

24/75

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

lea

DEPARTEMENT ELECTRICITE



# PROJET DE FIN D'ETUDES

ALGORITHME ET PROGRAMME  
 DE CALCUL DU COURANT DE  
 COURT CIRCUIT SYMETRIQUE DANS  
 LES RESEAUX RADIAUX



Proposé par :

V. STRIAPAN

Etudié par :

A. SAID

PROMOTION 1975

UNIVERSITE D'ALGER

---

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

---

DEPARTEMENT ELECTRICITE

---

PROJET DE FIN D'ETUDES

---

ALGORITHME ET PROGRAMME DE CALCUL  
DU COURANT DE COURT-CIRCUIT  
SYMETRIQUE DANS LES RESEAUX RADIAUX

Proposé et Dirigé  
par V. STRIAPAN

Etudié et Réalisé  
par A. SAID

PROMOTION : 1975

COMMISSION

Le Président du Jury :

Les Membres du Jury :

## P R E F A C E

L'objet de notre projet, est d'établir un modèle mathématique (algorithme et programme) pour déterminer à l'aide de l'ordinateur, le courant de court-circuit triphasé dans n'importe quel point et pour n'importe quel réseau pourvu qu'il soit de structure radiale, alimenté d'un seul côté.

- Qu'il me soit permis d'exprimer toute ma reconnaissance à Mr. V. STRIAPAN qui a suivi avec une bienveillante attention tout mon travail.

- Mes remerciements vont également à tous les professeurs qui ont contribué à ma formation, ainsi que les personnes qui, de près ou de loin, m'ont aidé à l'élaboration de ce projet .

A. SAID

A MES PARENTS

## S O M M A I R E

MATIERES	PAGE
Introduction .....	I
CHAP:1 Etude théorique des court-circuits .....	5
1.1 Causes, nature et effets des C-C .....	5
1.2 Description des processus électromagné- tiques lors d'un court-circuit .....	8
1.2.1 Le régime transitoire .....	II
1.2.2 Le régime quasi-stable .....	I2
1.2.3 Etat du circuit avarié.....	I3
1.2.4 Hypothèses simplificatrices .....	I5
 CHAP:2 Calcul du courant de court-circuit ....	I7
2.1 Composition du schéma équivalent .....	I7
2.2 Paramètres électriques des éléments du système électro-énergétique .....	I8
2.2.1 La réactance des alternateurs .....	I8
2.2.2 Paramètres électriques des transformateurs	2I
2.2.3 Caractéristiques des lignes .....	24
2.3 Les paramètres en Grandeurs réduites .....	34
2.4 Calcul du courant de court-circuit .....	34
2.4.1 Méthode des courbes de calcul .....	36
 CHAP:3 Méthode <sup>de</sup> calcul de Icc .....	40
3.1 Relevés des données à partir du schéma électrique .....	40
3.2 Présentation topologique du réseau radial.	45
3.2.2 Schéma topologique du réseau .....	46
3.2.3.2 Construction de la matrice topologique	47
3.2.5 Présentation et calcul des paramètres du réseau .....	50
3.3 Algorithme de la méthode .....	53
3.4 Organigramme .....	57
3.4.4 Nomenclature de la notation utilisée ...	65

CHAP:4 Application de la méthode .....	68
4.I Exemple 1 .....	68
4.I.5 Résultats donnés par l'ordinateur .....	71
4.2 Exemple 2 .....	72
4.2.5 Résultats donnés par l'ordinateur .....	77
CHAP:5 Exploitation du programme .....	79
5.I Travail de préparation .....	79
5.2 Introduction des données .....	81
5.3 Configuration, et performances des machines utilisées .....	83
CONCLUSION: .....	84
ANNEXE : PROGRAMME FORTRAN .....	86
BIBLIOGRAPHIE .....	90

-- INTRODUCTION --

Pendant le fonctionnement des installations du système électro-énergétique des perturbations anormales peuvent apparaître et donner naissance à des phénomènes électromagnétiques et donc à des variations importantes des paramètres du régime (courant, tension, fréquence, stabilité, etc...) Les conséquences de ces perturbations peuvent être graves et conduisent à l'interruption de l'alimentation en énergie des consommateurs et surtout à la détérioration de l'équipement électro-mécanique.

Cependant la sûreté du bon fonctionnement dépend beaucoup de la façon dont ont été considérés les processus transitoires dans les projets de conception et de réalisation du réseau électrique.

Les causes les plus fréquentes de l'apparition des phénomènes transitoires électromagnétiques sont les "Courts-Circuits" et les conséquences qui en découlent, telles que l'instabilité et la perte du synchronisme.

Dans la majorité des cas, les court-circuits ont un caractère complexe qui dépend de la structure du système électro-énergétique, du fait aussi que la plus part des appareils fonctionnent à la limite de la linéarité; etc...

Ainsi la connaissance des courants de court-circuit est nécessaire pour définir les caractéristiques à imposer :

- Au jeux de barres, aux connexions de raccordement qui doivent résister aux efforts électrodynamiques en court-circuit :

- Aux liaisons éventuelles entre neutre et sol, qu'elles soient directes, ou comprennent une impédance de limitation (bobine de Peterson) ;
- Aux transformateurs de courants, qui subissent en plus des efforts mécaniques et des échauffements, une saturation de leurs circuits magnétiques ce qui modifie leur rapport de transformation au dessus d'une certaine valeur du courant ;
- Aux disjoncteurs qui doivent être capables de couper les courants de court-circuits.

Les calculs des courants de court-circuit permettent aussi :

- De définir les configurations des réseaux compatibles avec les caractéristiques de l'appareillage existant en particulier les pouvoirs de coupure des disjoncteurs ;
- De fixer la sensibilité des relais de protection ;
- De calculer les courants dans le sol en cas de défauts et les élévations de tension que ces courants peuvent provoquer ;
- De prévoir les troubles éventuels induits dans les lignes voisines de télécommunications.

La complexité des processus électromagnétiques lors d'un court-circuit dans le système électro-énergétique développé, ne permet pas d'obtenir des résultats par une méthode de calcul direct si on ne fait pas des suppositions simplificatrices. L'introduction de telles suppositions permet d'obtenir les valeurs désirées avec une précision suffisante soit par les méthodes de calcul à la main (surtout pour les réseaux relativement simples), soit par l'emploi des différents auxiliaires de calcul, parmi les derniers citons :

- L'analyseur à courant continu (table à courant continu)
- L'analyseur à courant alternatif (table à courant alternatif)
- Calculateurs analogiques
- Calculateurs arithmétiques (ordinateurs)

La possibilité d'emploi des calculateurs pour résoudre les problèmes des courants de court-circuit est relativement récente ; les premières études dans cette voie ont eu lieu vers 1950 et ce n'est que 5 à 10 ans après que certaines des méthodes ont commencé à être appliquées de façon systématique.

L'utilisation des ordinateurs permettant d'exécuter les calculs détaillés durant un temps réduit, ouvrent de nouvelles perspectives dans ce domaine. Il est possible à ce moment, d'enlever certaines suppositions, d'augmenter par la même la précision etc... Bien entendu, on cherche à exploiter d'une façon optimale les possibilités de l'ordinateur et ceci par la mise au point d'un algorithme simple de la méthode d'un programme optimal appelé à être traité par une machine de constitution modeste.

Dans notre projet nous établissons un modèle mathématique pour le calcul des courants de court-circuit triphasée pour le réseau radial généralisé, alimenté d'un seul côté.

-- ETUDE THEORIQUE DES COURT-CIRCUITS --

1-1. CAUSES, NATURE, ET EFFETS DES COURT-CIRCUITS,

On groupe sous le nom de "Court-circuits" tous les incidents provoqués par un contact soit entre un conducteur et le sol, ou toute pièce mécanique reliée à ce dernier, soit entre conducteurs.

Dans la presque totalité des cas, ce contact a lieu par l'intermédiaire d'un arc, tout au moins en ce qui concerne les installations à haute tension.

Les causes de l'apparition des Court-Circuits sont multiples ; ils peuvent être :

- D'origine purement électrique et proviennent alors de l'altération des isolants lesquels deviennent incapables de tenir la tension
- D'origine mécanique et sont dus dans ces conditions à une rupture des conducteurs ou des isolateurs, à la chute d'un corps étranger, telle une branche d'arbre, sur une ligne aérienne, etc...
- D'origine atmosphérique et sont alors causés soit par la foudre qui tombe sur une ligne ou un poste ou leur voisinage immédiat, soit par la tempête, le brouillard ou le givre lesquels produisent des effets mécaniques (tel que les rapprochements des conducteurs entre eux) ou électrique (telle que l'altération des surfaces des isolateurs) etc...
- Dus, enfin, à des fausses manoeuvres (par exemple l'ouverture d'un sectionneur en charge) ces contacts accidentels, n'intéressent pas souvent, tous les conducteurs simultanément:

Dans le cas des réseaux triphasés, l'expérience montre que la plupart des Court-Circuits se produisent, ou plus exactement débutent, entre une phase et la terre ; si le défaut n'est pas éliminé rapidement, l'arc peut gagner la deuxième et s'il persiste encore, la troisième phase.

.../...

La fréquence des différents types de Court-Circuits ainsi que leurs schémas équivalents sont représentés dans le tableau suivant (fig.1.1)

Les défauts entre trois phases ou défauts triphasés sont dûs :

- Soit à des phénomènes mécaniques susceptibles de mettre en contact entre eux ou avec la terre, les trois conducteurs simultanément (destruction d'un pylône)
- Soit un coup de foudre direct qui par suite d'une valeur excessive de la résistance des prises de terre du pylône porte celui-ci à un potentiel suffisamment élevé pour que l'amorçage se produise simultanément sur les trois phases.
- Soit enfin, à une fausse manoeuvre telle que l'ouverture en charge d'un sectionneur dans un poste où les phases ne sont pas séparées.

Les défauts triphasés survenant sur les réseaux de câbles souterrains sont très rares et sont dûs en général à des causes mécaniques sauf pour les réseaux à tension relativement basses où l'emploi de câbles trifilaires augmente le risque de court-circuits triphasés.

En général la présence d'un court-circuit sur le réseau provoque des surintensités et des chutes de tension. Ces phénomènes dont l'importance dépend de la constitution du réseau, de la nature du défaut et de l'emplacement de celui-ci, entraînent toute une série de conséquences parmi lesquelles citons :

- échauffement dûs aux courants élevés et dégâts causés par arcs ;
- accidents d'interrupteurs ;
- efforts électrodynamiques anormaux ;
- chutes de tension élevés
- perturbations dans les circuits de télécommunications avoisinants.

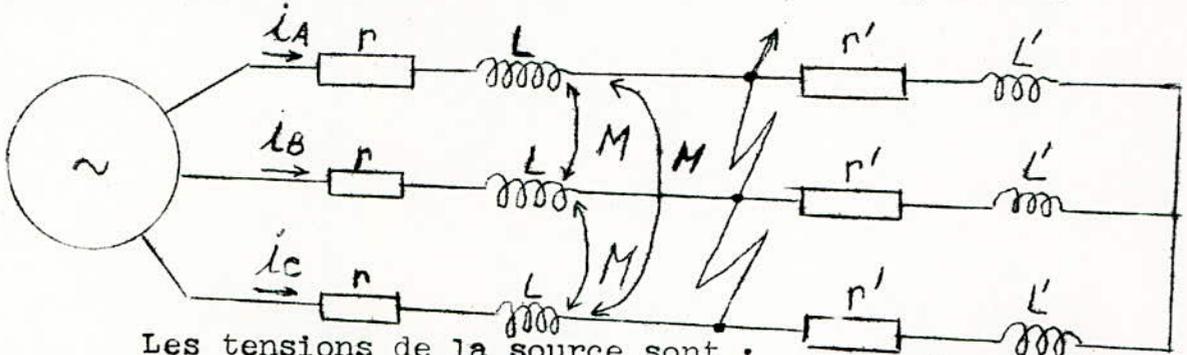
.../...

