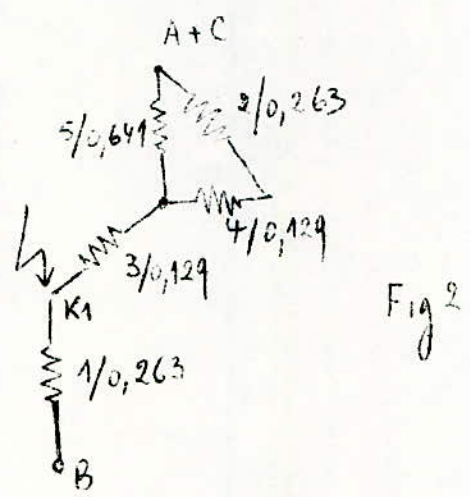


.../...

Les différentes réactances sont notées 1,2,3,..... et leurs valeurs inscrites à côté :

TRANSFIGURATIONS :

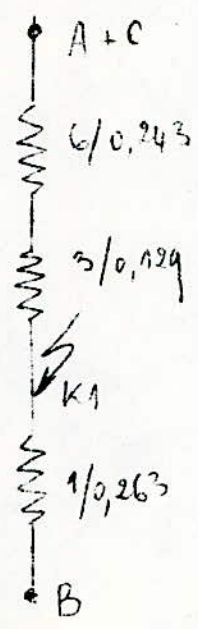
On considère que les générateurs d'énergie ont leur neutre au même potentiel et par conséquent on peut les relier; en reliant d'abord les points A et C nous obtenons :



$X5^*$ et $(X2^* + X4^*)$ sont en parallèle. Remplaçons les par leur réactance équivalente $X6^*$.

$$X6^* = \frac{X5^*(X2^* + X4^*)}{X5^* + X2^* + X4^*} = \frac{0,641 (0,263 + 0,129)}{0,641 + 0,263 + 0,129} = 0,243$$

Après cette transformation, la figure 2 ci-dessus devient :

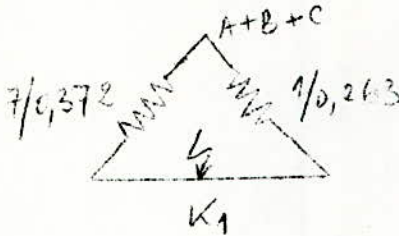


.../...

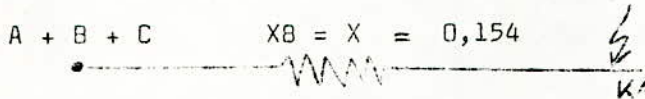
Remplaçons les réactances $X6^*$ et $X3^*$ par leur somme $X7^*$.

$$X7^* = X6^* + X3^* = 0,243 + 0,129 = 0,372$$

Enfin relient le dernier générateur (B) aux deux autres (A+C)



$X7^*$ et $X1^*$ sont en parallèle ; remplaçons les par leur réactance équivalente $X8^*$



$$X_{\Sigma}^* = \frac{X7^* \cdot X1^*}{X1^* + X7^*} = \frac{0,372 \cdot 0,263}{0,372 + 0,263} = 0,154$$

Courant de court-circuit surtransitoire réduit en $K1$.

$$I_{K1}^{''*} = \frac{E^{''*}}{X_{\Sigma}^*} = \frac{1,1}{0,154} = 7,142$$

Courant de court-circuit surtransitoire réduit dans la réactance $X1^*$.

$$I_{G1}^{''*} \cdot X1^* = X_{\Sigma}^* \cdot I_{K1}^{''*} \Rightarrow I_{G1}^{''*} = \frac{X_{\Sigma}^* \cdot I_{K1}^{''*}}{X1^*} = \frac{1,1}{0,263}$$

$$I_{G1}^{''*} = \frac{1,1}{0,263} = 4,182$$

Courant de court-circuit surtransitoire réduit dans $(X6^* + X3^*) = X7^*$

Soit $I^{''*} 7$ ce courant

$$X7^* \cdot I^{''*} 7 = X_{\Sigma}^* \cdot I_{K1}^{''*} \Rightarrow I^{''*} 7 = \frac{I_{K1}^{''*} \cdot X_{\Sigma}^*}{X7^*} = \frac{1,1}{0,372} = 2,956$$

$$\text{Donc } I^{''*} 6 = I^{''*} 3 = I^{''*} 7 = 2,956$$

Courant surtransitoire réduit dans $(X2^*$ et $X4^*)$

$I^{''*} 2 = I^{''*} 4$ car $X2^*$ et $X4^*$ sont en série.

$$X6^* \cdot I^{''*} 6 = (X2^* + X4^*) \cdot I^{''*} 2 = \frac{X6^* \cdot I^{''*} 6}{X2^* + X4^*} = \frac{0,243 \cdot 2,956}{0,263 + 0,129} = 1,806$$

$$I^{''*} 2 = I^{''*} 4 = 1,806$$

Courant surtransitoire réduit dans $X5^*$

$$X5^* \cdot I^{''*} 5 = X6^* \cdot I^{''*} 6 \Rightarrow I^{''*} 5 = \frac{X6^* \cdot I^{''*} 6}{X5^*} = \frac{0,243 \cdot 2,956}{0,641} = 1,103$$

En définitive les différents courants, au moment du court-circuit, rapportés au système de grandeurs de base choisi sont :

$$I''_{G1} = 4,182 \quad I''_2 = I''_4 = 1,806$$

$$I''_3 = 2,956 \quad I''_5 = 1,103.$$

Maintenant nous allons calculer la valeur réelle du courant dans chaque branche au moment du court-circuit.

Courant surtransitoire donné par le générateur G_1 , en valeur réelle.

$$I''_{G1} = I''_{G1} \cdot I_b = 4,182 \cdot 5,6 \text{ KA} = 23,4 \text{ KA} \quad (\text{côté } 10,3 \text{ Kv})$$

Courant surtransitoire donné par le générateur G_2 , en valeur réelle :

$$I''_{G2} = I''_{G2} \cdot I_b = 1,806 \cdot 5,6 \text{ KA} = 10,113 \text{ KA} \quad (\text{côté } 10,3 \text{ Kv})$$

Courant surtransitoire donné par le système énergétique

$$I''_5 = I''_5 \cdot I_b = 1,103 \cdot 5,6 \text{ KA} = 6,176 \text{ KA} \quad (\text{côté } 10,3 \text{ Kv})$$

Courant surtransitoire traversant X 3*

$$I''_3 = I''_3 \cdot I_b = 2,956 \cdot 5,6 \text{ KA} = 16,553 \text{ KA} \quad (\text{côté } 10,3 \text{ Kv})$$

du côté 60 Kv :

$$I''_4 = I''_4 \cdot \frac{10,3}{60} = I''_{G2} \cdot \frac{10,3}{60} = 10,113 \cdot \frac{10,3}{60} = 1,736 \text{ KA}$$

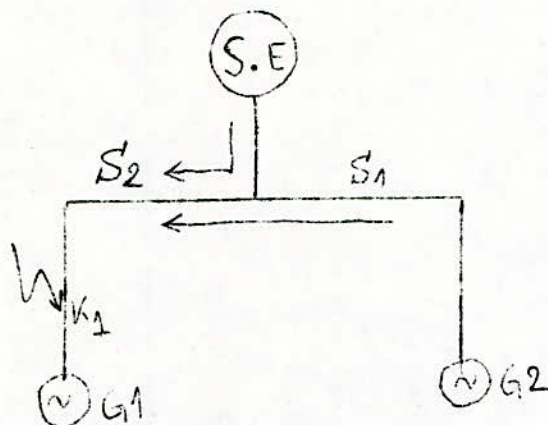
$$I''_3 = I''_3 \cdot \frac{10,3}{60} = 16,553 \cdot \frac{10,3}{60} = 2,841 \text{ KA}$$

$$I''_5 = I''_5 \cdot \frac{10,3}{60} = 6,176 \cdot \frac{10,3}{60} = 1,060 \text{ KA}$$

Remarque : On distingue deux sections ^{égales} dans le jeu de barres S1 et S2 parcourues par des courants différents lorsque le court-circuit a lieu en K1. La section S1 est traversée par I''_{G2} seulement alors que la section S2 est traversée par $I''_{G2} + I''_5$

$$S1 \rightarrow 1,736 \text{ KA}$$

$$S2 \rightarrow 1,736 \text{ KA} + 1,060 \text{ KA} = 2,841 \text{ KA}$$



.../...

III.2.1.2 Puissance de court-circuit du système énergétique maximum S_{ccmax} .

Les calculs sont les mêmes que ceux qu'on vient de faire, sauf que les applications numériques changent à cause de la réactance du système énergétique qui change de valeur, donc on pourra passer sur les détails déjà signalés.

→ $S_{ccmax} = 446 \text{ MVA}$ (relevée sur simulateur de Hamma)

Nouvelle réactance réduite de base du système énergétique

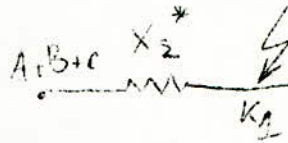
$$X_0^* = X_5^* = \frac{S_b}{S_{ccmax}} = \frac{100}{446} = 0,224$$

Valeurs des autres réactances

$$X_6^* = \frac{X_5^* (X_2^* + X_4^*)}{X_5^* + X_2^* + X_4^*} = \frac{0,224 (0,263 + 0,129)}{0,224 + 0,263 + 0,129} = 0,142$$

$$X_6^* = 0,142$$

$$X_7^* = X_6^* + X_3^* = 0,142 + 0,129 = 0,271$$



$$X_{\Sigma}^* = \frac{X_7^* \cdot X_1^*}{X_7^* + X_1^*} = \frac{0,271 \cdot 0,263}{0,271 + 0,263} = 0,133$$

Courant de court-circuit surtransitoire réduit en K1

$$I''_{K1}^* = \frac{E''^*}{X_{\Sigma}^*} = \frac{1,1}{0,133} = 8,270$$

Courant de court-circuit surtransitoire réduit dans la réactance X_1^* :

$$I''_{G1}^* \cdot X_1^* = X_{\Sigma}^* \cdot I''_{K1}^* \Rightarrow I''_{G1}^* = \frac{X_{\Sigma}^* \cdot I''_{K1}^*}{X_1^*} = \frac{1,1}{0,263} = 4,182$$

Courant de court-circuit surtransitoire réduit dans

$(X_6^* + X_3^*) = X_7^*$ soit I''_7^*

$$X''_7 \cdot I''_7^* = X_{\Sigma}^* \cdot I''_{K1}^* \Rightarrow I''_7^* = \frac{X_{\Sigma}^* \cdot I''_{K1}^*}{X_7^*} = \frac{1,1}{0,271} = 4,058$$

d'où $I''_6^* = I''_3^* = I''_7^* = 4,058$.

Courant de court-circuit surtransitoire réduit dans $(X_2^* + X_4^*)$

$$I''_{G2}^* = I''_4^*$$

$$X_6^* I''_6^* = (X_2^* + X_4^*) I''_{G2}^* \Rightarrow I''_{G2}^* = \frac{X_6^* \cdot I''_6^*}{X_2^* + X_4^*} = \frac{0,146 \cdot 4,058}{0,263 + 0,129} = 1,511$$

$$I''_{G2}^* = I''_4^* = 1,511$$

Courant de court-circuit surtransitoire réduit dans X_5^*

$$X_5^* \cdot I''_5^* = X_6^* I''_6^* \Rightarrow I''_5^* = \frac{X_6^* I''_6^*}{X_5^*} = \frac{0,146 \cdot 1,058}{0,223} = 2,654$$

En définitive, les différents courants de court-circuits rapportés au système de grandeur choisi sont :

$$I''_{G1}^* = 4,182 \quad I''_{G2}^* = I''_4^* = 1,511 \quad I''_3^* = 4,058 \quad I''_5^* = 2,654$$

Soit en grandeurs réelles :

$$I''_{G1} = I''_{G1}^* \cdot I_b = 4,182 \times 5,6 = 23,419 \text{ KA}$$

$$I''_{G2} = I''_{G2}^* \cdot I_b = 1,511 \times 5,6 = 8,462 \text{ KA}$$

$$I''_5 = I''_5^* \cdot I_b = 2,654 \times 5,6 = 14,862 \text{ KA}$$

$$I''_3 = I''_3^* \cdot I_b = 4,058 \times 5,6 = 22,725 \text{ KA}$$

$$I''_3 = 22,725 \cdot \frac{103}{60} \text{ KA} = 3,901 \text{ KA}$$

(60Kv)

.../...

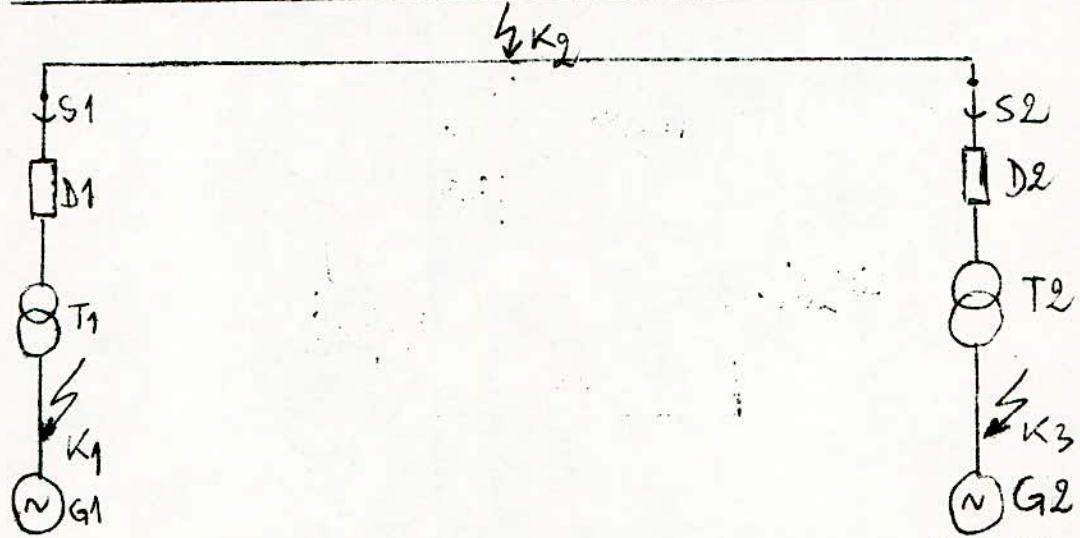
$$I''_4 = \frac{8,462 \cdot 10,3}{60} = 1,452 \text{ KA}$$

(60 Kv)

$$I''_5 = \frac{14,862 \cdot 10,3}{60} = 2,551 \text{ KA}$$

(60 Kv)

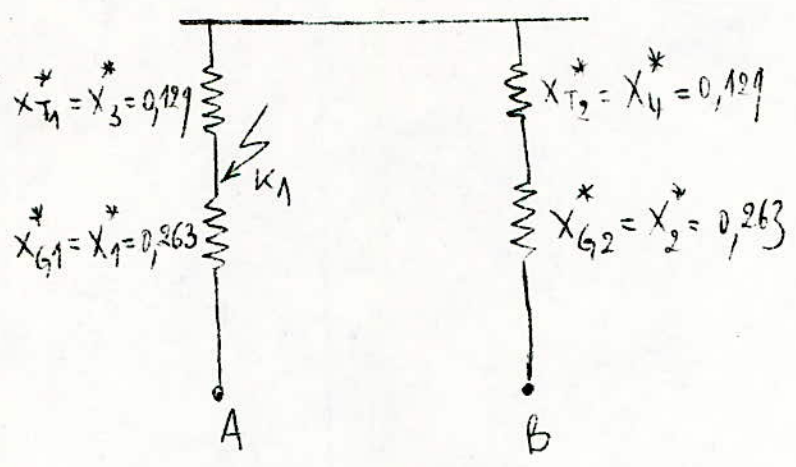
III.2.1.3 Puissance de court-circuit du système énergétique nulle



On considère les deux générateurs en service sans le système énergétique.

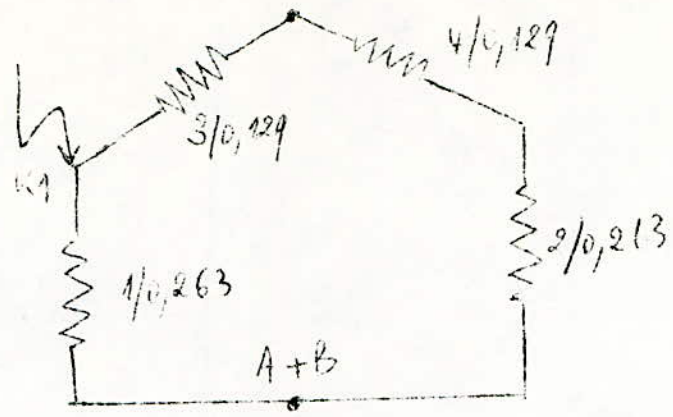
1.3.1 Court-circuit en K1

Nous obtenons le schéma équivalent suivant :



En reliant les points A et B nous obtenons :

.../...



Soit $X_5 = X_2 + X_3 + X_4 = 0,263 + 0,129 = 0,521$
 Les réactances X_5 et X_1 sont en parallèle entre K_1 et $(A+B)$
 soit X_Σ leur réactance équivalente.

$$X_\Sigma^* = \frac{X_1^* \cdot X_5^*}{X_1^* + X_5^*} = \frac{0,263 \cdot 0,521}{0,263 + 0,521} = 0,174$$

A small diagram to the right shows a voltage source \$K_1\$ connected to a reactance \$X_\Sigma\$.

Courant surtransitoire réduit en K_1 :

$$I''_{K1} = \frac{E''}{X_\Sigma} = \frac{1,1}{0,174} = 6,321$$

Courant surtransitoire réduit donné par le générateur G_1

$$I''_{G1} \cdot X_1^* = X_\Sigma^* \cdot I''_{K1} \Rightarrow I''_{G1} = \frac{1,1}{0,263} = 0,417$$

Courant surtransitoire réduit donné par le générateur G_2

$$I''_{G2} \cdot X_5^* = X_\Sigma^* \cdot I''_{K1} \Rightarrow I''_{G2} = \frac{X_\Sigma^* \cdot I''_{K1}}{X_5^*} = \frac{1,1}{0,521} = 2,111$$

Calcul des courants surtransitoires réels

Courant surtransitoire réel donné par G_1 (côté 10,3 Kv)

$$I''_{G1} = I''_{G1} \cdot I_b = 4,181 \cdot 5,6 \text{ KA} = 23,411 \text{ KA}$$

Courant surtransitoire réel donné par G_2 (côté 10,3 Kv)

$$I''_{G2} = I''_{G2} \cdot I_b = 2,111 \cdot 5,6 \text{ KA} = 11,821 \text{ KA}$$

C'est aussi celui qui traverse X_4 et X_3

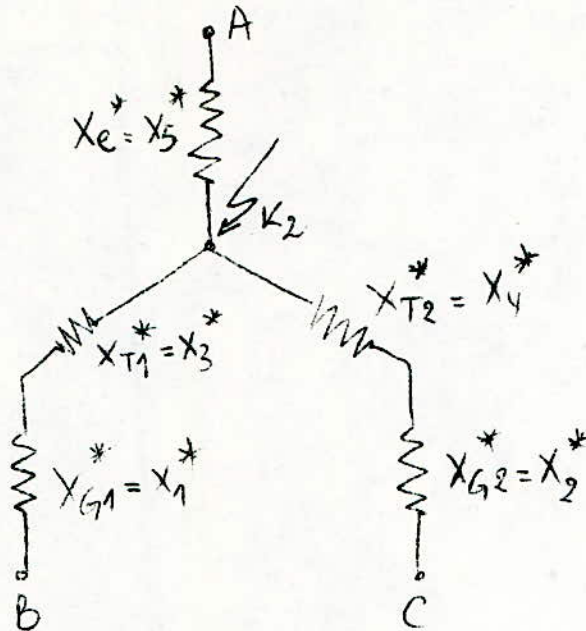
$$I''_3 = I''_4 = I''_{G2} = 11,821 \text{ KA}$$

(côté 10,3 Kv)

Courant surtransitoire réel dans X_4 et X_3 du côté 60 Kv

$$I''_3 = I''_4 = I''_{G2} \cdot \frac{10,3}{60} = 11,821 \cdot \frac{10,3}{60} = 2,029 \text{ KA}$$

III. 22 Court-circuit en K2



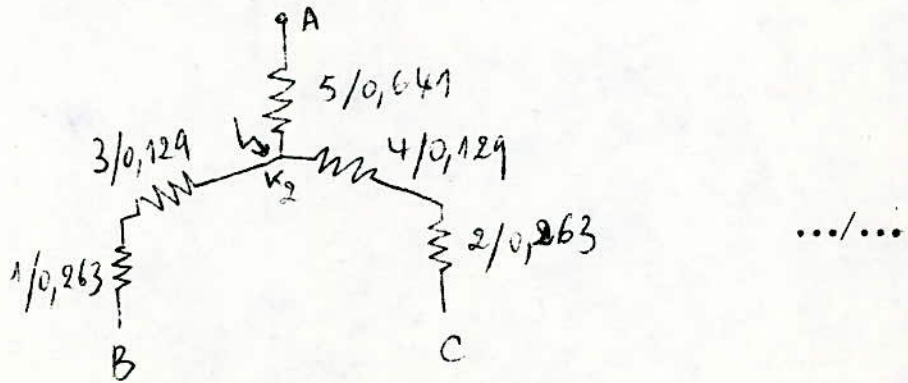
III 2.2.1 Puissance de court-circuit minimum du S.E

Sccmin = 156 MVA (relevé au simulateur de Hamma)

Réactance réduite de base du système énergétique :

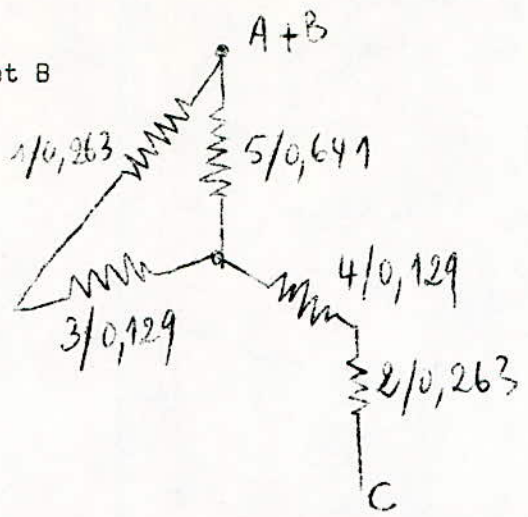
$$X_e^* = \frac{S_b}{S_{cc}} = \frac{100}{156} = 0,641$$

D'où le schéma suivant en fonction des grandeurs réduites :



Transfigurations :

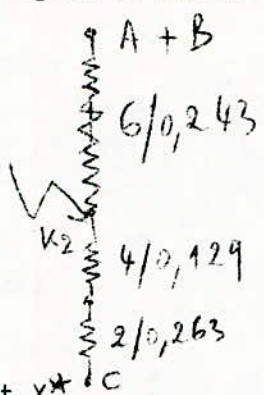
Relions les points A et B



X_5^* et $(X_1^* + X_3^*)$ sont en parallèle. Remplaçons les par leur réactance équivalente X_6^*

$$X_6^* = \frac{X_5^* (X_1^* + X_3^*)}{X_5^* + X_1^* + X_3^*} = \frac{0,641 (0,263 + 0,129)}{0,641 + 0,263 + 0,129} = 0,243$$

Après cette transformation la figure ci-dessus devient :



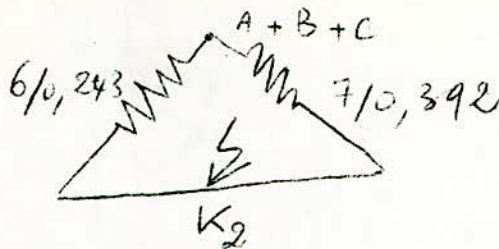
Remplaçons les réactances X_4^* et X_2^* par leur somme X_7^*

$$X_7^* = X_4^* + X_2^* = 0,129 + 0,263 = 0,392$$

$X_7^* = 0,392$

.../...

Enfin relient le point C aux deux autres.



X_7^* et X_6^* sont en parallèle. Remplaçons les par leur réactance équivalente $X_\Sigma^* = X_6^* \cdot X_7^*$



$$X_\Sigma^* = \frac{X_6^* \cdot X_7^*}{X_6^* + X_7^*} = \frac{0,243 \cdot 0,392}{0,243 + 0,392} = 0,150$$

courant de c_{-c}^t surtransitoire réduit en K_2

$$I_{k2}^{''*} = \frac{E^{''*}}{X_\Sigma^*} = \frac{1,1}{0,15} = 7,333$$

Courant de court-circuit surtransitoire réduit dans X_7^*

$$X_7^* \cdot X_6^* = X_\Sigma^* \cdot I_{k2}^{''*} \Rightarrow I_7^* = \frac{X_\Sigma^* \cdot I_{k2}^{''*}}{X_7^*} = \frac{0,15 \cdot 7,33}{0,392} = 2,806$$

Courant de court-circuit surtransitoire réduit dans X_6^*

$$I_6^* \cdot X_6^* = X_\Sigma^* \cdot I_{k2}^{''*} \Rightarrow I_6^* = \frac{X_\Sigma^* \cdot I_{k2}^{''*}}{X_6^*} = \frac{1,1}{0,243} = 4,526$$

Courant surtransitoire réduit dans X_4^* et X_2^*

$$I_4^* = I_2^* = I_7^* = 2,806$$

.../...

III 2.2.2 Puissance de court-circuit maximum du S.E

Secmax = 446 MVA

Nouvelle réactance réduite de base du système énergétique

$$X_e^* = X_5^* = \frac{S_b}{S_{cmax}} = \frac{100}{446} = 0,224$$

Valeurs des autres réactances

$$X_6^* = \frac{X_5^* (X_1^* + X_3^*)}{X_5^* + X_1^* + X_3^*} = \frac{0,224 (0,263 + 0,129)}{0,224 + 0,263 + 0,129} = 0,142$$

$$X_{\Sigma}^* = \frac{X_6^* X_7^*}{X_6^* + X_7^*} = \frac{0,142 \cdot 0,392}{0,142 + 0,392} = 0,104$$

Courant de court-circuit surtransitoire réduit dans X₇*

$$X_7^* I_7^{''*} = X_{\Sigma}^* \cdot I_{k2}^{''*} \Rightarrow I_7^{''*} = \frac{X_{\Sigma}^* \cdot I_{k2}^{''*}}{X_7^*} = \frac{1,1}{0,392} = 2,806$$

Courant de court-circuit surtransitoire réduit en k2

$$I_{k2}^{''*} = \frac{E''}{X_{\Sigma}^*} = \frac{1,1}{0,104} = 10,576$$

Courant de court-circuit surtransitoire réduit dans X₆

$$X_6^* I_6^{''*} = X_{\Sigma}^* \cdot I_{k2}^{''*} \Rightarrow I_6^{''*} = \frac{X_{\Sigma}^* \cdot I_{k2}^{''*}}{X_6^*} = \frac{1,1}{0,142} = 7,746$$

.../...