(Fig. 1-1)

Types de C.C	Symboles	Probabilité	Schemas
Monophasé	PN	65%	
Biphasé à la terre	2PN	20%	
Biphasé	2P	10%	
Triphasé	3P	5%	
Triphasé à la Terre	3PN	5%	

1-2 DESCRIPTION GÉNÉRALE DES PROCESSUS ÉLECTROMAGNÉTIQUES LORS D'UN COURT-CIRCUIT,

Le schéma de la (figure 1.2) représente un circuit électrique triphasé ou à lieu le court-circuit au point K.



Les tensions de la source sont :

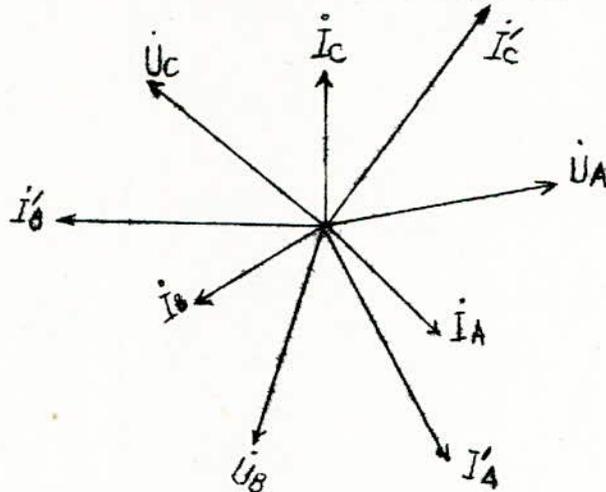
$$u_a = U_m \sin(\omega t + \alpha)$$

$$u_b = U_m \sin(\omega t + \alpha + 120^\circ)$$

$$u_c = U_m \sin(\omega t + \alpha + 2 \cdot 120^\circ)$$

- Fig. 1.2 -

Soient :  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C, \dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ , les paramètres du régime avant le court-circuit (Fig. 1-3)



- Fig. 1-3 -

Après l'apparition du court-circuit, le schéma de la (Fig.1-2) se divise en deux parties indépendantes ; une partie reste branchée sur la source d'alimentation et l'autre se transforme en circuit fermé vu que l'impédance du Circuit qui reste alimenté diminue, le courant dans le circuit augmente et ainsi<sup>que</sup> les vecteurs  $\dot{I}'_A$ ,  $\dot{I}'_B$ ,  $\dot{I}'_C$ , correspondant au nouveau régime établi (Fig.1-3). On peut écrire l'équation valable pour n'importe quel instant pour une phase A par exemple.

$$u_a = i_A \cdot r + L \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt} ;$$

Cette équation peut être représentée en tenant compte de l'équation  $-i_A = i_B + i_C$  de la façon suivante

$$u = i \cdot r + Ll \frac{di}{dt}$$

ou  $Ll = L - M$  : l'inductance équivalente d'une phase  
la solution de la dernière équation est :

$$i = \frac{Um}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \psi_1) + C \cdot \exp\left(-\frac{r}{Ll} t\right)$$

avec :  $Z$  : l'impédance de court-circuit du circuit

$\psi_1$  : l'angle de déphasage du courant

$C$  : une constante d'intégration qui doit être déterminée à partir des conditions initiales.

Le premier terme de l'expression représente une composante périodique du courant qui a une amplitude constante, l'autre terme correspond à une composante aperiodique, cette dernière s'amortit avec une constante de temps déterminée par les paramètres du circuit.

$$T_a = \frac{Ll}{r} = \frac{Xl}{r} \quad \text{en seconde.}$$

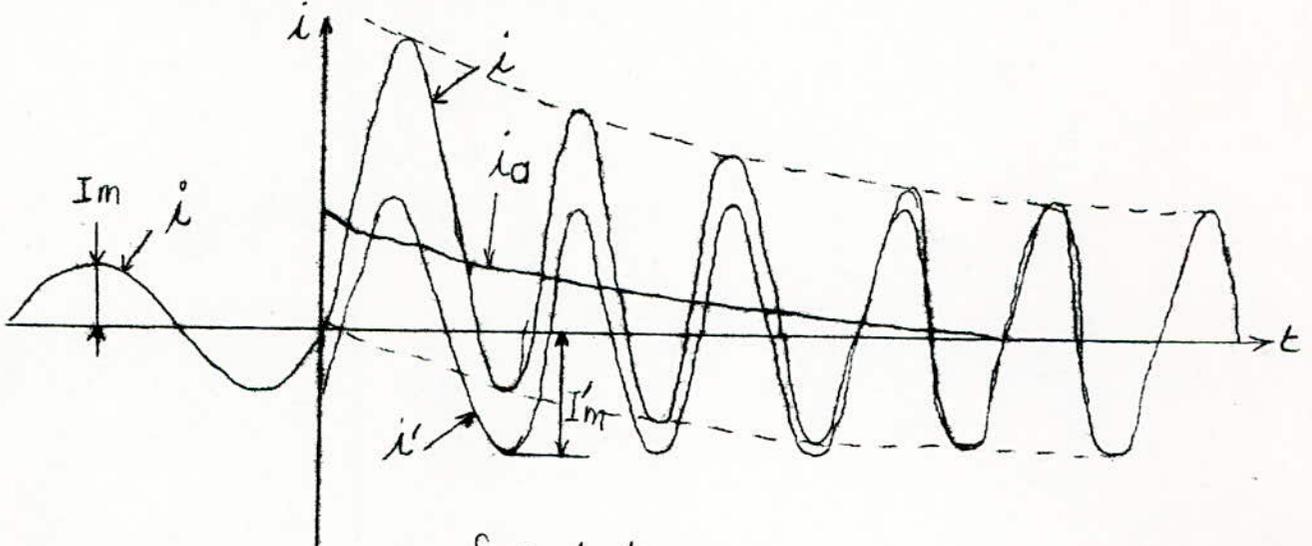
Une valeur initiale d'une composante libre (apériodique)  $i_a(0)$  est déterminée par une condition d'égalité du courant total juste avant et tout de suite après le court-circuit ce qui permet d'écrire

$$\begin{aligned} i_a &= C \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) = i_a(0) \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) \\ &= I_m \sin(\alpha - \varphi_1) - I'_m \sin(\alpha - \varphi_2) \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right); \end{aligned}$$

Alors nous avons pour le courant total

$$i = i' + i_a = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi_1) + i_a(0) \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right).$$

Les courbes de courants correspondantes à cette expression sont représentées sur la (fig.1-4)



- fig. 1-4 -

On voit qu'environ 0,01 sec après l'apparition du court-circuit, le courant dans le circuit atteint sa valeur maximale, appelée courant de CHOC. Ce courant peut être déterminé d'après la formule.

$$i_{ch} = I_m + I'_m \exp(-0,01/Ta) = I'_m (1 + \exp(-0,01/Ta))$$

On pose  $1 + \exp(-0,01/Ta) = K_{ch} =$  coefficient de choc.

Ainsi nous avons  $i_{ch} = K_{ch} \cdot I'_m$

avec  $1 < K_{ch} < 2$

et le plus souvent on prend  $K_{ch} \approx 1,4$ .

#### 1-2.1 Le régime transitoir.

Le régime transitoir qui suit l'établissement de l'avarie dure un temps assez court pour poser de problème particulier et peut donc être négligé. En effet ce régime transitoir dû à l'apparition d'un échelon de tension en un point du réseau consiste d'abord en une onde qui se propage de long des lignes et atteint en quelques microsecondes les différents appareillages des postes, excités par l'échelon de tension qui y arrive plus ou moins amorti et divisé par des réflexions et transmissions successives ; Ces appareils engendrent des phénomènes oscillants dont les fréquences sont généralement de quelques milliers ou dizaines de milliers de Hertz. Leur action d'ensemble peut être synthétisée par l'indication d'une fréquence dominante dite " fréquence propre du réseau ".

Toutes ces oscillations sont amorties en quelques périodes, si bien qu'en général le régime transitoire est amorti dans un temps de l'ordre du centième de seconde. Il peut toutefois engendrer une " surtension interne " parfois dangereuse pour certains isolateurs.

### 1-2-2 Le régime quasi-stable.

Un nouveau régime quasi-stable tend à s'établir après le régime transitoire, il comporte des courants élevés, donc dangereux. Ce régime n'est que quasi-stable parce qu'au bout d'un délai de quelques dixièmes de seconde (ou mêmes de secondes) les mécanismes de régulation des machines raccordées au réseau commencent à réagir de façon sensible.

Pendant tout ce délai, les turbines continuent à fournir aux machines génératrices la même puissance mécanique qu'avant le défaut.

$$P_g = \frac{E_v}{X} \sin \theta$$

Les moteurs asynchrones ou synchrones, alimentés par le réseau possèdent compte tenu des machines qu'ils entraînent une inertie qui maintient pendant un temps du même ordre un appel de puissance  $P_m$  de plus les flux d'induction dans les circuits magnétiques ne varient que lentement et l'on peut admettre que les forces électromotrices correspondantes n'amorcent une variation sensible qu'avec des délais du même ordre (ou un peu inférieur).

Tout cela conduit à introduire dans l'expression de  $P_g$  ci-dessus pour  $X$  :

- La valeur de la réactance subtransitoire  $X''$  si le court-circuit ne dure que quelques centièmes de seconde :

- La valeur de la réactance transitoire  $X'$  s'il se prolonge pendant plusieurs dixièmes de seconde, comme c'est le cas dans l'état actuel des réseaux.

Dans le régime quasi-stable à étudier, les courants sont élevés et les tensions réduites (au moins dans une certaine zone autour du défaut (voir fig.1-5))

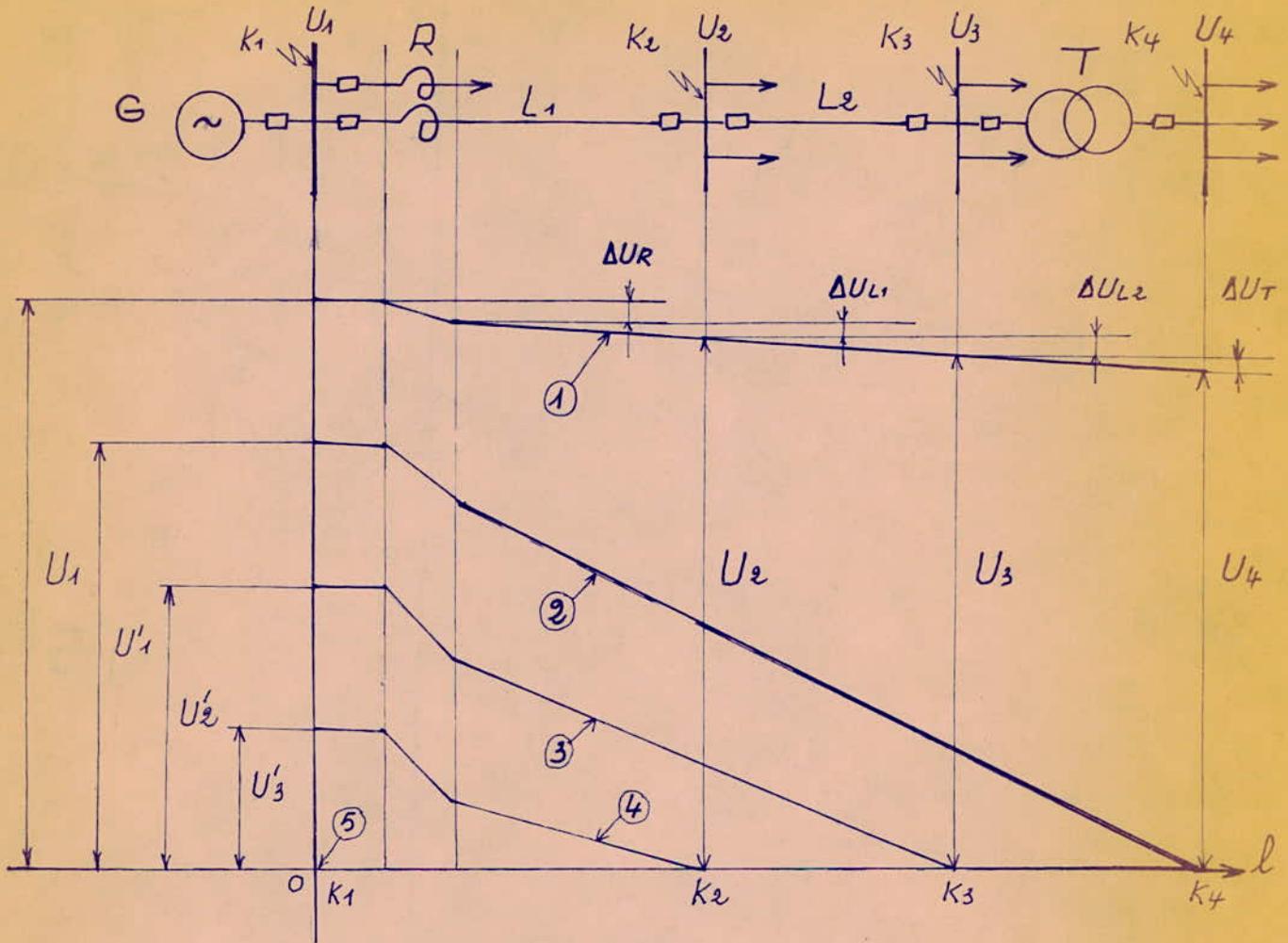
### 1-2-3 Etat du circuit avarié.