44

Courant surtransitoire réduit dans X_4^* et X_2^*

$$I_4^{**} = I_{G2}^{**} = I_7^{**} = 2,806$$

Courant surtransitoire réduit dans X_1^* et X_3^*

$$I_{G1}^* = I_3^{**} = I_7^{**} = 2,806 \quad (\text{par symétrie})$$

Courant surtransitoire réduit dans X_5

$$X_5^* I_5^{**} = X_6^* I_6^{**} \Rightarrow I_5^{**} = \frac{X_6^* \cdot I_6^{**}}{X_5^*} = \frac{1,1}{0,224} = 4,910$$

Calcul des courants surtransitoires réels

courants surtransitoires réels donnés par les générateurs G_1 et G_2

$$I_{G2}^{**} = I_{G1}^{**} = I_{G1}^{**} \cdot I_b = 2,806 \cdot 5,6 = 15,713 \text{ KA}$$

courants surtransitoires réels dans les réactances X_3^* et X_4^*
du côté 60 KV

$$I_4^{**} = I_3^{**} = I_3^{**} \cdot \frac{10,3}{60} = 15,713 \cdot \frac{10,3}{60} = 2,695 \text{ KA}$$

(60 kv) (60 kv) (10,3 kv)

Courant surtransitoire réel dans la réactance $X_e^* = X_5^*$

$$I_5^{**} = I_5^{**} \cdot I_b = 4,910 \cdot 5,6 = 27,496 \text{ KA}$$

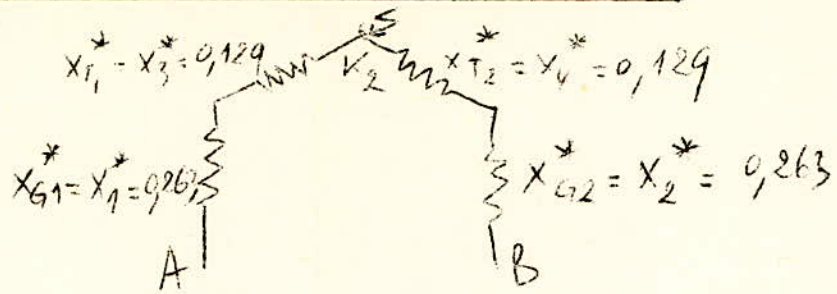
(côté 10,3 kv)

$$I_5^{**} = I_5^{**} \cdot \frac{10,3}{60} = 27,496 \cdot \frac{10,3}{60} = 4,719 \text{ KA}$$

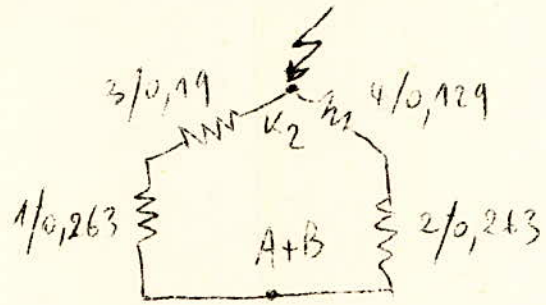
(côté 60 kv) (10,3 kv)

.../...

III.2.23 Puissance de court-circuit du système énergétique nulle:

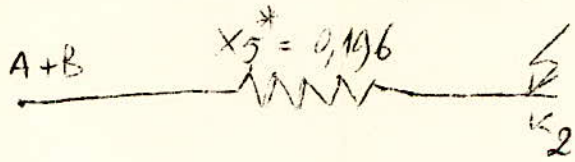


En reliant les points A et B nous obtenons :



Les réactances $(X_1^* + X_3^*)$ et $(X_2^* + X_4^*)$ sont en parallèle entre K_2 et $(A + B)$. Soit X_5^* leur réactance équivalente.

$$X_5^* = \frac{(X_1^* + X_3^*) (X_2^* + X_4^*)}{X_1^* + X_3^* + X_2^* + X_4^*} = \frac{(0,263 + 0,129) (0,263 + 0,129)}{0,263 + 0,129 + 0,263 + 0,129} = 0,196$$



courant surtransitoire réduit en K_2

$$I_{k2}^{*} = \frac{E''}{X_5^*} = \frac{1,1}{0,196} = 5,613$$

.../...

Courants surtransitoires réduits donnés par les générateurs.

$$I_{G1}^{''*} = I_{G2}^{''*} \text{ (par symétrie)}$$

$$I_{G1}^{''*} (X_1^* + X_3^*) = I_{K2}^{''*} X_5^* \Rightarrow I_{G1}^{''*} = \frac{I_{K2}^{''*} X_5^*}{X_1^* + X_3^*} = \frac{5,613 \cdot 0,196}{0,263 + 0,129}$$

$$I_{G1}^{''*} = I_{G2}^{''*} = \frac{5,613 \cdot 0,196}{0,263 + 0,129} = 2,806$$

Calcul des courants surtransitoires réels :

courant surtransitoire réel donné par G₁ et G₂

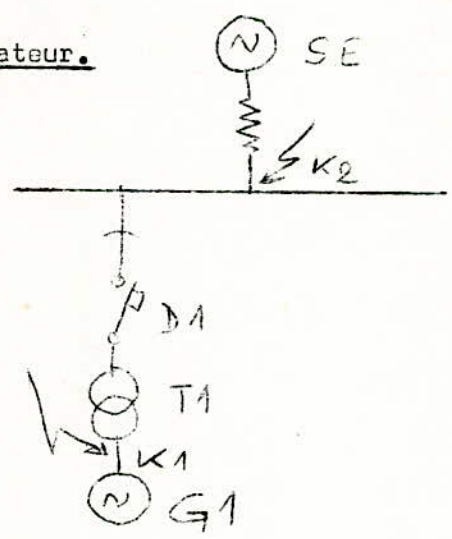
$$I_{G1}^{''} = I_{G2}^{''} = I_{G1}^{''*} \cdot I_b = 2,806 \cdot 5,6 \text{ KA} = 15,713 \text{ KA}$$

Courant surtransitoire réel dans X₃^{*} et X₄^{*} (côté 60 kv)

$$I_3^{''} = I_4^{''} = I_{G1}^{''*} \cdot \frac{10,3}{60} = 15,7 \cdot \frac{10,3}{60} = 2,695 \text{ KA}$$

(60 kv) (60 kv) (10,3 kv)

III.3 Deuxième variante : 1 alternateur.

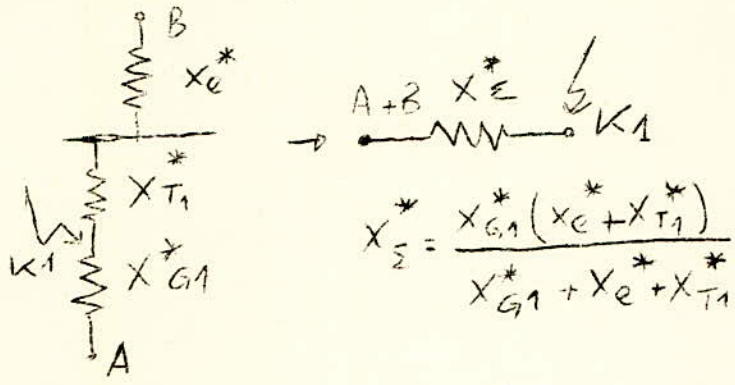


III.3.1 Court-circuit en K₁

.../...

III.3.1.1 avec puissance minimum du S.E

Le schéma ci-dessus se représente comme suit :



$$X_{\Sigma}^* = \frac{X_{G1}^* (X_e^* + X_{T1}^*)}{X_{G1}^* + X_e^* + X_{T1}^*}$$

$$X_{\Sigma}^* = \frac{0,263 (0,641 + 0,129)}{0,263 + 0,641 + 0,129} = \frac{0,202}{1,033} = 0,196$$

Courant surtransitoire réduit :

$$I_{K1}^{''*} = \frac{1,1}{0,196} = 5,612 \text{ en } K1$$

courant surtransitoire réduit donné par \$G_1\$

$$I_{G1}^{''*} \cdot X_{G1}^* = X_{\Sigma}^* \cdot I_{K1}^{''*} \Rightarrow I_{G1}^{''*} = \frac{X_{\Sigma}^* \cdot I_{K1}^{''*}}{X_{G1}^*} = \frac{0,196 \cdot 5,612}{0,263} = 0,456$$

Courant surtransitoire réduit dans \$X_{T1}^*\$ et \$X_e^*\$

soit \$I_{T1}^{''*}\$ ce courant.

$$I_{T1}^{''*} \cdot (X_{T1}^* + X_e^*) = I_{K1}^{''*} \cdot X_{\Sigma}^* \Rightarrow I_{T1}^{''*} = \frac{I_{K1}^{''*} \cdot X_{\Sigma}^*}{X_{T1}^* + X_e^*} = \frac{5,612 \cdot 0,196}{0,129 + 0,641} = 1,428$$

Courants surtransitoires réels

donné par le générateur \$G_1\$

$$I_{G1}^{//} = I_{G1}^{''*} \cdot I_b = 0,456 \cdot 5,6 \text{ KA} = 2,553 \text{ KA}$$

.../...

Dans X_{t1}^* et X_e^* (côté 10,3 kv)

$$I_{t1}'' = I_{t1}'' \cdot I_b = 1,428 \cdot 5,6 \text{ KA} = 7,996 \text{ KA}$$

Dans X_{t1}^* et X_e^* (côté 60 kv)

$$I_{t1}'' = I_{t1}'' \cdot \frac{10,3}{60} = 7,996 \cdot \frac{10,3}{60} = 1,372 \text{ KA}$$

(60 kv) (10,3 kv)

III.3.1.2 Avec puissance max du S.E

Réactance du système énergétique

$$S_{cc \text{ max}} = 44(s) \quad S_b = 100 \text{ MVA} \quad X_e = \frac{S_b}{S_{cc \text{ max}}} = \frac{100}{496} = 0,224$$

$A+B$ X_{Σ}^* \leftarrow K_1

$$X_{\Sigma}^* = \frac{X_{G1}^* (X_e^* + X_{t1}^*)}{X_{G1}^* + X_e^* + X_{t1}^*} = \frac{0,263 (0,224 + 0,129)}{0,263 + 0,229 + 0,129}$$

$$X_{\Sigma}^* = 0,150$$

courant surtransitoire réduit en K_1

$$I_{k1}'' = \frac{1,1}{X_{\Sigma}^*} = \frac{1,1}{0,150} = 7,333$$

courant surtransitoire réduit donné par G_1

$$I_{G1}'' \cdot X_{G1}^* = X_{\Sigma}^* \cdot I_{k1}'' \Rightarrow I_{G1}'' = \frac{1,1}{X_{G1}^*} = \frac{1,1}{0,263} = 4,182$$

.../...

COURANT SURTRANSITOIRE REDUIT DANS X_{t1}^* et X_e^*

soit I''_{t1}^* ce courant :

$$I''_{t1}^* (X_{t1}^* + X_e^*) = I''_{k1}^* \cdot X_{\Sigma}^* = I''_{t1}^* = \frac{1,1}{X_{t1}^* + X_e^*} = \frac{1,1}{0,129 + 0,224} = 3,116$$

Courant surtransitoire réels

• donné par le générateur G_1

$$I''_{G1} = I''_{G1}^* \cdot I_b = 4,182 \cdot 5,6 = 23,419 \text{ KA}$$

• dans X_{t1}^* et X_e^* côté 10,3 KV

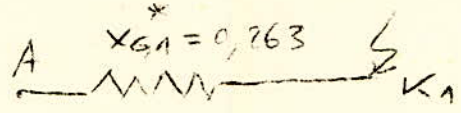
$$I''_{t1} = I''_{t1}^* \cdot I_b = 3,116 \cdot 5,6 \text{ KA} = 17,449 \text{ KA}$$

• dans X_{t1}^* et X_e^* côté 60 KV

$$I''_{t1} (60 \text{ Kv}) = I''_{t1} (10,3 \text{ Kv}) \cdot \frac{10,3}{60} = 17,9 \cdot \frac{10,3}{60} = 2,995 \text{ KA}$$

III - 3-1-3 Avec puissance nulle du S.E.

Courant surtransitoire réduit donné par le générateur G_1



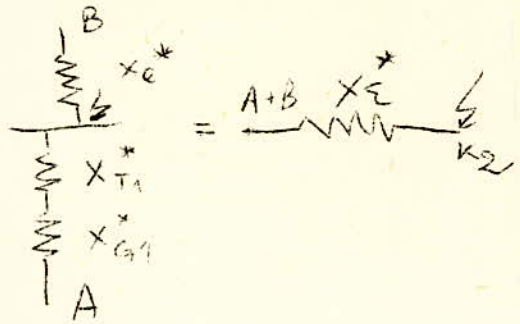
$$I''_{G1}^* = \frac{1,1}{0,263} = 4,182$$

Courant surtransitoire réel donné par G_1

$$I''_{G1} = I''_{G1}^* \cdot I_b = 4,182 \cdot 5,6 \text{ KA} = 23,419 \text{ KA}$$

III 3.2 Court-circuit en K2

III 3.2.1 avec P mini du SE



$$X_{\Sigma}^* = \frac{X_e^* (X_{t1}^* + X_{G1}^*)}{X_e^* + X_{t1}^* + X_{G1}^*}$$

.../...

$$X_{\Sigma}^* = \frac{0,641 (0,129 + 0,263)}{0,641 + 0,129 + 0,263} = \frac{0,251}{1,033} = 0,243$$

• Courant surtransitoire réduit en K2 :

$$I''_{K2}^* = \frac{1,1}{X_{\Sigma}^*} = \frac{1,1}{0,243} = 4,526$$

• I surtransitoire réduit donné par G1 :

$$I''_{G1}^* \cdot (X_{G1}^* + X_{t1}^*) = I''_{K2}^* \cdot X_{\Sigma}^* \Rightarrow I''_{G1}^* = \frac{X''_{K2} \cdot X_{\Sigma}^*}{X_{G1}^* + X_{t1}^*} = \frac{4,526 \cdot 0,243}{0,263 + 0,129} = 2,805$$

c'est le même qui traverse X_{t1}^* (côté 10,3 Kv)

$$I''_{t1}^* \text{ (côté 60 Kv)} = 2,805 \times \frac{10,3}{60} = 0,481 \text{ (côté 60 kv)}$$

• I surtransitoire réduit donné par le SE.

$$I''_e^* = \frac{I''_{K2}^* \cdot X_{\Sigma}^*}{X_e^*} = \frac{4,526 \cdot 0,243}{0,641} = 1,7220$$

• I réel donné par G1 = I réel traversant T1 (10,3 Kv)

$$I''_{G1} = I''_{G1}^* \times I_b = 2,805 \times 5,6 = 15,708 \text{ KA} = I''_{t1} \text{ (10,3 Kv)}$$

• I réel dans T1 côté 60 Kv $= 15,708 \times \frac{10,3}{60} = 2,698 \text{ KA}$

• I réel donné par S1E

$$I''_e = 1,7220 \times 5,6 = 9,643 \text{ KA} \cdot (10,3 \text{ Kv})$$

• I réel donné par SE (côté 60 Kv) : $9,643 \times \frac{10,3}{60} = 1,655 \text{ KA}$

.../...