Pendant le déroulement des processus électromagnétiques et électrodynamiques, les consommateurs actifs tels que les compensateurs synchrones, les moteurs synchrones et asynchrones débitent de l'énergie électrique vers le point de court-circuit ; pratiquement cette influence est sensible seulement dans le cas des consommateurs de grandes puissances (relativement à celle de la source) situées près du défaut. Ils influencent ainsi indirectement la valeur du courant de court-circuit puisqu'ils déterminent l'état initial d'excitation des générateurs.

La valeur maximale du courant ( $I_{km}$ ) apparaît pendant la première période et le rapport  $M = \frac{I_{km}}{I_m}$  ( ou  $I_m$  est le courant nominal du régime normal) est appelé ordre de multiplication du courant de court-circuit.

- Dans le cas des court-circuits triphasés,  $m$  peut atteindre 18-20 aux bornes des alternateurs.

- Simultanément avec l'augmentation du courant dans le circuit avarié, apparaît aussi une diminution de la tension (Fig.1-5) qui finit par s'annuler au lieu du court-circuit. Cette chute à des répercussions néfastes sur les consommateurs.

Fig 1.5 : Variation de la tension en fonction de la distance  $l$ .

- 1 Variation de la tension en régime normal
- 2 " " " " " de Court-Circuit en  $K_4$
- 3 " " " " " " " " " en  $K_3$
- 4 " " " " " " " " " en  $K_2$
- 5 Tout le réseau alimenté par  $G$  reste sans tension ( $K_1$ )

Ainsi dans le cas des moteurs synchrones les chutes de tension (plus de 30 %) diminuent sensiblement le couple moteur (qui est proportionnel au carré de la tension) et peuvent décrocher.

Pour limiter les effets néfastes de ces chutes, les générateurs sont équipés de régulateurs automatiques de tension (RAT) qui interviennent pour faire monter la tension à leurs bornes à sa valeur nominale. Nous constatons (Fig.1.5) que dans le cas des court-circuits éloignés (K4), le nombre de consommateurs sans tension est plus petit qu'en (K2) ; à la limite, aux bornes du générateur, tous les consommateurs alimentés par cette source restent sans tension.

#### 1-2-4. Hypothèses simplificatrices.

Les grands courants qui apparaissent pendant un court-circuit ont des effets néfastes sur les installations en amont du lieu du défaut ; ces dernières sont sollicitées thermiquement et dynamiquement. Ces effets peuvent être limités par une bonne étude des différents appareils qui composent l'installation ; en vue d'une protection appropriée qui permet la déconnexion rapide du circuit avarié. Puisque le calcul exact est difficile à réaliser, à cause de la complexité des processus électromagnétiques transitoires, on utilise en pratique des hypothèses simplificatrices qui ont l'avantage de réduire de beaucoup le volume de calcul sans pour autant donner de grandes erreurs. Ces hypothèses sont :

- les circuits magnétiques sont non saturés (donc linéaires)
- les courants de magnétisation des transformateurs sont négligeables.
- les capacités des lignes sont négligeables
- On ne tient pas compte des charges sauf pour les moteurs puissants qui sont près du point de défaut
- On néglige la résistance de l'arc du au court-circuit.

A vrai dire ces hypothèses dépendent du schéma étudié de sorte que les erreurs doivent rester dans une limite raisonnable, ainsi dans notre étude, nous tenons compte des valeurs des résistances des éléments . même si elles sont nulles.

D'une façon générale, les approximations utilisées dans le calcul dépendent de la précision des résultats demandés par exemple pour le choix et le dimensionnement des éléments de l'appareillage électrique on peut admettre des erreurs plus grandes, donc des approximations plus grandes, par contre pour certains cas, tel que le réglage des relais de protection, les calculs doivent être plus exacts et par conséquent les approximations utilisées sont plus réduites.

Bien entendu, nous avons fait en sorte, que le compromis " précision - complexité " soit traité d'une façon optimale.

Le plus souvent, en calculant le courant le court-circuit triphasé, (notre tâche se borne à ce cas) on peut négliger les phénomènes transversaux (ce qui revient à faire abstraction des courants qui passent dans ces dernières).

La méthode générale de calcul de  $I_{cc}$  consiste donc en :

- la composition du schéma équivalent du réseau
- le calcul des paramètres des éléments du schéma
- la transformation du réseau
- le calcul, de l'impédance équivalente entre la source et le point du défaut.
- La détermination du courant dans le point de court-circuit (et éventuellement dans les différentes branches du réseau)

#### 2-1 COMPOSITION DU SCHEMA EQUIVALENT.

- La composition du schéma et sa transformation s'effectuent selon les méthodes classiques de calcul des circuits électriques.

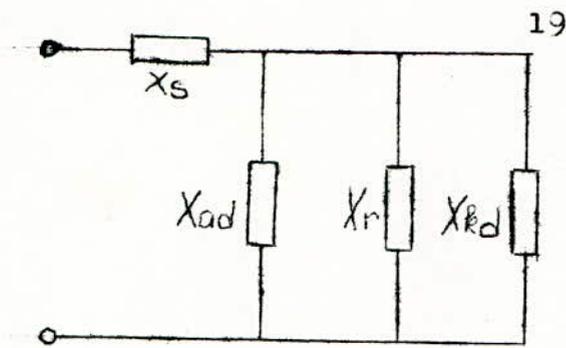
## 2-2 PARAMETRES ELECTRIQUES DES ELEMENTS DU SYSTEME ELECTRO-ENERGÉTIQUE.

### 2-2-1 La réactance des alternateurs.

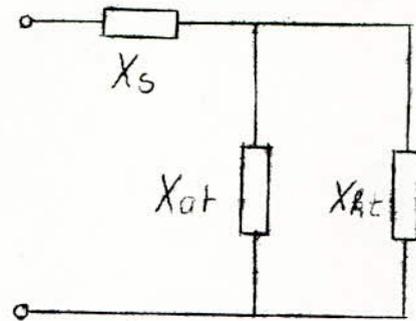
Les réactances qui interviennent dans le fonctionnement d'un alternateur ont des valeurs différentes suivant qu'il s'agit de phénomènes lents ou permanents, très rapides (1/10 de seconde) ou intermédiaires ; ces derniers mettent en jeu les réactances transitoires, les secondes les réactances subtransitoires, les régimes permanents - les réactances synchrones. Il faut distinguer les variations des composantes transversales du courant induit, celles de sa composante axiale, qui peuvent être provoquées par un changement brutal de la tension aux bornes ou de l'impédance du circuit de charge. Les variations du courant induit, en cas de perturbation, sont ainsi déterminées par les réactances de la machine suivant les deux axes ; la connaissance de ces réactances permet, en particulier, d'apprécier l'importance des courants de défauts en cas de court-circuit ou de marche en déséquilibre les réactances longitudinales fixent les changements d'amplitude du courant déviant. Dans ces derniers cas de fonctionnement, il y a lieu de considérer les réactances suivantes :

$X_d$	:	réactance	synchrone	longitudinale
$X'd$	:	"	transitoire	"
$X''d$	:	"	subtransitoire	"
$X''t$	:	"	"	transversale
$X_t$	:	"	synchrone	transversale.

En négligeant les résistances, on peut représenter par schéma de la (fig.2-1-a) le circuit équivalent de l'alternateur pour l'axe longitudinal et par le schéma de la (fig.2-1-b) celui de l'axe transversal (avec amortisseurs)



- Fig. 2-1-a -



- Fig. 2-1-b -

avec :  $X_d = X_s + X_{ad}$ .

$X_s$  étant la réactance de fuite de l'induit

$X_{ad}$  " " d'entrefer longitudinale

Dans la valeur de  $X'_d$ , les fuites du rotor ( $X$ ) interviennent, et dans celle de  $X''_d$ , il y a lieu de considérer  $X_s$  et les trois dérivations en parallèle  $X_{ad}$ ,  $X_r$  et  $X_{kd}$  pour les amortisseurs.

$$X_t = X_s + X_{kt} \quad (\text{entrefer transversal})$$

#### 2-2-1-1 Valeurs courantes des réactances à 50 Hz.

- Ces valeurs varient avec la tension, la polarité, le rapport de court-circuit. Elles peuvent être assujetties à certaines conditions de service de la machine (barres profondes d'amortisseurs, etc...)

En cas de saturation du circuit magnétique de la machine, il y a lieu de corriger les valeurs des réactances obtenus en régime de fonctionnement normal.

Généralement, on admet pour :

$X'_d$  un facteur de correction  $k = 0,85$  (rotors lisses)

$k = 0,92$  (pôles saillants)

et pour  $X''_d$  et  $X''_t$  :  $k = 1$  avec amortisseurs

$k = 0,88$  sans amortisseurs.

La valeur de la réactance utilisée dans notre projet est la valeur réduite subtransitoire, ou peut également ( $X = \frac{U}{I}$ ) s'exprimer en ohms, ou en centièmes ou (dans notre cas) en valeur réduite de  $X_n$ .

Tableau de quelques valeurs de  $X^*$ 

DESIGNATION	$X_s^*$	$X_d^*$	$X_t^*$	$X_d^{**}$	$X_d^{***}$	$X_t^{***}$
Rotor lisse 2 pôles	0,12	1,8	1,7	0,23	0,15	0,15
Rotor lisse 4 pôles	0,22	2,72	2,55	0,28	0,24	0,25
Pôles saillants 2MVA, BT, 4 pôles	0,09	1,45	0,85	0,2	0,125	0,125
7,5 MVA, 5 KV 10 pôles	0,095	1,2	0,63	0,3	0,135	0,13
70 MVA, 15KV, 40 pôles	0,105	0,7	0,44	0,21	0,135	0,135
Moteur synchrone 3600ch, 5KV, 10Pôles	0,14	1,02	0,58	0,35	0,2	0,190
Compensateur synchrone 22MVA, 11KV, 6 pôles	0,105	1,5	0,86	0,245	0,145	0,145

## Valeurs des réactances subtransitoires

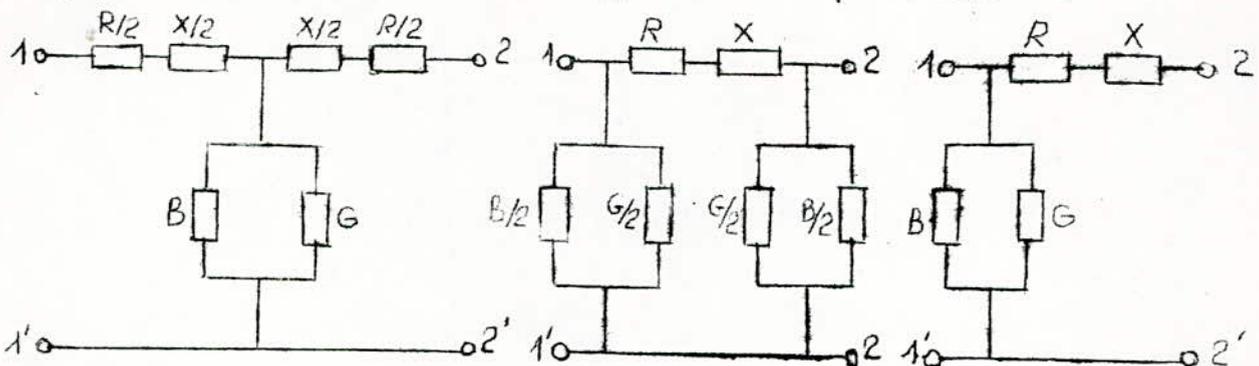
DESIGNATION	$X''$	$E''$
Turbo-alternateur	0,125	1,08
Hydro-alternateur	0,2	1,13
Moteur synchrone	0,2	1,10
Compensateur synchrone	0,2	1,20
Moteur asynchrone	0,2	0,90
Charge équivalente	0,35	0,85

## 2-2-2 Paramètres électriques des transformateurs.

## 2-2-2-1 Schémas équivalents des transformateurs.

- Pour représenter le transformateur comme une composante d'un réseau électrique, on déduit ses éléments à la même tension ainsi on trouve le schéma équivalent du transformateur, dans lequel existent seulement des liaisons galvaniques.

- Un transformateur peut être représenté par un schéma équivalent soit en T soit en  $\Pi$  soit en  $\Gamma$  (Fig.2-2)



- Fig.2.2.a -

(T)

- Fig.2.2.b -

 $(\Pi)$ 

- Fig.2.2.c -

 $(\Gamma)$

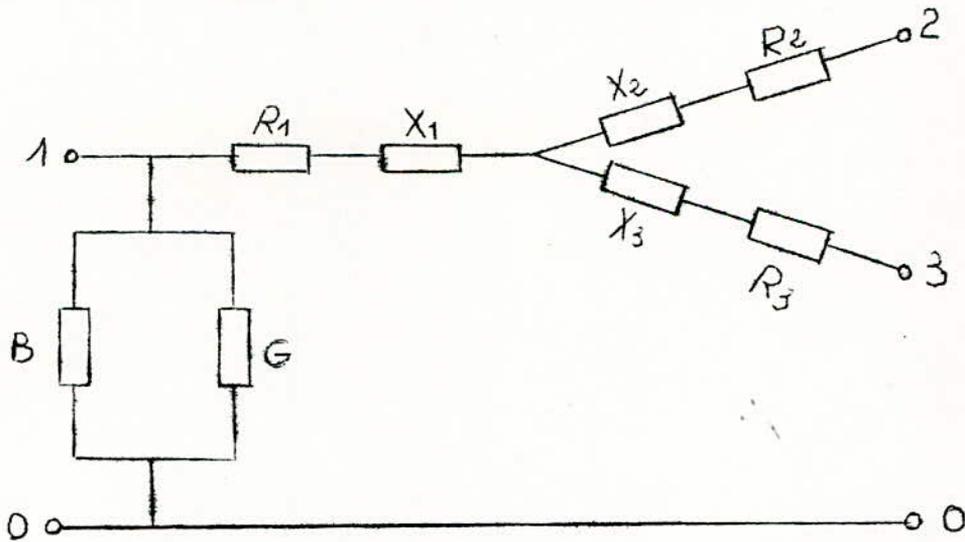
$$X_T = \frac{U_{HT}(\%) \times U_{HT}^2}{100 S_n}$$

Dans les schémas ci-dessus on a noté :

- R : la réactance des enroulements BT et HT réduits à la même tension en ( ohm/phase)
  - X : la réactance des enroulements BT et HT réduits à la même tension en (ohm/phase)
  - G : la conductance due aux pertes actives en fer (S/phase)
  - B : la susceptance inductive due aux pertes de puissance réactive par des courants de magnétisation (S/phase)
- B et G sont négligeables dans notre étude.

Bien que les schémas en T et en  $\Pi$  soient plus exacts, le schéma en  $\Gamma$  est le plus utilisé pour simplifier les calculs car les erreurs sont faibles.

Les transformateurs à trois enroulement peuvent être représentés par le schéma ci-dessus (Fig.2-3)



~~30 kVA - Fig.2-3 -~~  $S_b = 100 \text{ kVA}$   
 $U_b = 300 \text{ V}$

ou tous les éléments sont réduits à la même tension

Remarque : On peut assimiler un transformateur à trois enroulement à deux transformateurs simples.

2-2-2-2 Paramètres électriques.

En ce qui nous concerne, le schéma équivalent du transformateur est bien définie si on connaît les valeurs suivantes :

- $S_n$  (VA, KVA, MVA) : la puissance apparente
- $U_n$  (V, KV) : la tension composée nominale
- $P_{cu}$  (W, KW, MW) : les pertes cuivres en court-circuit
- $U_{cc}$  (%) : la tension de court-circuit.

a) La résistance.

En régime de court-circuit, la puissance absorbée est dissipée par effet Joule-Lentz :

$$P_{cu} = 3.R. I_n^2 = 3.R. \left( \frac{S_n}{3U_n} \right)^2 = \frac{S_n^2}{U_n^2} . R$$

$$d'où : \boxed{R (\Omega) = \frac{P_{cu} (KW) . U_n^2 (KV) . 10^3}{S_n^2 (KVA)}}$$

b) La réactance.

A cause du fait que la tension est réduite en court-circuit la f.e.m est pratiquement nulle, la réactance du transformateur est juste la réactance de fuite et on a :

$$U_{cc} (\%) = \sqrt{(U_r \%)^2 + (U_x \%)^2}$$

$$d'où : U_x (\%) = \sqrt{(U_{cc} \%)^2 - (U_r \%)^2}$$

nous avons également :

$$U_{cc} (\%) = \frac{U_{cc}}{U_n} \cdot 100 \text{ (plaque signalétique)}$$

$$U_r (\%) = \frac{U_r}{U_n} \cdot 100 = \frac{3 \cdot I_n \cdot R}{U_n} \cdot 100 = \frac{3 I_n \cdot 3 I_n \cdot R}{3 I_n \cdot U_n} \cdot 100$$

$$= \frac{3 I_n^2 \cdot R}{S_n} = P_{cu} (\%)$$

$$U_x (\%) = \frac{3 I_n \cdot X}{U_n} \cdot 100 \text{ d'où :}$$

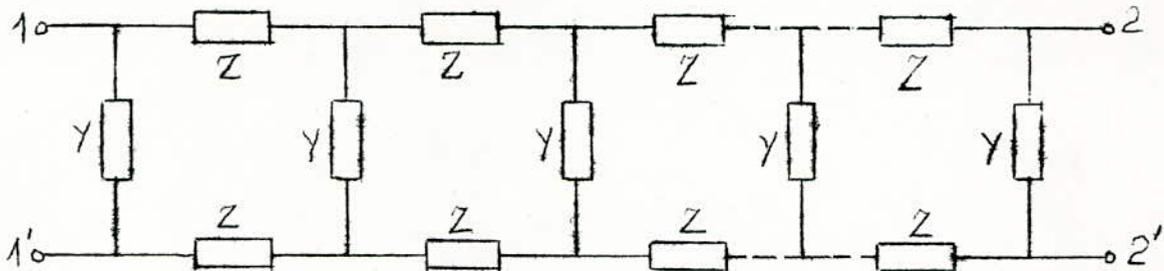
$$X (\Omega) = 10 \cdot \frac{U_{cc} (\%) \cdot U_n^2 (\text{Kv})}{S_n (\text{KVA})}$$

$$X = 10 \cdot \frac{U_{cc} (\%) \cdot U_n^2}{S_n}$$

### 2-2-3 Caractéristiques des lignes.

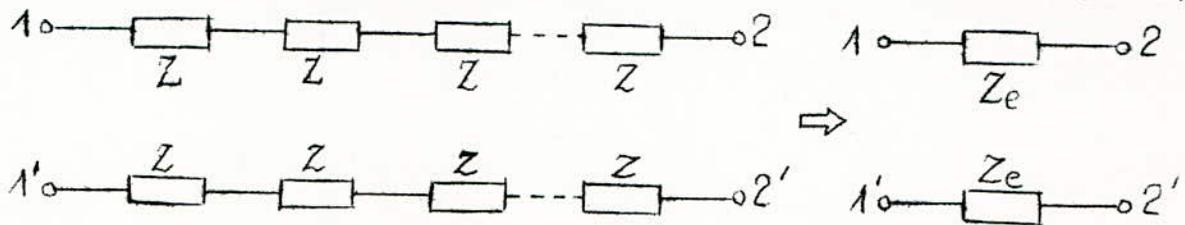
#### 2-2-3-1 Circuit à constantes réparties.

Un circuit à constantes réparties est un circuit de longueur finie dont tout élément, si petit soit il donne lieu à la fois à une variation de tension dans le sens longitudinal et à une dérivation dans le sens transversal (Fig.2-4)



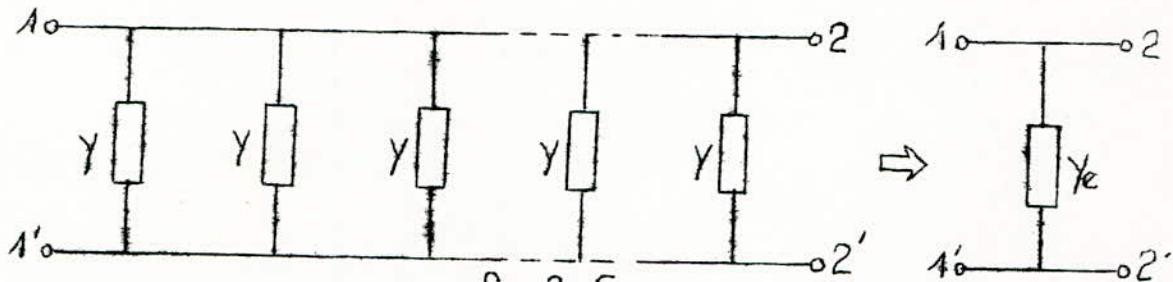
- fig. 2-4 -

Un circuit est un quadripôle, théoriquement tout circuit réel est à constantes réparties, mais en pratique, il arrive souvent qu'on soit en droit de négliger, soit les dériviatives des courants transversaux, par rapport au courant total longitudinal (Fig. 2-5)



- Fig. 2-5 -

Soit les variations des tensions longitudinales par rapport à la différence de potentiel entre conducteurs du réseau (Fig. 2-6)



- Fig. 2-6 -

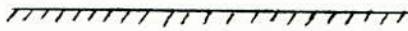
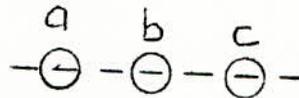
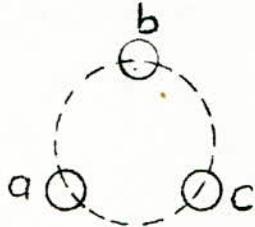
Ainsi dans ces cas on dit que le circuit est ponctuel ou a constantes localisées.

- Dans le cas d'un circuit bifilaire symétrique, et homogène, on peut attribuer les constantes lineiques (caractéristiques par unité de longueur) à chacun des conducteurs dans ce cas la résistance spécifique et l'inductance propre correspondantes à la moitié du flux total, sont égales à la moitié des valeurs du circuit.

Bien entendu, on tient compte implicitement de la présence de l'autre conducteur.

- Un circuit multifilaire symétrique est un circuit dont les conducteurs présentent tant entre eux que par rapport au sol ou tout autre conducteur au potentiel du sol, une symétrie géométrique parfaite. Cette symétrie est réalisable lorsqu'il s'agit d'un câble souterrain à plusieurs conducteurs disposés au sommet d'un polygone régulier.