III.3.2.2 avec Puissance du S.E max

Réactance du système énergétique

$$\left. \begin{aligned} S_{cc \max} &= 446 \\ S_b &= 100 \text{ MVA} \end{aligned} \right\}$$



$$X_e^* = \frac{S_b}{S_{ccmax}} = \frac{100}{446} = 0,224$$

$$X_{\Sigma}^* = \frac{X_e^* (X_{t1}^* + X_{G1}^*)}{X_e^* + X_{t1}^* + X_{G1}^*} = \frac{0,224(0,129 + 0,263)}{0,224 + 0,129 + 0,263}$$

$$X_{\Sigma}^* = 0,142$$

Courant surtransitoire réduit en \$K_2\$

$$I_{k2}''^* = \frac{1,1}{X_{\Sigma}^*} = \frac{1,1}{0,142} = 7,746$$

Courant surtransitoire réduit donné par \$G_2\$

$$I_{G1}''^* \cdot (X_{G1}^* + X_{t1}^*) = I_{k2}''^* \cdot X_{\Sigma}^* \quad I_{G1}''^* = \frac{X_{\Sigma}^* \cdot I_{k2}''^*}{X_{G1}^* + X_{t1}^*} = \frac{1,1}{0,392} = 2,806$$

C'est le même qui traverse \$X_{t1}^*\$ côté 10,3 kv \$\rightarrow I_{t1}''(10,3kv) = 2,806\$

COURANT SURTRANSITOIRE RÉDUIT DONNÉ PAR LE S.E

$$i_e''^* = \frac{I_{k2}'' \cdot X_{\Sigma}^*}{X_e^*} = \frac{1,1}{0,224} = 4,909$$

courant surtransitoire réel donné par \$G_1\$

$$I_{G1}'' = I_{G1}''^* \cdot I_b = 2,806 \times 5,6 = 15,713 \text{ KA}$$

C'est le même qui traverse \$T_1\$ du côté 10,3 Kv

.../...

Courant surtransitoire réel donné par le S.E côté 10,3 kv

$$I''_e = I''_e \cdot I_b^* = 4,909 \cdot 5,6 \text{ KA} = 27,489 \text{ KA}$$

du côté 60 Kv

$$I''_e = I''_e \cdot \frac{10,3}{60} = 27,489 \cdot \frac{10,3}{60} = 4,719 \text{ KA}$$

\uparrow \uparrow
 (60 Kv) (10,3 kv)

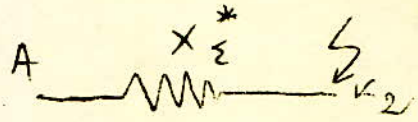
courant surtransitoire réel traversant X_{t1}^* du côté 60 Kv

$$I''_{T1} = 15,713 \cdot \frac{10,3}{60} = 2,695 \text{ KA}$$

\uparrow
 (60 Kv)

III 3.: 3 Avec P nulle du SE

Courants surtransitoires



$$X_{\Sigma}^* = X_{G1}^* + X_{t1}^* = 0,263 + 0,129 = 0,392$$

I Ct Ct réduit donné par G₁

$$I''_{G1}^* = I''_{t1}^* = I''_{k2}^* = \frac{1,1}{0,392} = 2,806$$

I Ct Ct réel donné par G₁

$$I''_{G1} = I''_{t1} = I''_{k2} = 2,806 \times 5,6 = 15,713 \text{ KA}$$

(10,3 Kv)

I traversant T1 côté 60 Kv

$$15,713 \times \frac{10,3}{60} = 2,695 \text{ KA}$$

TABLEAU DES RÉSULTATS
DES ICC

Variantes	1 ALTERNATEUR						2 ALTERNATEURS							
	K ₁			K ₂ , K _{2'}			K ₃	K ₁			K ₂ , K _{2'}			K ₃
	P _{mini}	P _{maxi}	P _{neulle}	P _{mini}	P _{maxi}	P _{neulle}		P _{mini}	P _{maxi}	P _{neulle}	P _{mini}	P _{maxi}	P _{neulle}	
Jeu de Barres	1,372	2,995	-	SK ₂ 2,698	2,695	-	S ₁ 1,736	1,452	2,029	SK ₂ 2,695	2,695	2,695		
				SK _{2'} 1,655	4,719	2,695	S ₂ 2,841	4,003	2,029	SK _{2'} 4,303	7,474	2,695		
Transfo I	103k	7,996	17,449	23,419	15,713	15,713	16,553	22,725	11,821	15,713	15,713	15,713		
60k D1	<u>1,372</u>	2,995	-	2,698	2,695	2,695	2,841	<u>3,901</u>	2,029	2,695	2,695	2,695		
Transfo II	103k						10,113	8,462	11,821	15,713	15,713	15,713		
60k D2							1,736	1,452	2,029	2,695	2,695	2,695		
Générateur 1	2,553	23,419	23,419	15,703	15,713	15,713	23,411	23,419	23,411	15,713	15,713	15,713		
Générateur 2							10,113	8,462	11,821	15,713	15,713	15,713		
S.E → D3	1,372	2,995	-	1,655	4,719	-	2,695	<u>1,060</u>	2,551	-	1,648	4,719	-	<u>5,390</u>

H A P I T R E I V

Choix de l'appareillage

IV - 1 // CHOIX des DISJONCTEURS.

Les disjoncteurs sont choisis à l'aide des caractéristiques suivantes :

- Tension nominale .
- Courant nominal.
- Type d'installation (intérieur ou extérieur).
- Courant (ou puissance) de coupure

a/ La tension nominale doit correspondre à la tension nominale du système.

b/ Le courant nominal doit être plus grand que le courant de charge maximum de durée du circuit où est placé l'appareil. Le courant nominal indiqué pour le disjoncteur est le courant admissible de durée établi à l'aide des considérations thermiques, quand la température ambiante est de 25°C.

Si la température du milieu ambiant est plus basse le courant nominal peut être majoré.

Comme courant nominal pour un couple longitudinal C.L. on considère généralement 60 à 70% du courant nominal du jeu de barres.

c/ Dans les catalogues les installations intérieures ou extérieures sont indiquées séparément.

d/ Le courant de coupure d'un disjoncteur est celui indiqué par le fabricant (catalogues). Il doit être plus grand que la valeur efficace du courant de court-circuit au moment où commence la séparation des contacts du disjoncteur.

Généralement on peut considérer que l'ouverture du disjoncteur a lieu au moment $t = 0,1$ sec par rapport au moment de la production du court-circuit. Dans ces conditions on peut considérer seulement la composante apériodique de I_{cc} puisque la composante apériodique est bien amortie. Si nous utilisons des disjoncteurs plus rapides on doit déterminer plus exactement le temps de déclenchement du disjoncteur en tenant compte de la composante apériodique. Dans ce cas nous devons connaître les courants de coupure symétrique et asymétrique du disjoncteur.

- Si on a un système avec neutre isolé, il est suffisant de calculer le courant de déclenchement correspondant au court-circuit triphasé car le courant de déclenchement correspondant au court-circuit biphasé est plus petit.

- Dans le cas du système avec neutre mis à la terre, en plus du calcul du court-circuit triphasé, il faut effectuer celui des courts-circuits biphasé et monophasé. Dans ce cas nous devons faire le traitement du neutre pour obtenir un I_{cc} asymétrique. Si le traitement du neutre n'est pas possible, le disjoncteur doit résister à n'importe quel système, symétrique ou non. Dans ce cas, neutre mis à la terre, généralement les I_{cc} asymétriques sont plus grands que les I_{cc} symétriques. Il faut choisir le plus grand I_{cc} (entre $3\sim$, $2\sim$, et $1\sim$) et vérifier si le disjoncteur pourra résister.

Mais la plupart des installations électriques n'ont pas le neutre mis à la terre et il est suffisant de calculer

le I_{cc} triphasé.

- L'utilisation des selfs de barres à la tension des générateurs a pour but la diminution des I_{cc} et ainsi donne la possibilité de choisir des disjoncteurs avec une puissance de coupure plus petite donc moins chers.

Pour choisir la solution optimum il faut faire un calcul économique (disjoncteur moins cher + self ou bien disjoncteur plus grand sans self).

IV - 2 - CHOIX des SELFS de BARRES

Une self de barre s'installe dans le circuit du couple longitudinal. On la choisit à l'aide des grandeurs suivantes :

- la tension nominale
- le courant nominal
- la réactance en %

a/ La tension nominale est déterminée suivant la tension d'installation.

b/ Le courant nominal se prend généralement de 60 à 70% du courant nominal de la barre.

c/ La réactance en % est de 8 à 12 %. On choisit cette réactance de façon que le courant de déclenchement ait des valeurs plus petites que les courants de coupure (I_R) des disjoncteurs choisis.

Si dans le cas d'un disjoncteur choisi, le courant de déclenchement après utilisation de la self de barre garde une valeur plus grande que I_R , le disjoncteur correspondant doit être remplacé par un autre de I_R plus grand. Il faut faire plusieurs essais en utilisant la même méthode jusqu'à trouver le disjoncteur de I_R un plus grand que I_d .

Par ailleurs le choix de la valeur optimale de la réactance se réalise à l'aide d'un calcul économique comparant coûts du disjoncteur et du disjoncteur avec self.

IV - 3 - CHOIX des SECTIONNEURS

Ils sont choisis à l'aide des caractéristiques suivantes :

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

IV-CALCUL DES COURANTS DE COUPURE.

i) Disjoncteur Di=D2

Le courant de déclenchement est donné par::
 $i_d = I_{cc}'' \max$ où $M = \varphi(I_g'' / I_{gn}, t_d)$, I_g'' étant le I_{cc} surtransitoire donné par le générateur et I_{gn} le courant nominal de ce générateur.

$$\left. \begin{array}{l} I_g'' = 23400 \text{ A} \\ I_{gn} = 4200 \text{ A} \\ t_d = 0,25 \text{ sec} \end{array} \right\} \Rightarrow I_g'' / I_{gn} = \frac{23400}{4200} = 5,57$$

La courbe donne $M_{gi} = 0,7$ d'où:
 $I_d = M_{gi} \cdot I_{cc}'' \max = 0,7 \cdot 3,9 = 2,73 \text{ KA}$

Pour une question de sécurité choisissons un courant de coupure de 20/100 supérieur à I_d soit:
 $I_{coupure} = 2,73 + 20/100 \cdot 2,73 = 3,3 \text{ KA}$

$I_{coupure} = 3,3 \text{ KA}$

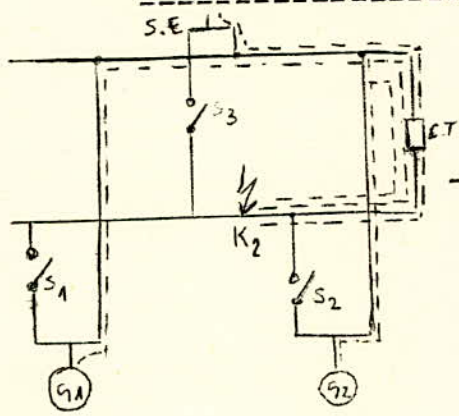
2) Disjoncteur D3

Le disjoncteur D3 est traversé par un $I_{cc}'' \max = 5,39 \text{ KA}$ soit $2 \cdot (2,695)$, (2,695 KA étant $I_{cc}'' \max$ fourni par un générateur lorsque le court-circuit a lieu en K3

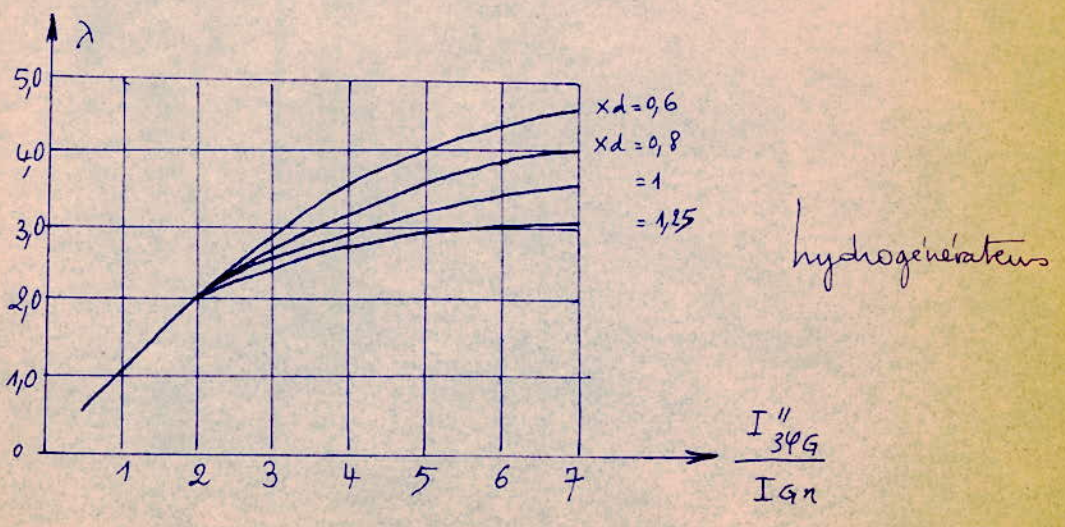
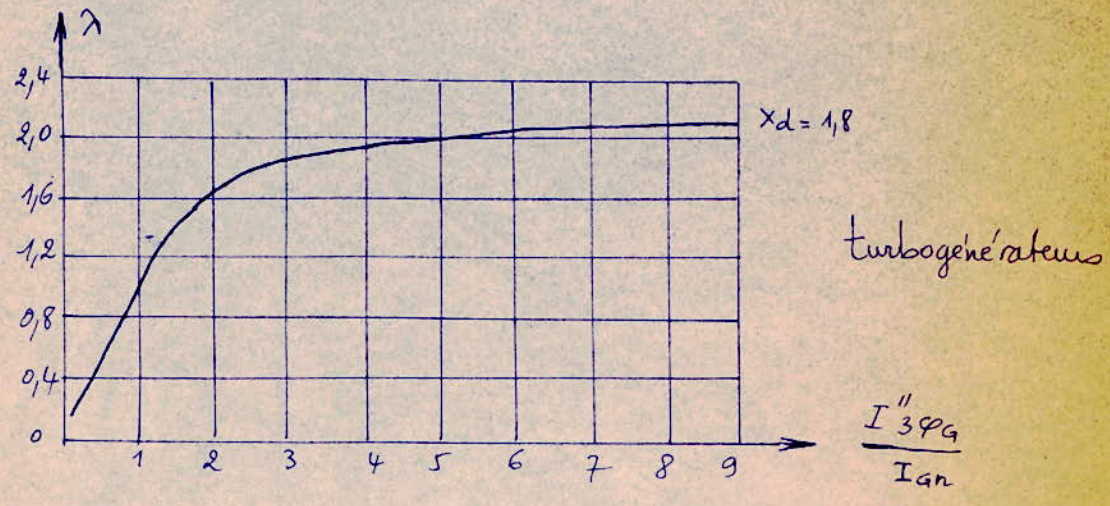
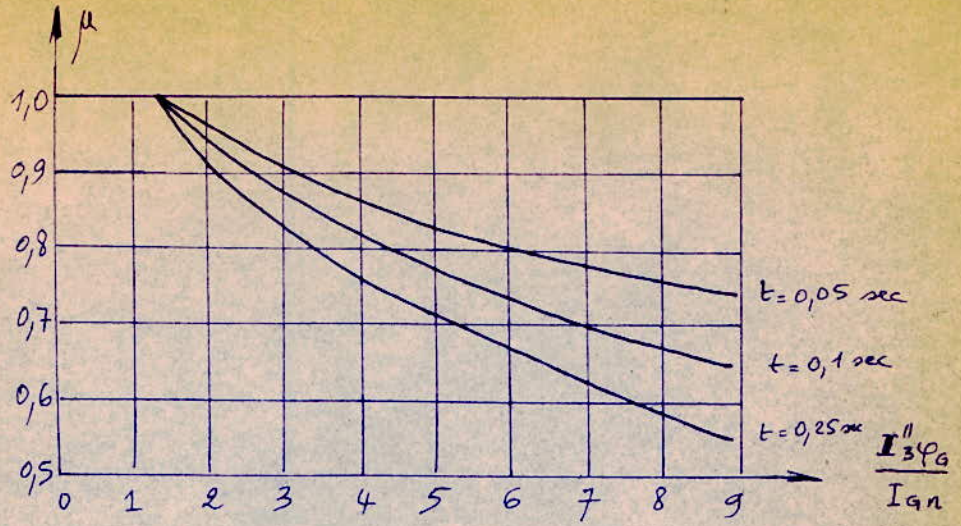
$$I_d = M_{gi} \cdot I_{cc}'' \max = 0,7 \cdot 5,39 = 3,77 \text{ KA}$$

$I_{coupure} = 3,77(1+20\%) = 4,53 \text{ KA}$

3) Disjoncteur C.T



Supposons que dans un premier temps les 3 générateurs soient raccordés au jeu de barres B_1 . nous devons mettre B_2 en parallèle par l'intermédiaire de C.T pour entretien ou réparation de B_1 . Dans cette phase de permutation il se peut qu'avarie se produise



Après avoir envisagé tous les lieux de court-circuit possibles nous avons retenu le plus dangereux schématisé ci-dessus (point K_2). Dans ce cas, le disjoncteur C.T est traversé par la totalité des I''_{cc} des différentes sources, les sectionneurs S_1, S_2 et S_3 étant ouverts.

$$I''_{CT} = 2 I''_{G1} + I''_{SE} = 2 \times 2,685 + 4,719 = 10,109 \text{ KA.}$$

$$I_d = \mu_{C.A.} (2 I''_{G1}) + \mu_{S.E.} I''_{S.E.}$$

$$I''_{S.E.} = 4,719 \text{ KA}$$

$$I_{n.S.E} = \frac{S}{\sqrt{3}} = \frac{70 \text{ MVA}}{60\sqrt{3} \text{ KV}} = 0,66 \text{ KA} \quad \Rightarrow \mu_{S.E.} = 0,62$$

$$\mu_{G1} = 0,7$$

$$\mu_{SE} = 0,62$$

$$\Rightarrow I_d = 0,7 \cdot (2 \times 2,685) + 0,62 \cdot 4,719 = 6,70 \text{ KA}$$

$$I_{\text{coupure}} = 6,70 (1 + 20\%) = 8,040 \text{ KA}$$

4/ Disjoncteur de : AM, MU, Tad1, Tad2. Il sont parcourus par les mêmes I''_{cc} max lors d'1 défaut en aval soit

$$I''_{cc} = 2 I''_{cc} G + I''_{cc} SE = 2 \times 2,695 + 4,719 = 10,10 \Rightarrow I_c = 8 \text{ KA}$$

Remarque Ces courants de coupure et le temps de déclenchement correspondant ($t = 0,25 \text{ sec}$) sont à modifier suivant les valeurs données par le fabricant.

	U_n	I normalisé	calculés	choisis	Type d'installation
			I_{coupure} P coupure	I_c Pc	
D_1 Générateur 1	60KV	800 A	3,3 KA 342 MVA	5 KA 520 MVA	intérieur
D_2 générateur 2	"	800	3,3 KA 342 MVA	5 KA 520 MVA	"
D_3 (Hamma I et II)	"	800	4,5 KA 467 MVA	5 KA 520 MVA	"
CT	"	1600	8 832 MVA	10 KA 1100 MVA	"
D AM	"	400	"	"	"
D MU	"	400	"	"	"
D $T_a d_2$	"	400	"	"	"
D $T_a d_1$	"	200	"	"	"

LES SECTIONNEURS

	U_n	I normalisé	Type d'installation	I de fonctionnement
AM	60 KV	400 A	intérieur	240 A
MU	"	400	"	240
$T_{a2} d_2$	"	400	"	290
$T_{a2} d_2$	"	200	"	53
RES	"	800	"	720
HA I	"	800	"	720
HA II	"	800	"	720
$G_1 = G_2$	"	800	"	720
CT	"	1600	"	1440

CHAPITRE V
DIMENSIONNEMENT DES JEUX DE BARRES!

V-1 CALCUL DE LA SECTION

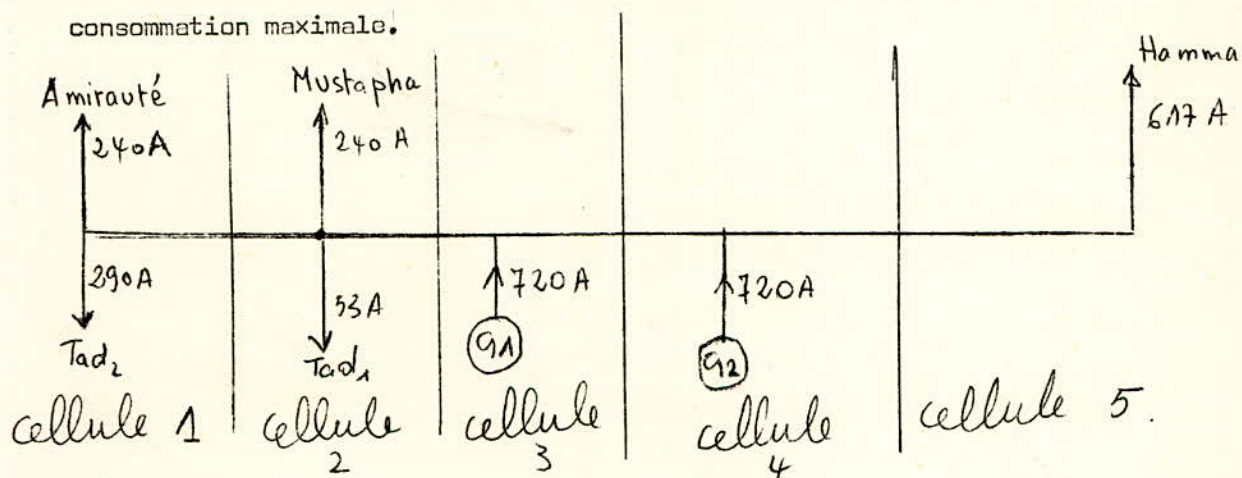
La centrale d'Alger Port étant une installation de type intérieur de puissance moyenne de 120 MW, on choisira des sections rectangulaires pour les barres; c'est la forme la plus utilisée!

V.1.1 Emplacement des cellules le long des barres et calcul des courants dans chaque tronçon

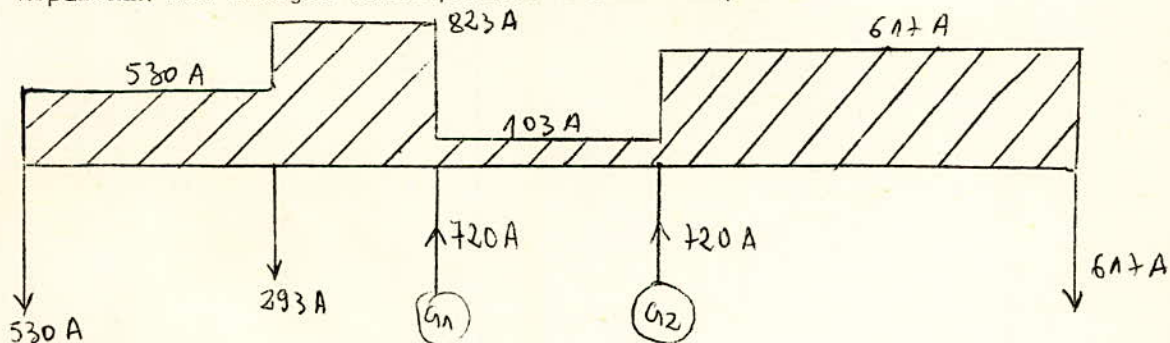
La circulation de courant à travers les barres collectrices dépend de l'emplacement des diverses cellules; A chaque disposition des cellules correspond un tronçon de barre plus chargé (I_{max} que les autres. Parmi ces dispositions on retiendra celle correspondant au plus petit des maximums/

A- Différentes dispositions:

Soient les consommateurs, les départs, les générateurs et les auxiliaires suivants. Les courants des consommateurs correspondent à la consommation maximale.

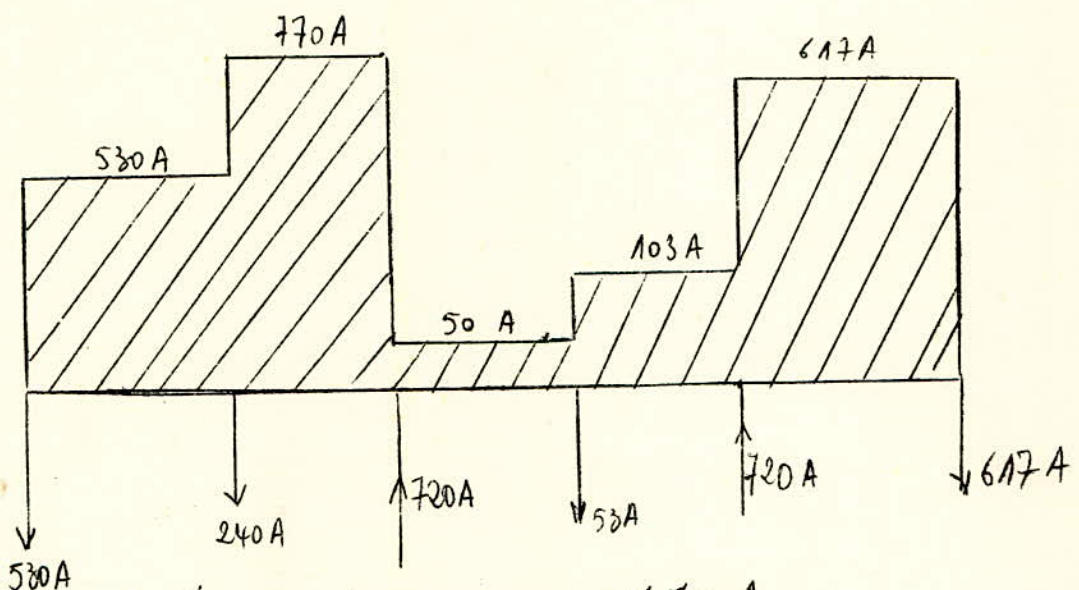
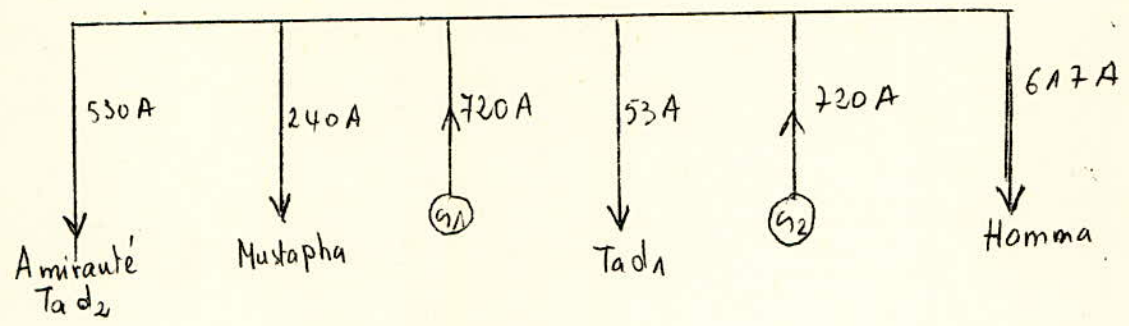


Répartition des charges correspondant à cette disposition.



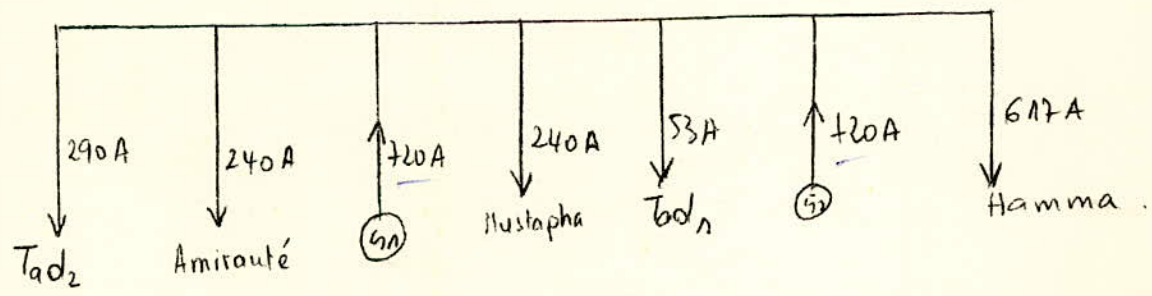
Le maximum est de 823A.