Pour ce qui est des lignes aériennes, la symétrie complète est irréalisable on peut obtenir une symétrie de conducteurs entre eux mais pas par rapport au sol (Fig.2-7.a) comme on peut avoir une symétrie par rapport au sol mais non entre les conducteurs (Fig.2-7.b)

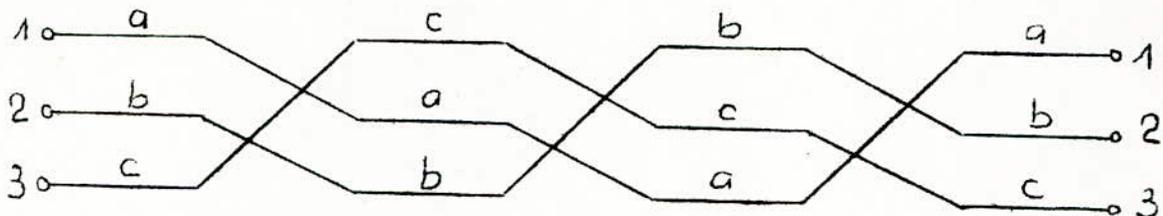


-fig.2-7.a-



-fig.2-7.b-

Cependant dans l'un et l'autre cas, la symétrie peut être réalisée artificiellement au point de vue électrique et magnétique en transposant régulièrement les conducteurs par permutation circulaire à des intervalles réguliers le long de la ligne (Fig.2-8)



-fig-2-8-

2-2-3-2 Résistance.

$$R (\Omega) = \frac{\rho L}{S}$$

- $\rho$  ( $\Omega/\text{m} \cdot \text{mm}^2$ ) : résistivité du conducteur  
 $L$  (m) : longueur du conducteur  
 $S$  ( $\text{mm}^2$ ) : section du conducteur

Remarque : Pour les conducteurs multifilaires, la longueur des fils (brins) disposés en hélices est supérieure et légèrement majorée (2 à 4 %) on utilise pour le calcul la section ovalisée ;

- $\rho$  est donnée à 20° C
- En alternatif, la résistance est majorée par skin-effect auquel vient s'ajouter parfois l'effet de proximité pour les câbles souterrains ayant des sections supérieures à 600  $\text{mm}^2$ .

2-2-3-3 Réactance

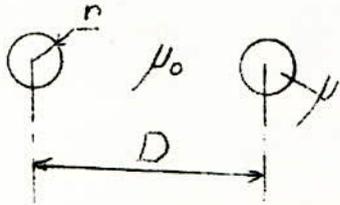
Pour une ligne électrique, la réactance d'une phase pour un km de longueur est :

$$X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

Où  $L$  : inductance pour un km.

Ainsi le calcul de la réactance revient à celui de l'inductance.

a) Inductance d'une ligne monophasée.



Pour établir la formule de l'inductance d'un conducteur d'une ligne monophasée on doit calculer l'encerclement du flux d'un conducteur de la ligne, lorsque les deux conducteurs de rayon et d'écartement  $D$  sont parcourus par des courants égaux et de sens opposés ; ceci donne :

teurs de rayon et d'écartement  $D$  sont parcourus par des courants égaux et de sens opposés ; ceci donne :

$$\begin{aligned}\Psi &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{R_\infty}{r} + \frac{1}{4} \frac{\mu}{\mu_0} - \ln \frac{R_\infty}{D} \right) \cdot i \\ &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{D}{r} + \frac{1}{4} \frac{\mu}{\mu_0} \right) \cdot i\end{aligned}$$

$$L = \frac{\Psi}{i} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{1}{4} \mu_r + \ln \frac{D}{r} \right)$$

Avec :  $\mu_r = \mu / \mu_0$

Dans un milieu non magnétique, en prenant :  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$

$$L = \left( 0,5 + 4,6 \log \frac{D}{r} \right) 10^{-4} \text{ H/km.}$$

Ou :

$$L = 4,6 \log \frac{D}{r'} \cdot 10^{-4} \text{ H/km.}$$

Avec  $r'$  : rayon géométrique équivalent du conducteur par rapport à lui même.

Pour les conducteurs cylindriques homogènes,  $r' = 0,7994 \cdot r$

Pour les câbles,  $r'$  dépend du nombre de brins identiques que comporte le conducteur.

Nombre de Brins	Nombre de couches autour du conducteur central	$r'$
3	-	0,678.r
7	1	0,725.r
19	2	0,725.r
37	3	0,768.r
61	4	0,772.r
91	5	0,774.r
127	6	0,775.r

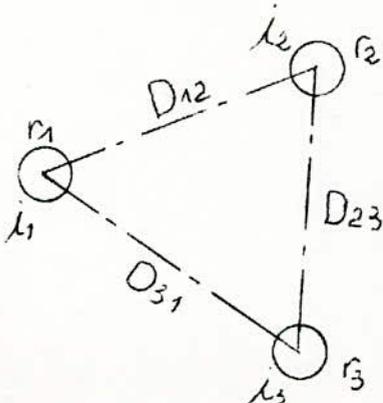
Remarque : Dans le cas des conducteurs AL - AC qui comportent une âme d'acier  $r' = 0,95r$ .

Si on appelle  $L_1$  le coefficient de self-induction propre du conducteur 1, supposé seul, et  $m_{12}$  le coefficient d'induction mutuelle, entre les deux conducteurs, le flux total émis à travers le conducteur 1 a pour expression.

$$\Psi = (L_1 \cdot i_1 + m_{12} \cdot i_2) = (L_1 - m_{12}) \cdot i ; i_2 = -i_1$$

$$L = L_1 - M_{12}$$

b) inductance d'une ligne triphasée (cas général)



Cherchons l'encerclement du flux autour du conducteur 1 depuis son axe jusqu'à une distance  $R_\infty \gg D$ .

$$\Psi_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ i_1 \left( 0,5 + 2 \ln \frac{1}{r_1} \right) + i_2 \cdot 2 \ln \frac{1}{D_{12}} + i_3 \cdot \ln \frac{1}{D_{13}} + (i_1 + i_2 + i_3) 2 \ln R_\infty \right]$$

En régime normal  $i_1 + i_2 + i_3 = 0$

$$\Psi_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ i_1 \left( 0,5 + 2 \ln \frac{1}{r_1} \right) + i_2 \cdot 2 \ln \frac{1}{D_{12}} + i_3 \cdot 2 \ln \frac{1}{D_{13}} \right]$$

$$\Psi_1 = L_{11} \cdot i_1 + m_{12} \cdot i_2 + m_{13} \cdot i_3$$

$$\Psi_2 = m_{21} \cdot i_1 + L_{22} \cdot i_2 + m_{23} \cdot i_3$$

$$\Psi_3 = m_{31} \cdot i_1 + m_{32} \cdot i_2 + L_{33} \cdot i_3$$

$$L_{ii} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( 0,5 + 2 \ln \frac{1}{r_i} \right)$$

$$m_{ik} = \frac{1}{4} 2 \cdot \ln \frac{1}{D_{ik}}$$

c) Cas d'une ligne t'iphase symétrique

$$r_1 = r_2 = r_3 ; D_{12} = D_{23} = D_{13} = D$$

$$\Psi_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ i_1 \left( 0,5 + 2 \ln \frac{1}{r} \right) + (i_2 + i_3) 2 \ln \frac{1}{D} \right]$$

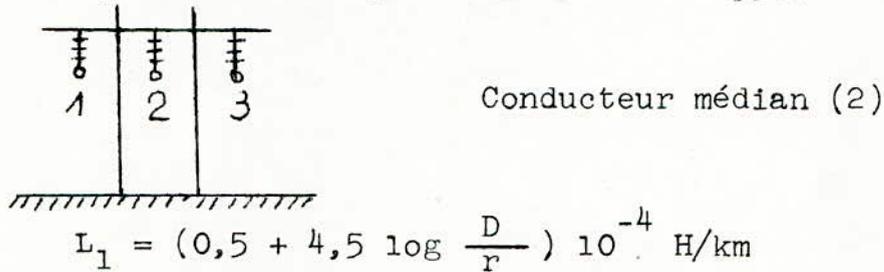
$$i_2 + i_3 = -i_1$$

$$\Psi_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( 0,5 + 2 \ln \frac{D}{r} \right) i_1$$

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( 0,5 + 4,6 \log \frac{D}{r} \right) 10^{-4} \text{ H/km}$$

$$L_1 = L_2 = L_3 = L$$

c) Cas d'une ligne triphasée en nappe.



Pour les conducteurs médians on a :

$$\Psi_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ i_1 (0,5 + 2 \ln \frac{1}{r}) + i_2 \cdot 2 \ln \frac{1}{D} + i_3 \cdot \ln \frac{1}{2 \cdot D} \right]$$

Cette expression n'étant pas proportionnelle à  $i_1$  donc impossible de définir l'inductance de ces conducteurs extrêmes.

d) Ligne triphasée dissymétrique transposée

La transposition ne modifie pas les coefficients  $L_{ii}$  puisqu'ils sont indépendants de  $D$ . Mais modifie  $m_{ik}$ .

$$\text{Pour le cond 1 : } \Psi_1 = i_1 \cdot L_{11} + i_2 \frac{m_{12} + m_{23} + m_{13}}{3} + i_3 \frac{m_{12} + m_{23} + m_{13}}{3}$$

$$\Psi_1 = i_1 \left[ L_{11} - \frac{m_{12} + m_{23} + m_{13}}{3} \right]$$

$$\frac{\mu_0 \cdot 2}{4\pi \cdot 3} \left( \ln \frac{1}{D_{12}} + \ln \frac{1}{D_{23}} + \ln \frac{1}{D_{31}} \right) = \frac{2}{4} \ln \frac{1}{\sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}}$$

$$\text{Car } m_{ik} = \frac{\mu_0}{4\pi} 2 \ln \frac{1}{D_{ik}}$$

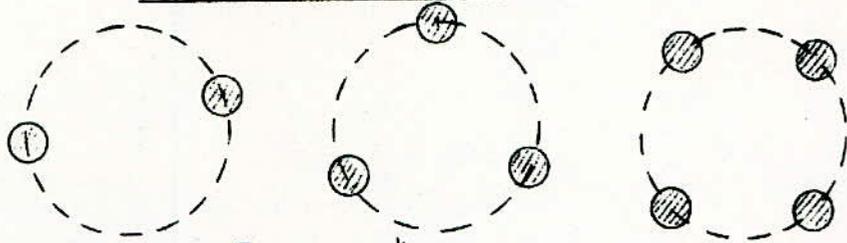
En posant  $D = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{13}}$

$$L_1 = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} (0,5 + 21 \ln \frac{D}{r}) = (0,5 + 4,6 \log \frac{D}{r}) 10^{-4}.$$

e) Double circuit triphasée équilibré dissymétrique.

$$L = 4,6 \log D' \frac{\sqrt{d_1' \cdot d_2'}}{r' \cdot d_3'} 10^{-4} \text{ H/km}$$

f) Ligne en faisceaux



$$L = (0,5 + 4,6 \log \frac{D}{r'}) 10^{-4} \text{ H/km.}$$

$$r' = \sqrt[n]{r \cdot D_m^{n-1}}$$

## Constantes électriques des lignes

U (KV)	30	63 90	150	225	380
S (mm <sup>2</sup> ). AL-AC	54	228	301	411	1039
Diamètre (mm)	9,6	19,5	22,5	26,4	42
D (m)	2	50,4	5,63	7,1	13,94
h (m)	7	15	22	22	26
R <sub>0</sub> ( /km)	0,616	0,158	0,131	0,033	0,034
X <sub>0</sub> ( /km)	0,395	0,392	0,405	0,416	0,424

## 2-3 LES PARAMETRES EN GRANDEURS REDUITES

Souvent, au lieu d'utiliser les valeurs des impédances en ohms, il est avantageux de les exprimer en valeurs réduites en prenant certaines valeurs de la tension et de la puissance pour valeur de base.