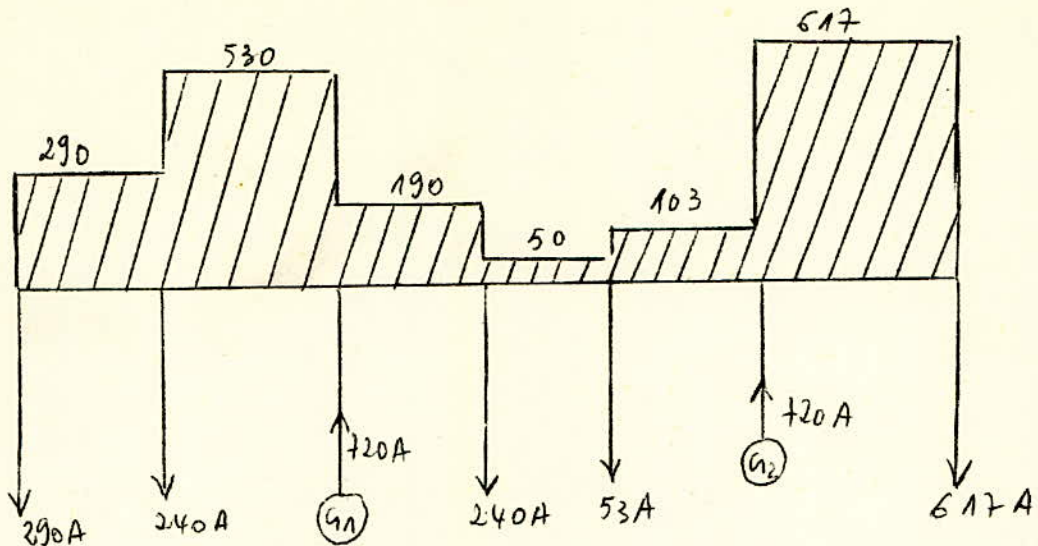
b) Plaçons Tad₁ entre les générateurs 1 et 2



de maximum est de 770 A.

c) Plaçons aussi le départ Mustapha entre les générateurs





Le maximum est de 617 A.

Nous retiendrons cette dernière disposition qui donne le minimum des maximums.

b) Détermination des dimensions des barres.

Le courant étant de 617 A, nous prenons un courant normalisé de 625 A et la table donne les dimensions correspondantes pour une barre élémentaire :

largeur = 40 mm, épaisseur = 4 mm

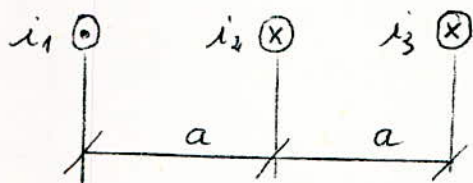
Section = 160 mm²

$I_{adm} (A) \text{ à } 70^{\circ} C$

Dimensions			Cu			Al		
longueur mm	épaisseur mm	Section mm ²	1 barre élémentaire	2 barres élémentaires	3 barres élémentaires	1 barre élémentaire	2 barres élémentaires	3 barres élémentaires
15 20 25 30	3	45 60 75 90	210 275 340 405	— — —	— — —	165 215 265 305	— — — —	— — — —
30 40	4	120 160	475 625	— —	— —	365 480	— —	— —
40 50 60	5	200 250 300	700 860 1025	— — —	— — —	540 665 705	— — —	— — —
50 60 80 100	6	300 360 480 600	955 1125 1480 1810	— 1740 2110 3470	— 2240 2420 3170	740 870 1150 1425	1350 1630 1935	1720 2100 2500
60 80 100 120	8	480 640 800 960	1320 1690 2080 2400	2160 2620 3060 3400	2790 3370 3930 4340	1025 1320 1625 1900	1680 2040 2390 2650	2180 2620 3050 3380
60 80 100 120	10	600 800 1000 1200	1475 1900 2310 2650	2560 3100 3610 4100	3300 3990 4650 5200	1155 1480 1820 2070	2010 2410 2860 3200	2650 3100 3650 4100

V-2 Vérification à la stabilité électrodynamique

V.2.1. Efforts électrodynamiques



$$f_1 = \frac{\mu_0}{2\pi a} i_1 i_2 + \frac{\mu_0}{2\pi \cdot 2a} i_1 i_3$$

$$f_2 = - \left[\frac{\mu_0}{2\pi a} i_2 i_3 - \frac{\mu_0}{2\pi a} i_1 i_2 \right]$$

$$f_3 = f_1$$

F_1, F_2, F_3 représentent les forces électrodynamiques entre les conducteurs 1, 2, 3 parcourus par des courants i_1, i_2, i_3 .

f_1 est la force exercée par les conducteurs 2 et 3 sur le conducteur 1.

f_2 est la force exercée par les conducteurs 1 et 3 sur le conducteur

2. f_3 est par symétrie égale à f_1 .

En régime normal on a :

$$\begin{aligned} i_1 &= I_{\max} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) & \alpha &= \text{déphasage entre } U \text{ et l'axe des temps} \\ i_2 &= I_{\max} \sin(\omega t + \alpha - \varphi - 2\pi/3) & \varphi &= \text{déphasage entre } U \text{ et } I \\ i_3 &= I_{\max} \sin(\omega t + \alpha - \varphi - 4\pi/3) \end{aligned}$$

En ce plaçant dans un cas particulier ou

on aura en remplaçant i_1, i_2 et i_3 dans les équations des forces :

$$f_1 \max = 0,81 \cdot \frac{\mu_0}{2\pi a} \cdot I_{\max}^2$$

$$f_2 \max = 0,87 \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I_{\max}^2$$

$$f_3 \max = f_1 \max$$

En régime transitoire on a

$$(\varnothing) \begin{cases} i_1 = ipm (\sin(\omega t + \psi) - e^{-t/\tau a} \sin \psi) \\ i_2 = ipm (\sin(\omega t + \psi - 2\pi/3) - e^{-t/\tau a} \sin(\psi - 2\pi/3)) \\ i_3 = ipm (\sin(\omega t + \psi - 4\pi/3) - e^{-t/\tau a} \sin(\psi - 4\pi/3)) \end{cases}$$

avec $i_{pm} = \sqrt{2} \cdot I''$, I'' étant le courant sur transitoire efficace!

En remplaçant dans (1) les courants par leurs valeurs (2) on obtient:

$$f_2 = \underbrace{\frac{\mu_0}{2\pi a}}_K I'' \sqrt{3} \left[\underbrace{\sin(2\omega t + 2\psi - \frac{\pi}{3})}_A - \underbrace{2e^{-t/\tau_a}}_B \underbrace{\sin(\omega t + 2\psi - \frac{\pi}{3})}_B + \underbrace{e^{-t/\tau_a/2}}_C \underbrace{\sin(2\psi - \frac{\pi}{3})}_C \right]$$

A = Périodique de fréquence $2f$

B = Périodique amortie de fréquence f

C = Apériodique amortié

f_2 est de la forme $f_2 = \phi(t, \psi)$ avec $\psi = \alpha - \varphi_k$

On voit clairement que pour avoir $|f_2|_{\max}$ il faut

$$A = -1 \text{ soit } 2\omega t + 2\psi - \frac{\pi}{3} = 3\pi/2$$

$$B = -2e^{-t/\tau_a} \text{ soit } \omega t + 2\psi - \frac{\pi}{3} = \frac{\pi}{2}$$

$$\text{on tire } \psi = -\frac{\pi}{12} \text{ et } t = 0,01 \text{ sec}$$

Vérifions que pour ces valeurs le terme C est lui aussi maximum;

$$\text{En effet } \sin(2\psi - \frac{\pi}{3}) = -1 \text{ soit } \psi = -\frac{\pi}{12}$$

sera donc égal, dans le cas inductif, à:

$$\alpha = \psi + \varphi_k = -\frac{\pi}{12} + \frac{\pi}{2} = \frac{5\pi}{12}$$

$$\left. \begin{array}{l} t = 0,01 \text{ sec} \\ \alpha = \frac{5\pi}{12} \end{array} \right\} \Rightarrow f_2 \text{ max}$$

c'est la force électrodynamique de choc (valeur maximale possible existante)

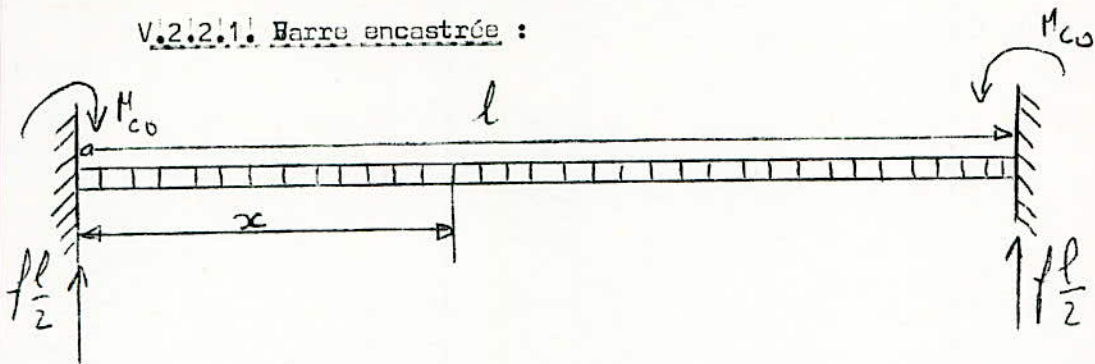
$$f_2 \text{ choc } (t = 0,01 \text{ sec, } \psi = -\frac{\pi}{12}) = 0,87 \frac{\mu_0}{2\pi a} (\sqrt{2} I'')^2 \left(1 + e^{-\frac{0,01}{\tau_a}}\right)^2$$

$$K = 1 + e^{-\frac{0,01}{\tau_a}} \approx 1,8 \text{ (valeur moyenne)}$$

$$F_2 \text{ choc} = 0,87 \frac{\mu_0}{2\pi a} K_{\text{choc}}^2 (\sqrt{2} I'')^2$$

V.2.2 Vérification à la stabilité statique

V.2.2.1. Barre encastrée :



$$M_c(x) = + M_{co} + (f \cdot \frac{l}{2})x - (f \cdot \frac{x}{2})x$$

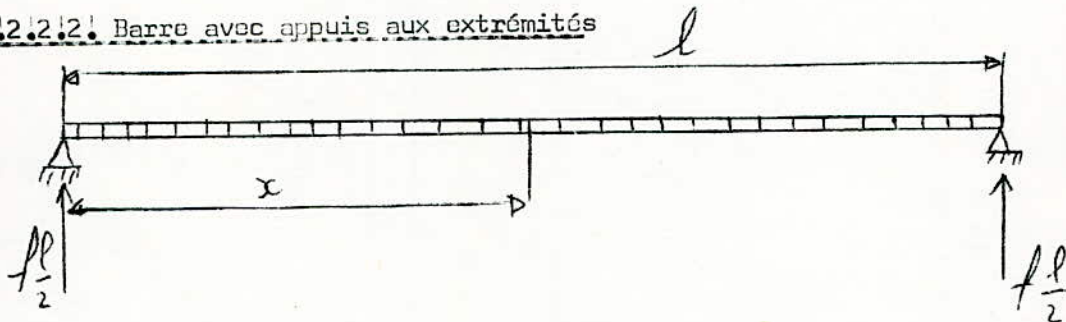
$$M_c(\frac{l}{2}) = M_{co} + f \frac{l^2}{8}$$

Après un calcul on trouve $M_{co} = -f \frac{l^2}{12}$

$$\Rightarrow M_c(\frac{l}{2}) = -f \frac{l^2}{12} + f \frac{l^2}{8} = f \frac{l^2}{24}$$

soit $M_c \max = f \frac{l^2}{24}$

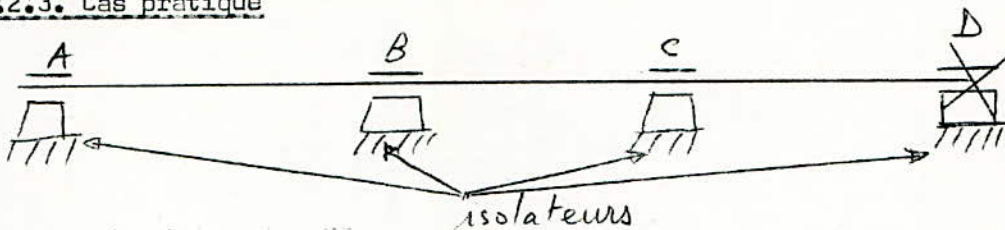
V.2.2.2. Barre avec appuis aux extrémités



$$M_c(x) = (f \cdot \frac{l}{2})x - (f \cdot \frac{x}{2})x$$

$M_c(\frac{l}{2}) = M_c \max = f \frac{l^2}{8}$

V.2.2.3. Cas pratique



La barre est ~~collante~~ avec un point fixe (exemple en D) Pour ce cas on prend une valeur moyenne pour le moment de courbure soit:

$$\boxed{M_{\text{max stat}} = f \frac{l^2}{10}} \quad (\text{N.m}) \Rightarrow M_{\text{max stat}} = f \frac{l^2}{10} \cdot \frac{100}{9,81} \quad (\text{kgf.cm})$$

V.2.2.4. contraintes

$$\sigma_{\text{max stat}} = \frac{M_{\text{max stat}}}{W} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad W = \text{module de résistance}$$

$$W = \frac{hb^2}{6} \quad (\text{cm}^3) \quad f \rightarrow$$

Nous devons vérifier : $\sigma_{\text{max stat}} \leq \sigma_{\text{ad}} < \sigma_c$

où σ_c est la contrainte limite élastique.

On prendra un coefficient de sécurité $\frac{\sigma_c}{\sigma_{\text{max}}} = 1,5 \text{ à } 2$

$$\sigma_c \text{ pour Cu} = 2400 \text{ kgf/cm}^2 \Rightarrow \sigma_{\text{max}} = \frac{2400}{1,5} = 1600 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_c \text{ pour Al} = 700 \text{ kgf/cm}^2$$

Etant donné que pendant les courts-circuits les barres sont soumises à des sollicitations électrodynamiques complexes, on peut calculer approximativement la sollicitation dynamique maximum à l'aide de la sollicitation statique maximum!

$$\boxed{\sigma_{\text{max dy}} = K_{\sigma} \cdot \sigma_{\text{Max stat.}}$$

V.2.3. Vérification à la stabilité dynamique

Après étude on a la courbe $k_{\sigma} = \varphi \left(\frac{f_0}{f_n} \right)$

f_0 = fréquence propre de la barre

f_n = fréquence du réseau

On voit d'après cette courbe que nous devons avoir

$$0 < K < 1 \Rightarrow \begin{cases} 0 < \frac{f_0}{f_n} < 0,5 \\ 3,4 < \frac{f_0}{f_n} < 4 \end{cases}$$

afin d'éviter la phénomène de résonance.

Détermination de f_0 .

Après étude on a : $f_0 = C_1 C_2 \cdot \frac{3}{4l^2} \sqrt{\frac{EJ}{\rho g}}$

l (en mètres) entre deux isolateurs.

$E_{cu} = 13000 \text{ kgf/mm}^2 = 13000 \cdot 9,81 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ (module d'élasticité)

$E_{Al} = 7000 \cdot 9,81 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$

J = moment d'inertie de la barre en m^4

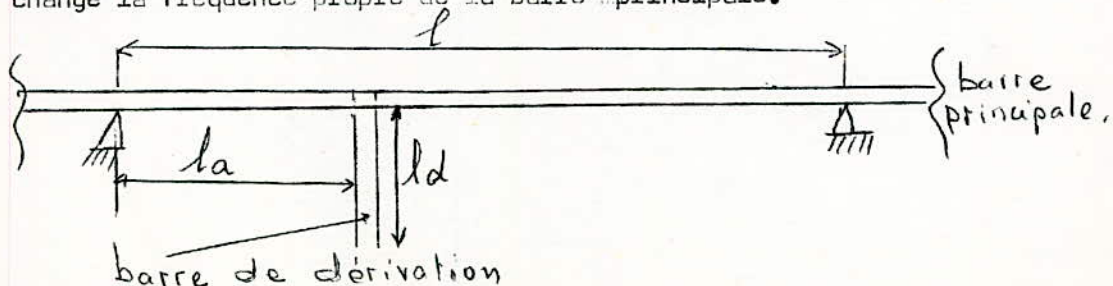
$\rho_{cu} = 8,9 \cdot 10^3 \text{ Kgf/m}^3$ (densité de la barre)

$\rho_{Al} = 2,7 \cdot 10^3 \text{ Kgf/m}^3$

g = section de la barre en m^2

$C_1 = 1$ car nous choisissons une seule barre élémentaire

C_2 = Coefficient tenant compte du nombre de dérivation la barre de dérivation change la fréquence propre de la barre principale.



$$C_{2r} = \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{64} \frac{Jr}{J} \left(\frac{l}{ldr}\right)^3 \mu_r}{1 + 0,6 \frac{qr}{g} \frac{dr}{l} \mu_r}} \quad \text{pour une barre rigide}$$

$\mu =$ facteur de non symétrie donné par une courbe $\mu = f\left(\frac{la}{l}\right)$

$la =$ distance la plus petite entre l'isolateur support et la dérivation.

Si nous choisissons les dérivation aux points des supports
isolateurs nous aurons $la = 0$ et d'après la courbe $\mu = f(la/l)$ $\mu = 0$ et

$$\underline{C_{2r} = 1}$$

Do devient à son tour :

$$F_0 = \frac{3}{4l^2} \sqrt{\frac{EJ}{\rho g}}$$

V.2.4. ApplicationV.2.4.1. stabilité statique

$$f_2 \text{ choc} = (1,8)^2 \cdot 0,87 \cdot \frac{(\sqrt{2} I'')^2}{2\pi a} \quad \text{où } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} ; I'' = 7414 \text{ A}$$

$a = 1 \text{ m}$ (distance entre les axes de deux barres voisines).


$$\text{Soit } f_2 \text{ choc} = \frac{(1,8)^2 \cdot 0,87 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot (\sqrt{2} \cdot 7414)^2}{2\pi} = 62 \text{ N/m}$$

$f_2 \text{ choc} = 62 \text{ N/m}$

d'où le moment de courbure statique en choisissant une longueur entre deux isolateurs supports consécutifs égale à 4m.

$$M_c \text{ stat} = \frac{f_2 \text{ choc} \cdot l^2}{10} \cdot \frac{100}{9,81} = \frac{62 \cdot (4)^2}{10} \cdot \frac{100}{9,81} = 1011 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

d'où l'on déduit $\sigma_{\text{stat}} = \frac{M_c \text{ stat}}{W}$

En plaçant la barre horizontalement on a :  $h = 4 \text{ mm}$

$$W = \frac{hb^2}{6} = \frac{0,4 \cdot (4)^2}{6} \Rightarrow \sigma_{\text{stat}} = \frac{1011 \cdot 6}{0,4 \cdot (4)^2} = 947 \text{ kgf/cm}^2$$

On voit donc que la condition est vérifiée!

V.2.4.2. Stabilité dynamique:

$$J = \frac{hb^3}{12} = \frac{0,004 \text{ m} \cdot (0,04)^3}{12} \text{ m}^4 = 5,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$f_0 = \frac{3}{4l^2} \sqrt{\frac{EJ}{\rho g}} = \frac{3}{4 \cdot 4^2} \sqrt{\frac{13000 \text{ Ad}^6 \cdot 5,3 \cdot 10^{-6}}{8,9 \cdot 10^{-3} \cdot 160 \cdot 10^{-6}}}$$

$$f_0 = \frac{3}{4 \cdot 4^2} \cdot 2,2 \cdot 10^2 = 10,3 \text{ Hz}$$

$f_0 = 10,3 \text{ Hz}$

$$\frac{f_0}{50} = \frac{10,3}{50} = 0,2$$

La condition de stabilité dynamique est donc vérifiée!

V.3. VERIFICATION AUX EFFETS THERMIQUES

En plus de la vérification aux efforts électrodynamiques nous devons aussi vérifier l'installation aux effets thermiques qui doivent être calculés pour le régime normal de fonctionnement pour lequel la température des barres ne doit pas dépasser une valeur limite. (Dans notre cas 250° C car barres en cuivre).

Une partie de la chaleur produite par le courant traversant les barres sera absorbée par ces dernières et une autre partie sera cédée au milieu ambiant, ce que traduit la formule suivante :

$$P dt = \underbrace{C M d\tau}_{\text{absorbée}} + \underbrace{\lambda S \tau dt}_{\text{transmise au milieu ambiant}} \quad (1)$$

C = chaleur spécifique du matériau

M = masse

S = surface latérale (surface d'échange)

dt = variation du temps

λ = coefficient de transmission de la chaleur au milieu ambiant.

τ = différence de température entre le conducteur et le milieu ambiant.

P = puissance due au courant traversant le conducteur.

Lors d'un court-circuit de durée très courte on peut supposer que la température du milieu ambiant ne change pas et par conséquent la chaleur transmise à ce dernier est nulle. D'après cette considération la relation (1) devient :

$$P dt = C M d\tau \quad (2)$$

$$\text{ou bien } i^2 R dt = C M d\tau \quad (R = \text{résistance du conducteur})$$

$$\text{avec } R = R_0 (1 + \alpha \theta)$$

$$R_0 = \rho_0 \frac{l}{S} \quad l = \text{longueur du conducteur}$$

$$C = C_0 (1 + \beta \theta)$$

$$M = \gamma l S \quad S = \text{section du conducteur}$$

la relation (2) devient :

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

$$i^2 P_0 (1 + \alpha \theta) \frac{1}{S} dt = C_0 (1 + \beta \theta) 1. S d\theta \quad (4)$$

$$\frac{1}{S^2} i^2 dt = \frac{C_0 \gamma}{P_0} \cdot \frac{1 + \beta \theta}{1 + \alpha \theta} d\theta \quad (5)$$

On intègre cette équation différentielle (5) entre les instants $t_i = 0$ et $t_f = t$ auxquels correspondent respectivement les températures initiale θ_i et finale θ_f du conducteur parcouru par le courant i .

$$\text{Soit : } \frac{1}{S^2} \int_0^t i^2 dt = \frac{C_0 \gamma}{P_0} \int_{\theta_i}^{\theta_f} \frac{1 + \beta \theta}{1 + \alpha \theta} d\theta \quad (6)$$

Après intégration on obtient :

$$\frac{1}{S^2} \int_0^t i^2 dt = \frac{C_0 \gamma}{P_0} \left[\left(\frac{\alpha - \beta}{\alpha^2} \text{Log} (1 + \alpha \theta_f) + \frac{\beta \theta_f}{\alpha} \right) - \left[\frac{\alpha - \beta}{\alpha^2} \text{Log} (1 + \alpha \theta_i) + \frac{\beta \theta_i}{\alpha} \right] \right]$$

En appelant $A(\theta) = \frac{\alpha - \beta}{\alpha^2} \text{Log} (1 + \alpha \theta) + \frac{\beta \theta}{\alpha}$ l'équation ci-dessus donne :

$$\boxed{A(\theta_f) = \frac{1}{S^2} \int_0^t i^2 dt + A(\theta_i)} \quad (7)$$

C'est cette relation qui nous permet de vérifier la section de la barre aux effets thermiques. Connaissant la valeur de $\frac{1}{S^2} \int_0^t i^2 dt$ et θ_i , les courbes

$\theta = f(A(\theta))$ ci-après permettent de déterminer $A(\theta_f)$ et par suite la température finale θ_f .

Si cette valeur de θ_f ne dépasse pas 250°C pour le cuivre la section choisie pour les barres est correcte; dans le cas contraire il faut changer la section jusqu'à satisfaire cette condition.

Calcul de $\frac{1}{S^2} \int_0^t i^2 dt$:

on a vu que $i = i_p + i_a$, ce qui donne $\int_0^t i^2 dt = \int_0^t (i_p + i_a)^2 dt$

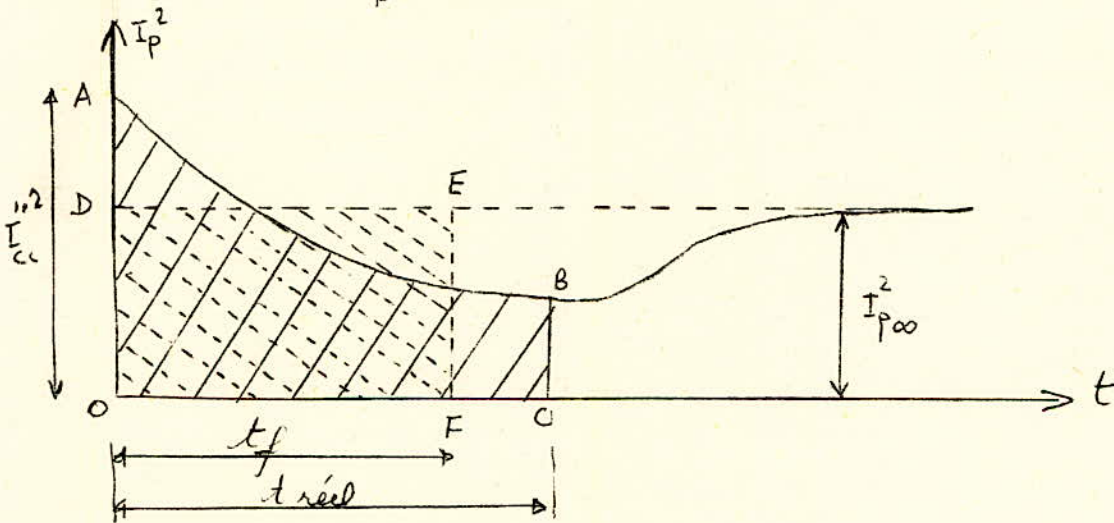
soit $\int_0^t i_a^2 dt + \int_0^t i_p^2 dt + \int_0^t 2 i_p i_a dt$ en négligeant $\int_0^t 2 i_p i_a dt$ par

rapport aux autres termes.

Pour calculer $\int_0^t i_p^2 dt$ et $\int_0^t i_a^2 dt$ on fait appel à la notion de temps fictif.

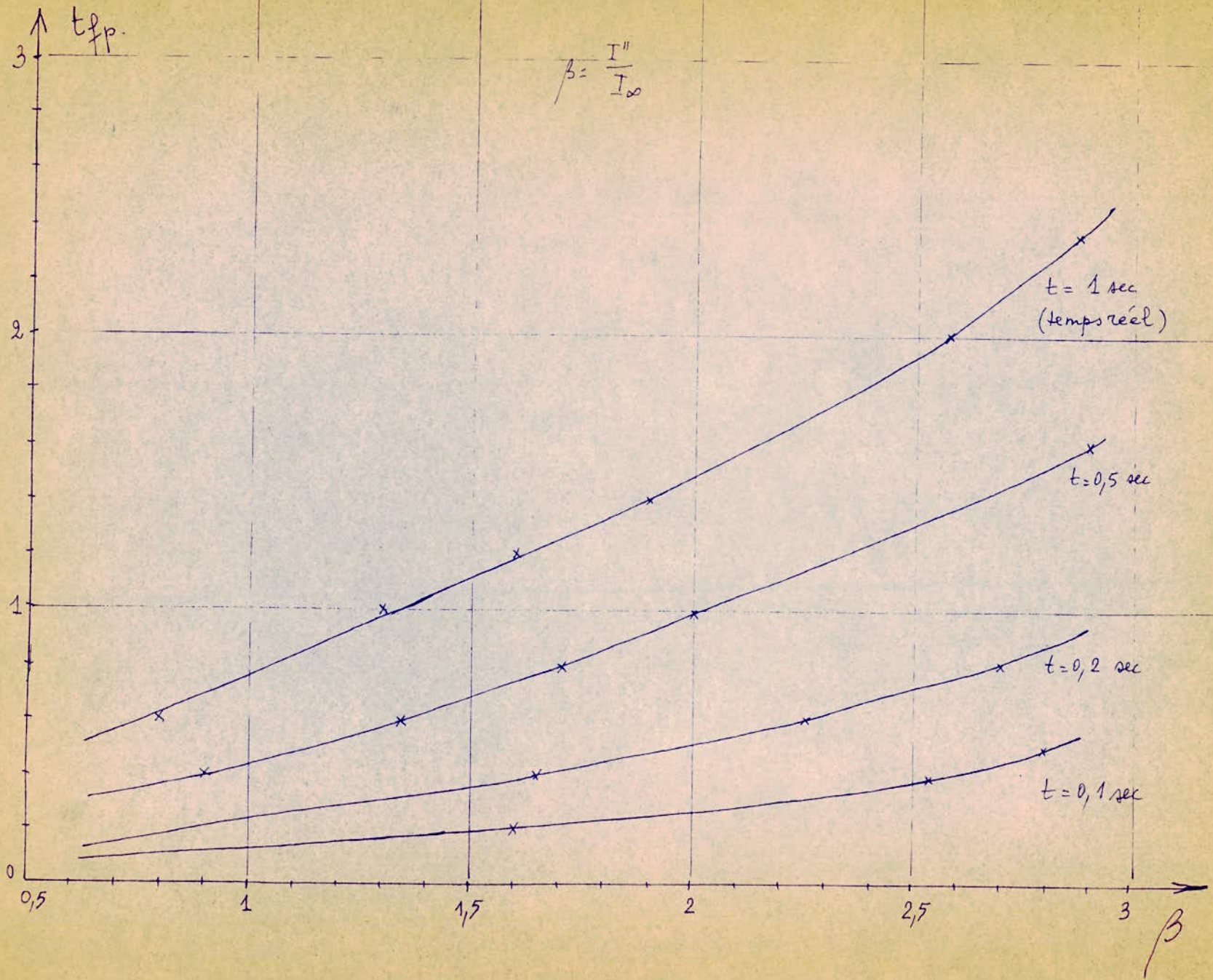
a) temps fictif périodique [correspondant à la composante périodique de i_{cc}]

Nous allons les définir à partir de la courbe de variation de la composante périodique I_p^2 du courant en fonction du temps.