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

Les grandeurs de bases se notent avec une étoile

$$S_b = \frac{S^*}{S_b} ; U_b^* = \frac{U}{U_b} ; E_b^* = \frac{E}{E_b} ; I_b^* = \frac{I}{I_b} ; Z_b^* = \frac{Z}{Z_b}$$

L'impédance de base réduite peut être déterminée aussi avec les relations :

$$Z_b^* = \frac{Z \cdot \sqrt{3} \cdot I_b}{U_b} ; \boxed{Z_b^* = Z \frac{S_b}{U_b^2}}$$

La dernière formule est utilisée beaucoup, parce que habituellement on choisit  $S_b$  et  $U_b$  (notre **bas**)

Avec  $Z$  en ohm,  $I_b$  en KA ;  $U_b$  en KV ;  $S_b$  en MVA

Si les impédances des éléments (telles que des générateurs des transformateurs, des réacteurs) sont connues pour les conditions nominales, on a pour les conditions de base.

$$Z^* = Z_n^* \cdot \frac{I_b}{I_n} \quad \frac{U_n}{U_b} = Z_n^* \cdot \frac{S_b}{S_n} \cdot \frac{U_n^2}{U_b^2}$$

Souvent on choisit  $U_b = U_n$   $Z^* = Z_n^* \cdot \frac{S_b}{S_n}$

Le passage des grandeurs réduites ( de base ou nominales) au grandeurs absolues se fait facilement à l'aide des relations.

$$S = S_b \cdot S_b \quad \text{ou} \quad S = S_n \cdot S_n \quad \text{ect...}$$

Parfois les grandeurs sont données en pourcentage la relation avec les grandeurs réduites de base et simple.

$$Z \% = 100 \frac{Z}{Z_b} = 100 Z_n^* \quad \text{ect...}$$

#### 2-4 CALCUL DE I<sub>cc</sub>

Ayant calculé l'impédance équivalente réduite  $Z_e^*$  entre le point de court circuit et la source, (ou le système) on calcule :

$I_{cc} = \frac{S_b}{\sqrt{3} Z_e^* U_b} \quad \text{si } Z_e^* > 3$
$I_{cc} = I_{cc}^* \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot U_b} \quad \text{si } Z_e^* \leq 3$

$I_{cc}^*$  étant la composante périodique réduite du courant de court circuit triphasée donnée par les courts de calcul.

Remarque à l'instant  $t = 0$ ,  $I_{cc}'' = U/Z_e''$

La valeur maximale du courant de choc peut être déterminée par la formule.

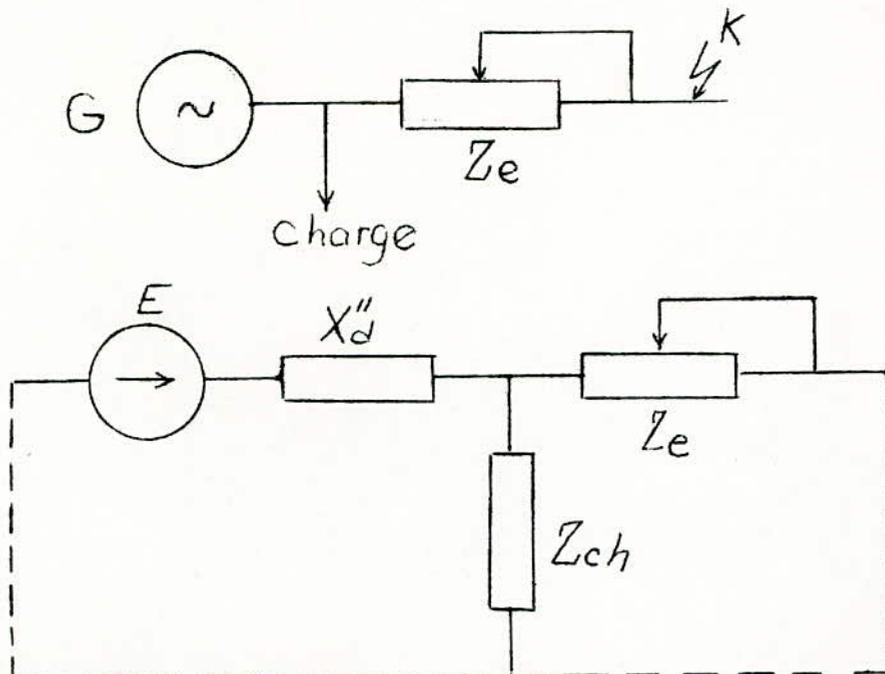
$$I_{ch} = K_{ch} \sqrt{2} I_{cc}''$$

#### 2-4-1 Méthode des courbes de calcul

Si le problème est limité par une détermination du courant de court-circuit dans un point de défaut. La méthode pratique est suffisamment précise est celle des courbes de calcul.

Cette méthode est fondée sur l'emploi des courbes qui donnent une valeur de la composante périodique du courant de court circuit en fonction de l'impédance résultante pour différents instants de court-circuit.

Le schéma pour laquelle la construction des courbes à été faite est représenté sur la fig(2-9)



- fig. 2.9 -

On considère que l'instant de court-circuit, l'alternateur fonctionne avec une charge nominale et  $\cos \varphi = 0,8$ . La charge est représentée par l'impédance.

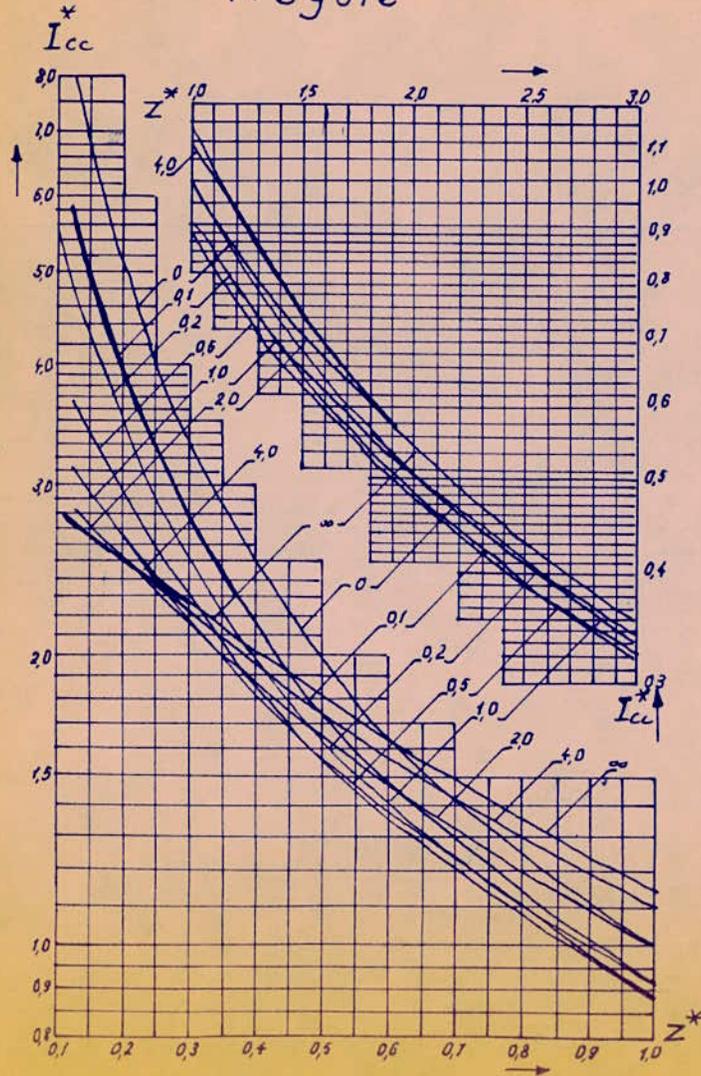
$$Z_{ch} = 0,8 + j 0,6$$

Les courbes pour différents types d'alternateurs sont représentées en (Fig.2-10) et (Fig.2-11).

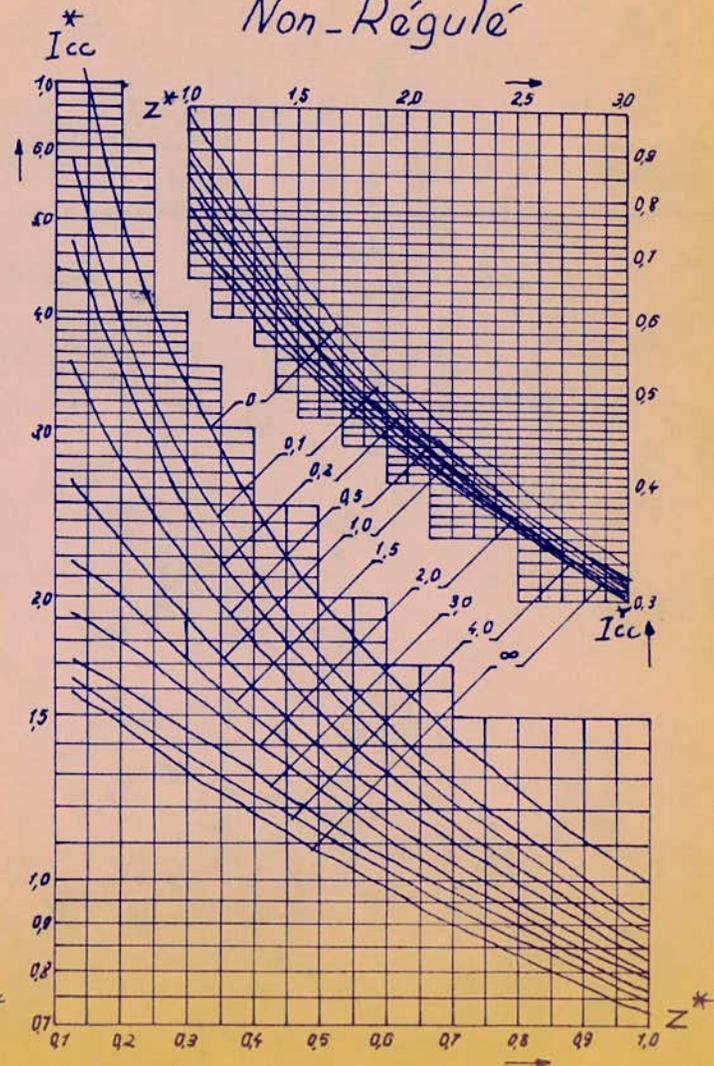
Remarque: en principe les courbes de calcul sont données par le constructeur de chaque type de machine.