L'aire hachurée $OABC$ est proportionnelle à la chaleur dégagée dans le conducteur durant le court-circuit. On détermine une autre aire $ODEF$ à laquelle correspond le temps t_f ce temps t_f au bout duquel les deux aires ci-dessus sont égales s'appelle temps fictif.

Il existe des courbes donnant des temps fictifs périodiques en fonction du temps de durée du court-circuit et du rapport $B = \frac{I''}{100}$



b) temps fictif apériodique : t_{fa}

De la même façon que précédemment on peut écrire

$$I_{\infty}^2 \cdot T_{fa} = \int_0^t i_a^2 dt$$

$$\text{Or } i_a = \sqrt{2} I'' e^{-t/T_a} \text{ soit } t_{fa} = \frac{\int_0^t i_a^2 dt}{I_{\infty}^2} = \frac{\int_0^t (\sqrt{2} I'' e^{-t/T_a})^2 dt}{I_{\infty}^2}$$

$$t_{fa} = 2 \left(\frac{I''}{I_{\infty}} \right)^2 \int_0^t e^{-\frac{2t}{T_a}} dt = \beta^2 T_a (1 - e^{-2t/T_a})$$

$$\left. \begin{array}{l} T_a = 0,05 \\ t = 0,25 \end{array} \right\}$$

$$e^{-\frac{2t}{T_a}} = \frac{1}{e^{10}} \approx 0 \text{ d'où}$$

$$\boxed{t_{fa} = \beta^2 \cdot T_a}$$

T_a = constante d'amortissement de la composante apériodique

Donc l'équation (7) devient :

$$\boxed{\Lambda(\theta_f) = \Lambda(\theta_i) + \frac{I_{\infty}^2}{S^2} (t_{fp} + t_{fa})}, \quad t_{fp} + t_{fa} = t_f.$$

APPLICATION:

1° Calcul de $i_{cc\infty}$ dans le jeu de barres

$$I_{cc(G)}^{\infty} = \lambda_g \cdot I_{g_n} = 2 \cdot 4,2 \text{ KA} = 8,4 \text{ KA}$$

$$I_{cc(SF)}^{\infty} = \lambda_{(SF)} \cdot I_{n(SF)} = 2,5 \cdot 0,66 \text{ KA} = 1,65 \text{ KA}$$

$$I_{cc(jb)}^{\infty} = I_{cc(G)}^{\infty} + I_{cc(SF)}^{\infty} = 8,4 \text{ KA} + 1,65 \text{ KA} = 10,05 \text{ KA}$$

Nous avons pris $\lambda_g = 2$ pour les turbo-générateurs g_1 et g_2 et $\lambda_{SF} = 2,5$ pour le système énergétique sachant qu'il se compose de turbogénérateurs ($\lambda_{\text{moy}} = 2$) et d'hydrogénérateur ($\lambda_{\text{moy}} = 3$).

Ces nous ont été données par les courbes suivantes :

2°/ Calcul des temps fictifsa) temps fictif périodique

$$B = \frac{I_{cc} (jb)}{I_{cc00} (jb)} = \frac{7,41}{10,05} = 0,73$$

La courbe $t_{fp} = f(\beta, t)$ donne pour $\beta = 0,73$ et $t = 0,25$ sec

$$\underline{t_{fp} = 0,18 \text{ sec}}$$

b) temps fictif apériodique:

$$t_{fa} = \beta^2 \cdot T_a \quad \text{avec } \beta = 0,73 \text{ et } T_a = 0,05 \text{ sec}$$

$$\text{Soit } \underline{T_{fa} = (0,73)^2 \cdot 0,05 = 0,03} \Rightarrow t_f = 0,18 + 0,03 = 0,21 \text{ sec.}$$

c) calcul de $\Lambda(\theta_f)$

$$\theta_i = 70^{\circ}\text{C} \Rightarrow \text{La courbe } \theta = f[\Lambda(\theta)] \text{ donne } \Lambda(\theta_i) = 11750$$

$$\frac{I_{cc00}^2 (jb) \times t_f}{s^2} = \frac{(10,05)^2 \cdot 10^6 \cdot (0,21)^2}{(160)^2} = 820$$

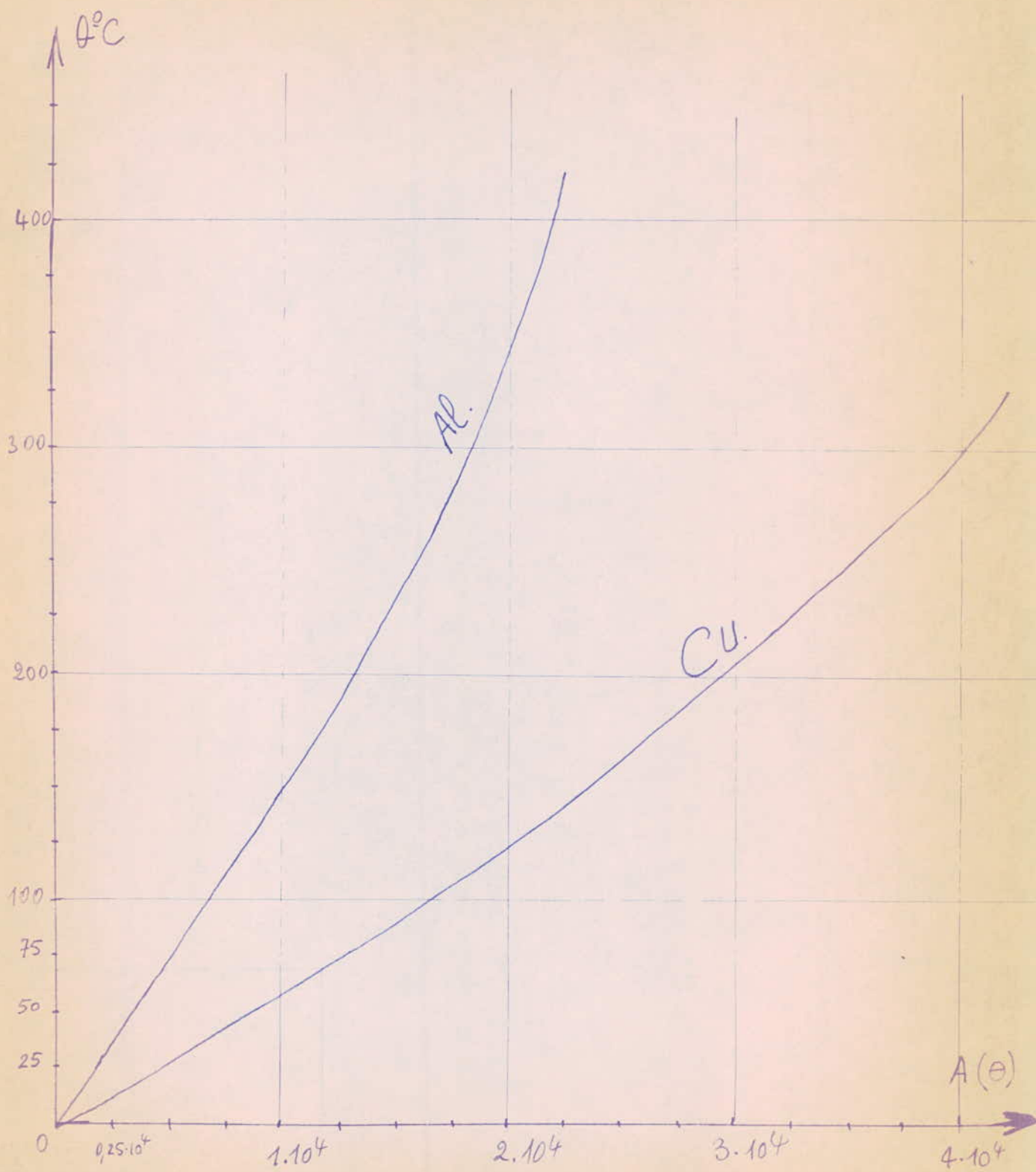
$$\Rightarrow \Lambda(\theta_f) = 11750 + 820 = 12570$$

$$\text{La courbe } \theta = f[\Lambda(\theta)] \text{ donne pour } \Lambda(\theta_f) = 12570$$

et pour le Cu une valeur $\theta_f = 75^{\circ}\text{C}$

Conclusion :

La température finale $\theta_f = 75^{\circ}\text{C}$ étant inférieure à la température limite 250°C , la section de la barre choisie est correcte c'est à dire qu'elle résiste aux effets thermiques.

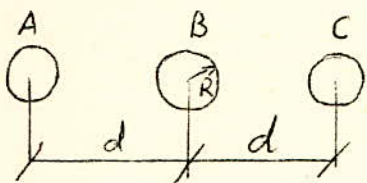


V-4 VERIFICATION A LA CHUTE DE TENSION

En régime normale de fonctionnement il se produit une chute de tension (dans les barres) pour laquelle on admet une valeur allant jusqu'à 2% de la tension nominale :

Pour les barres la valeur de la résistance est négligeable devant la réactance X. On considère donc seulement l'inductance qui est fonction du profil de la barre et de la position relative des barres.

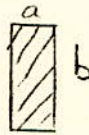
Il existe des formules donnant l'inductance pour les barres cylindriques et une relation d'équivalence entre celles-ci et les barres rectangulaires.



$$L_A = L_C = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\ln \frac{d}{R} + 0,346 \right] \cdot l$$

$$L_B = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\ln \frac{d}{R} \right] \cdot l$$

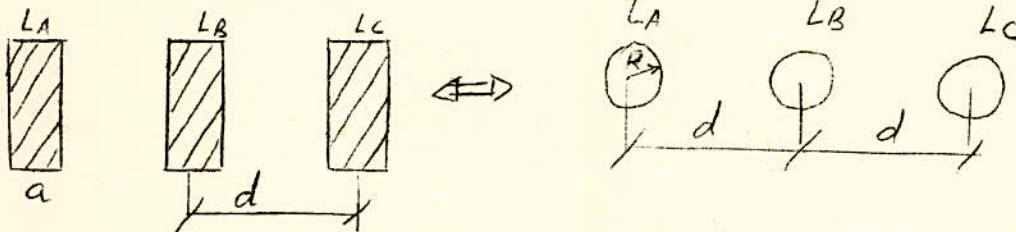
Soit la barre rectangulaire :



La barre tubulaire équivalente à pour rayon :

$$R = 0,2235 (a + b)$$

Donc on pourra remplacer les 3 barres rectangulaires par 3 barres tubulaires équivalentes.



Dans notre cas : $a = 4 \text{ mm}$; $b = 40 \text{ mm}$; $d = 1 \text{ m}$; $l = 20 \text{ m}$

Donc $R = 0,2235 (4 + 40) = 9,8340 \text{ mm}$

$$L_A = L_C > L_B$$

$$L_A = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\ln \frac{d}{R} + 0,346 \right] \cdot l = 4 \pi \frac{10^{-7}}{2\pi} \left[\ln \frac{10^3}{9,834} + 0,346 \right] \cdot 20$$

$$L_A = 2 \cdot 10^{-7} [4,946] \cdot 20 = 19,784 \cdot 10^{-6} \approx 20 \mu H$$

$$\text{d'où } L_A \omega = 20 \cdot 10^{-6} \cdot 314 = 6280 \mu \Omega = 6280 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Soit la chute de tension ; $\Delta U = L_A \omega \cdot I$

$$\Delta U = 6280 \cdot 10^{-6} \cdot 617 = 4 \text{ volts}$$

$$\underline{\Delta U = 4 \text{ Volts}}$$

$$\Delta U_{ad} = \frac{2\% U_n \cdot 2.60 \cdot 10^3}{100} = 1200 \text{ Volts}$$

On a bien $\Delta U < 2\% U_n$, donc la section des barres est correcte!

Conclusion

Les barres installées sont dimensionnées pour $I_n = 3000$ A alors que le courant n'est que de 625 A (voir répartition du courant par tronçon de barres), ceci soit dans un but d'augmenter la puissance de la centrale dans l'avenir, soit que lors de la projection de celle-ci on a omis de procéder à la répartition du courant le long des barres. Elles peuvent supporter une puissance de $\frac{3000}{625} = 4$ fois celle installée actuellement.

Les sectionneurs sont bien choisis dans l'ensemble. Par contre les disjoncteurs eux sont bien choisis uniquement en fonction du courant normal, leurs pouvoirs de coupure étant multipliés par un coefficient assez élevé ce qui revient cher!

Le point de court-circuit K_1 entre générateur et transformateur ne doit pas être considéré, la probabilité d'y avoir avarie étant très faible, car d'une part la distance est très petite et d'autre part le circuit est très bien protégé, mais on l'a étudié quand même afin de présenter un travail complet.

Dans notre étude on a considéré une charge inductive et il serait souhaitable de s'intéresser au cas d'une charge capacitive de manière à compléter l'étude des courts-circuits!