# Courbes de Calcul d'un Turbo-Alternateur

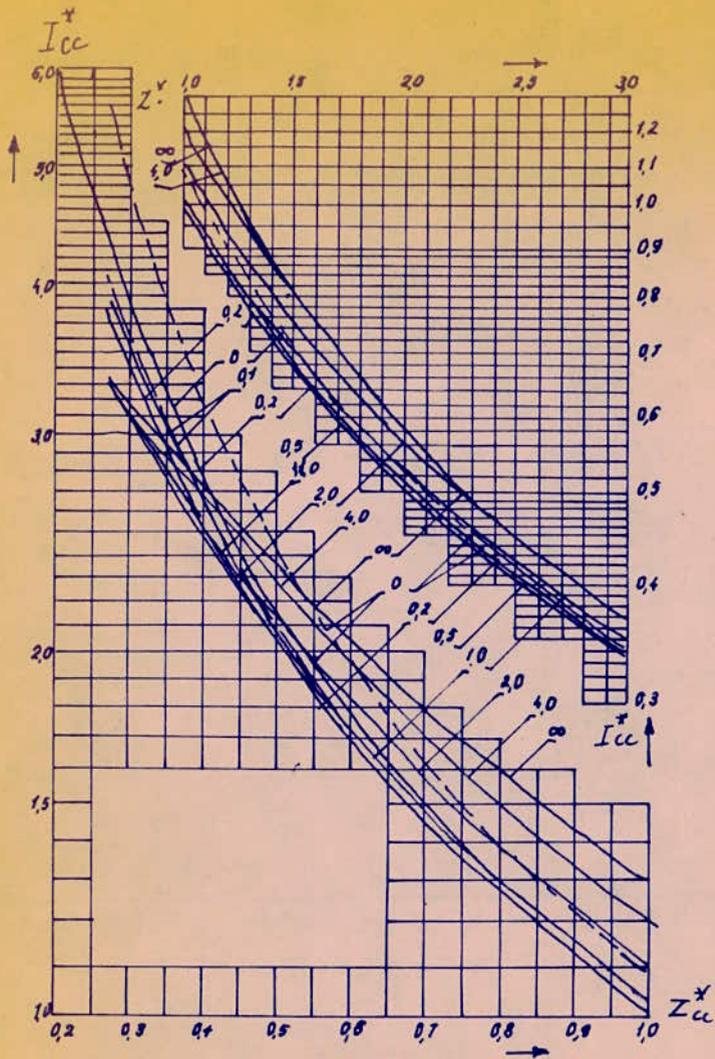
Régulé



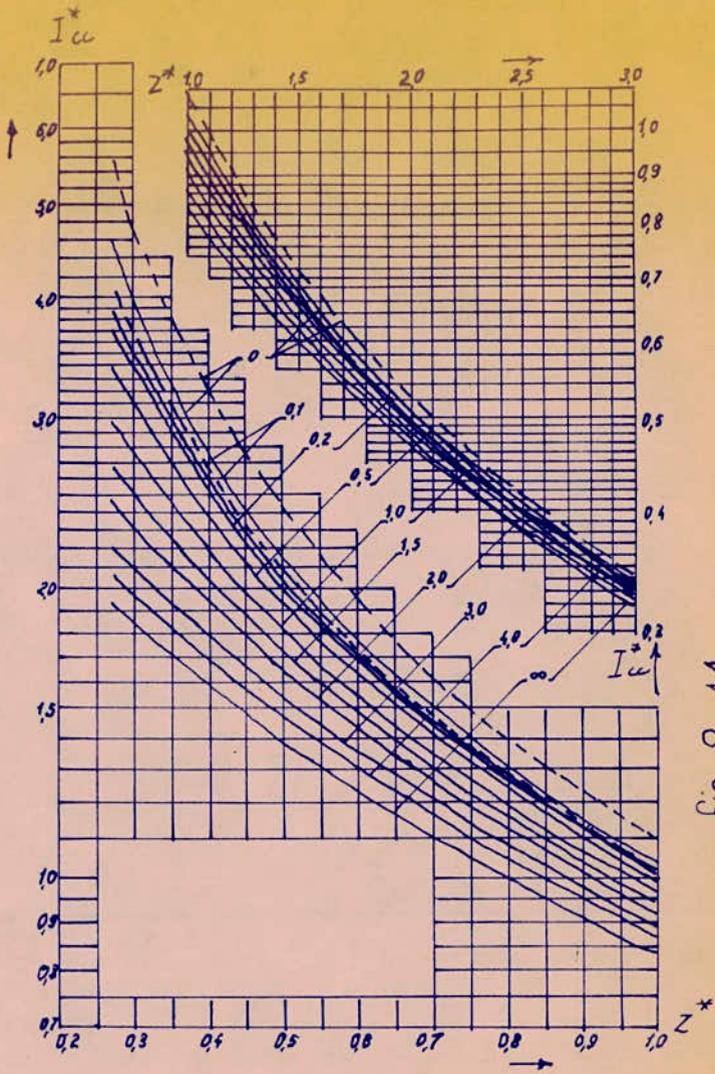
Non-Régulé



- Fig. 2-10 -



Régulé



Non-Régulé

Courbes de Calcul d'un Hydro-Alternateur

- fig. 2.11 -

-- METHODE DE CALCUL DU COURANT DE COURT-CIRCUIT --

Nous nous proposons d'établir un programme de calcul simple, économique, optimal ou d'une façon générale rentable pour l'utilisateur, et surtout aisément accessible à un grand nombre de machines disponibles et programmables en FORTRAN ou tout autre langage scientifique évolué.

- Pour que le programme réponde à toutes ces contraintes, il nous faut établir un algorithme aussi simple que général.

La méthode de base se résume comme suit :

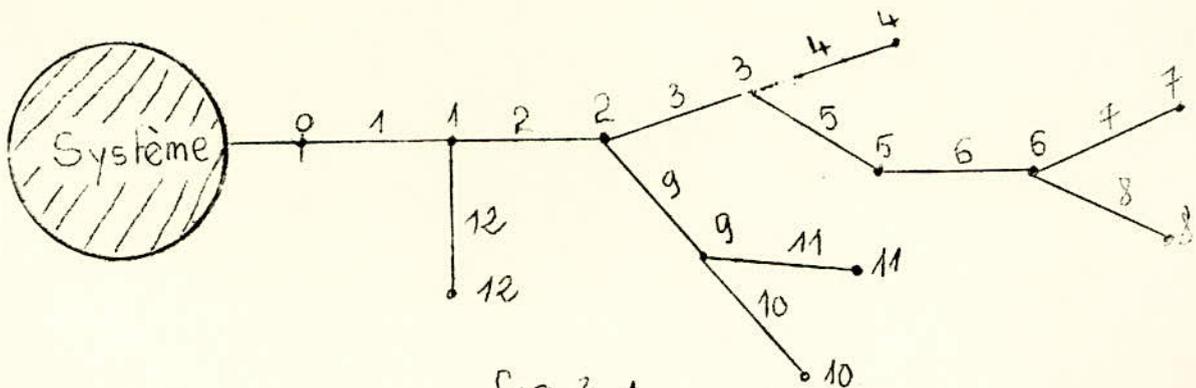
3-1-1 Connaissance de toutes les données nécessaires au calcul à partir du schéma électrique du réseau :

- Détermination de la matrice topologique du réseau le codage des noeuds et des branches se fait comme suit :

Les noeuds varient de 0 à n

Les branches varient de 1 à n

Chaque branche précède le noeud du même numéro (Fig.3-1)



- Fig.3-1 -

- La puissance nominale de la source (ou du système) :  $S_s$  en MVA ou la puissance de court-circuit si le réseau part d'un poste :  $S_{cc}$  en MVA.

- La puissance de base  $S_b$  en MVA.

- L'impédance (ou la réactance) transitoire réduite de la source  $X''$  si le réseau part d'une centrale.

- L'impédance réduite directe du système si le réseau part d'un poste.

- Les niveaux de tensions pour chaque noeud du réseau.

- Enfin toutes les caractéristiques des éléments qui composent ou doivent composer le réseau.

3-1-2 Calcul des éléments du réseau en valeurs réduites à la puissance de base, laquelle pour notre modèle doit être égale à la puissance nominale de la source pour pouvoir utiliser des courbes de calcul si les impédances directes réduites sont inférieures à 3 ( $Z_d < 3$ )

3-1-2-1 LA REACTANCE REDUITE DE LA SOURCE OU DU SYSTEME

$$X_s^* = X_n^* \frac{S_b}{S_s} \quad R_s^* = 0$$

avec  $X_n^* = 1$  pour  $S_s = S_{cc}$  (Système).

$X_n^* = \{0,1 \div 0,2\}$  pour  $S_s = S_n = S_b$  (Source)

Remarque : Dans notre programme par raison de commodité, nous employons la même notations Ss pour "Sn et Scc"

### 3-1-2-2 Impédance réduite du transformateur

$$X_{tr}^* = \frac{U_{cc} \% S_b}{100 S_{tr}} ; R_{tr}^* = \frac{DP_{cc} S_b}{(S_{tr})^2}$$

$$Z_{tr}^* = \sqrt{(X_{tr}^*)^2 + (R_{tr}^*)^2}$$

avec :  $U_{cc} \%$  : tension de court-circuit en % du transformateur  
 $DP_{cc}$  : pertes dans le cuivre en MW  
 $S_{tr}$  : puissance du transformateur en MVA

### 3-1-2-3 Impédance réduite du réactor

$$X_r^* = \frac{X_r \cdot S_b}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot I_{nr} \cdot U_r} ; R_r^* = 0$$

avec  $X_r$  : réactance en %  
 $I_{nr}$  : courant nominal du réactor en KA

### 3-1-2-4 Impédance réduite de la ligne (ou câble)

$$X_l^* = \frac{X_o \cdot L \cdot S_b}{(U_l)^2} ; R_l^* = \frac{R_o \cdot L \cdot S_b}{(U_l)^2}$$

$$Z_l^* = \sqrt{(X_l^*)^2 + (R_l^*)^2}$$

avec  $X_o$  : réactance spécifique de la ligne en  $\Omega/km$   
 $R_o$  : résistance spécifique de la ligne en  $\Omega/km$   
 $L$  : longueur de la ligne en km  
 $U_l$  : tension de la ligne en KV

### 3-1-3 Calcul de l'impédance réduite équivalente entre la source et le point de court-circuit

En réalité nous calculons le module de l'impédance équivalente formé de la partie réelle ( $R_e^*$ ) et de la partie imaginaire ( $X_e^*$ )

$$Z_e^* = \sqrt{(R_e^*)^2 + (X_e^*)^2}$$

- S'il y a des moteurs synchrones puissants (par rapport à la puissance du système) nous aurons

$$X_m^* = 0,2 \frac{S_b}{S_s} \quad \text{et} \quad R_m^* = 0 \quad Z_m^* = X_m^*$$

$$R_e'^* = R \left( Z_m^* // Z_e^* \right) \quad X_e'^* = (Z_m^* // Z_e^*)$$

$$Z_e'^* = \sqrt{(R_e'^*)^2 + (X_e'^*)^2}$$

### 3-1-4 Calcul du Courant de court-circuit triphasé

nous testons  $Z_e^*$  par rapport à 3

si  $Z_e^* > 3$  nous aurons directement

$$I_{cc} = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot Z_e^* \cdot U_b} \quad (\text{en KA})$$

si  $Z_e^* \leq 3$  nous devons calculer  $I_{cc}$  à l'aide des courbes de calcul car :

$$I_{cc} = f(t, Z_e^*)$$

### 3-1-4-1 Méthode des courbes de calcul.

Sous-

Nous devons établir un programme qui nous permet de déterminer avec une assez bonne précision les courants de court-circuits symétriques pour différentes valeurs de temps  $t$ .

Cependant nous avons retenu 3 valeurs qui nous semblent être les plus importantes pour le besoin de l'utilisation; à savoir:

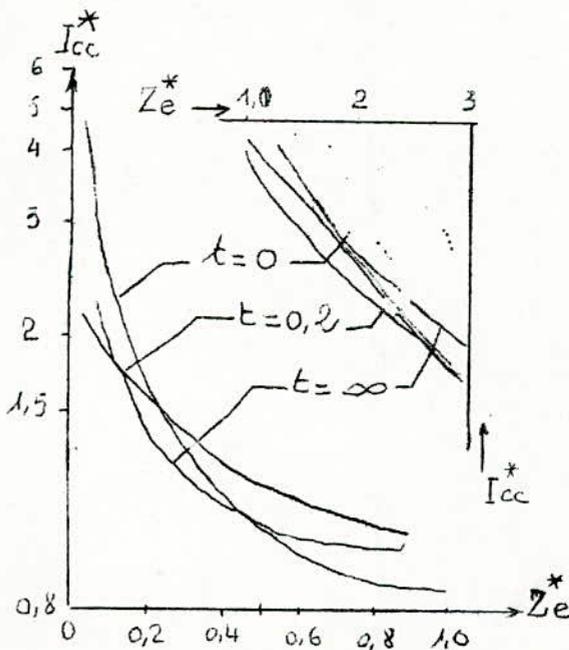
$t = 0$  sec: début du défaut

$t = 0,2$  sec: temps du déclenchement du disjoncteur

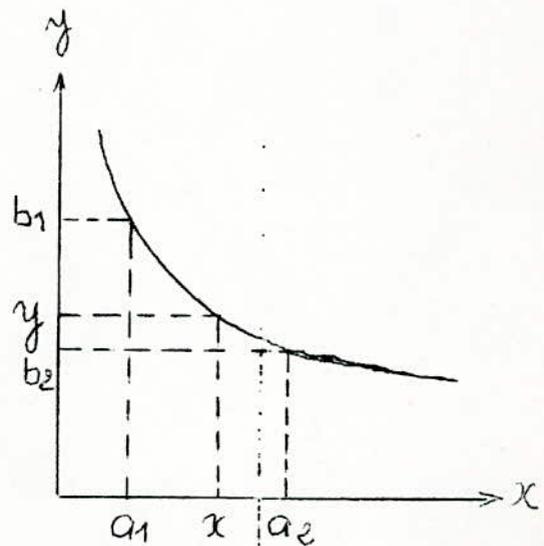
$t = \infty$  : temps au bout duquel le régime de court-circuit devient permanent.

Toute fois, il faut noter que l'on peut prendre beaucoup de valeurs de  $t$  tout en veillant à rester dans une limite raisonnable pour ne pas trop encombrer la mémoire de la machine.

- A partir des courbes  $I_{cc}^* = f(t, Z_e^*)$  (fig.3-2) nous avons relevés 30 points de  $Z_e^*$  variants (de 0,1 à 3,0), par courbe pour un turbo-alternateur régulé et la même chose pour un hydro-alternateur régulé.



- fig.3-2 -



- fig.3-3 -

- nous avons pour n'importe quelle abscisse  $x$ ,  $Z_e^*$  (Fig.3-3) nous appliquons la formule simple d'interpolation linéaire

$$y = b_1 + \frac{b_2 - b_1}{a_2 - a_1} (x - a_1)$$

d'une façon générale.

$$y = b_i + \frac{b_{i+1} - b_i}{a_{i+1} - a_i} (x - a_i)$$

si  $a_{i+1} - a_i = \text{cste} = h$  (ce qui est notre cas)

$$y = b_i + \frac{b_{i+1} - b_i}{h} (x - a_i)$$

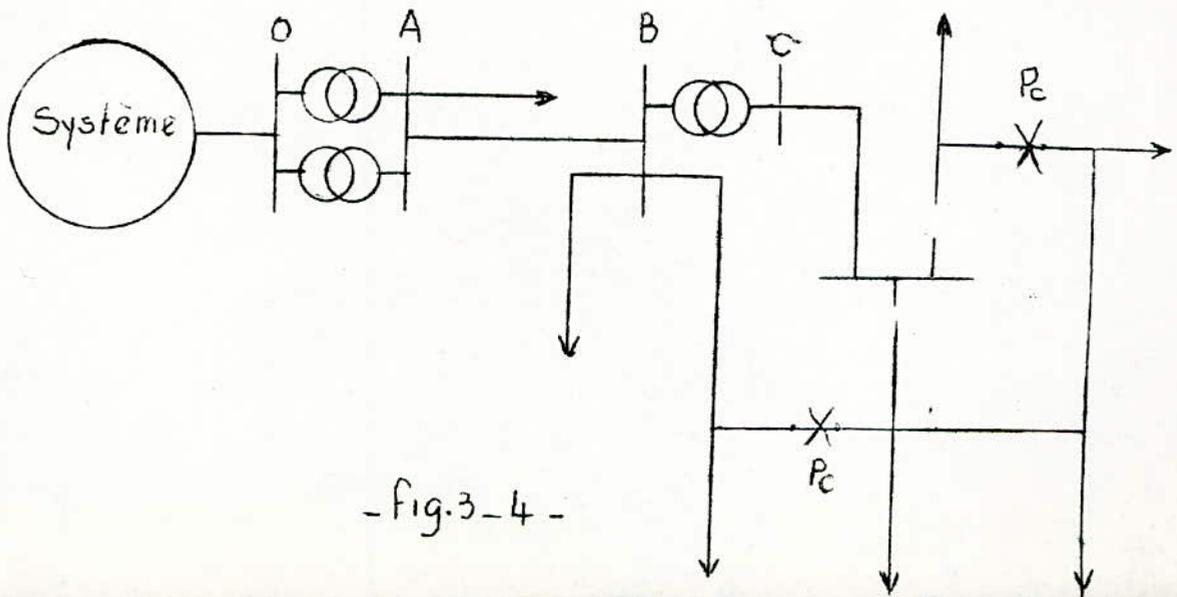
Nous avons pris  $h = 0,1$

### 3-2 PRESENTATION TOPOLOGIQUE DU RESEAU RADIAL

#### 3-2-1 Détermination du schéma électrique du réseau.

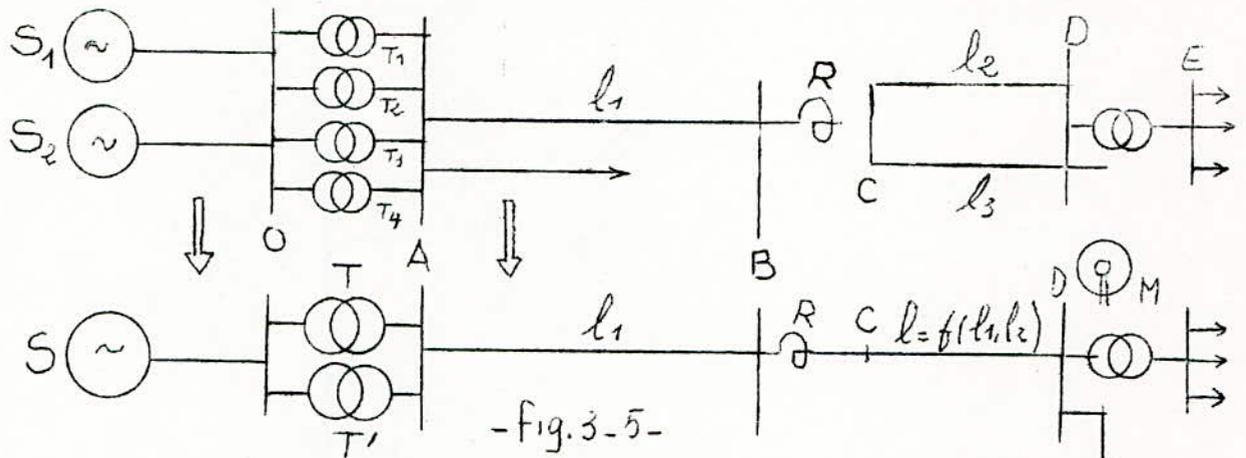
Tout d'abord, nous déterminons le schéma électrique complet du réseau à étudier.

- si le réseau est radial bouclable, il faut mettre en évidence les points de coupures (Fig.3-4)



- fig.3-4 -

- si le réseau présente des boucles évidentes et simples (2 branches en parallèles par exemple) nous devons précalculer la résistance et la réactance de la branche équivalente (Fig.3-5)

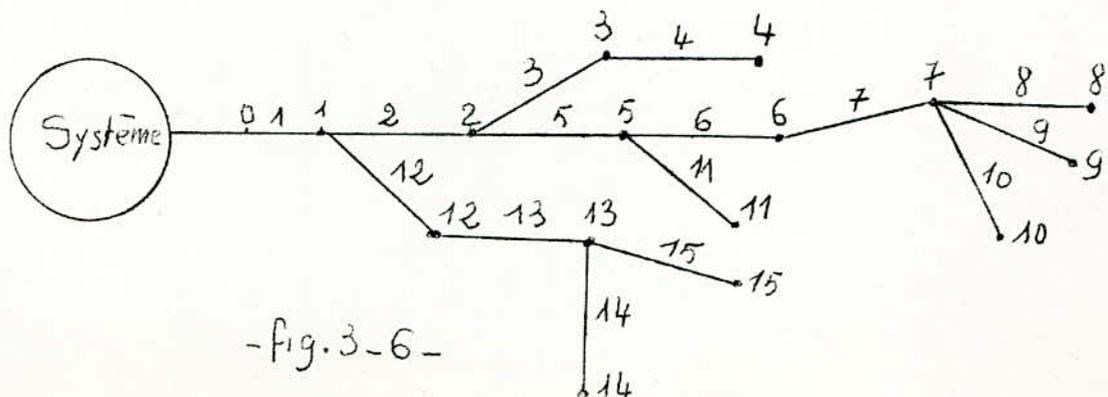


Remarque : nous prévoyons dans le programme de calcul l'éventualité de la présence de deux groupes de transformateurs chaque groupe possède des caractéristiques identiques.

ex :  $\left. \begin{array}{l} T1 \equiv T3 \\ T2 \equiv T4 \end{array} \right\} \longrightarrow T = f(T1; T3), T' = f(T2; T4)$

### 3-2-2 Schéma topologique du réseau.

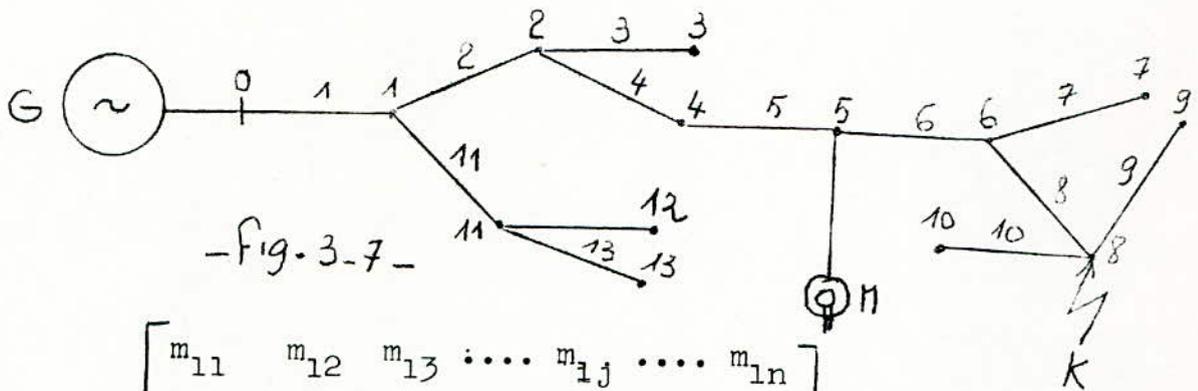
Ensuite, nous construisons à partir du schéma électrique, le schéma topologique (structure en arbre), pour cela nous devons connaître ou prévoir tous les points ou nœuds pour lesquels nous calculons le courant de court-circuit les nœuds sont numérotés de 0 à n et les branches de 1 à n le courant ou la puissance de court-circuit du nœud d'origine "0" étant supposé connu (Fig.3-6)



Remarque : Dans notre étude, n'importe quel point du réseau est considéré comme étant un "noeud".

### 3-3-3 Construction de la matrice topologique MT

La matrice MT nous permet d'une part de savoir comment sont disposés les branches par rapport aux noeuds, et d'autre part permet à l'ordinateur d'explorer rationnellement le schéma depuis la source jusqu'au point de court-circuit ; par conséquent c'est un outil de calcul très important. (Fig.3-7)

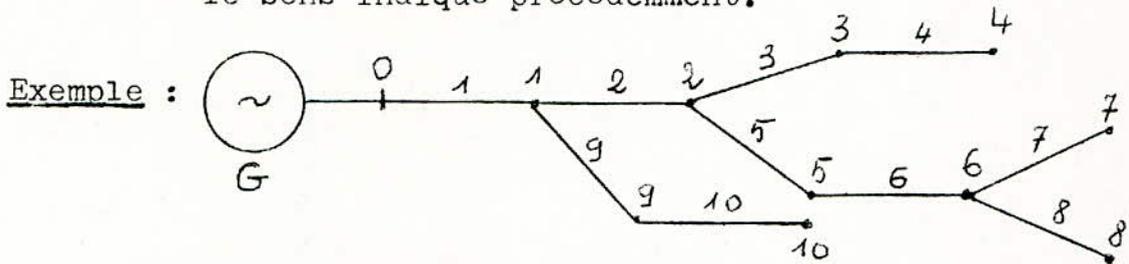


$$|MT| = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & \dots & m_{1j} & \dots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & \dots & m_{2j} & \dots & m_{2n} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & \dots & m_{3j} & \dots & m_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{i1} & m_{i2} & m_{i3} & \dots & m_{ij} & \dots & m_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & m_{n3} & \dots & m_{nj} & \dots & m_{nn} \end{bmatrix} = m_{ij} \begin{cases} j = 1, n \\ i = 1, n \end{cases}$$

$|MT|$  est une matrice carrée de dimension  $(n \times n)$

$m_{ij} = 1$  : si la branche  $j$  voit le noeud  $i$  dans le sens source - point d'avarie

$m_{ij} = 0$  : si la branche  $i$  ne voit pas le noeud  $i$  dans le sens indiqué précédemment.



$|MT| =$

$i \backslash j$		Branches (j)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N o e u d s (i)	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	4	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	5	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	6	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	7	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	8	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	9	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	10	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1

Nous avons choisit la numérotation de telle sorte que la matrice  $|MT|$  soit diagonale inférieure.

Remarque : la matrice  $|MT|$  est la transposée de la matrice  $|A|$  que certains auteurs utilisent

$$|A| = a_{ij} \begin{cases} i = 1, n \\ j = 1, n \end{cases}$$

avec  $a_{ij} = 1$  si la branche  $i$  embrasse le noeud  $j$  en s'éloignant de la source.

sinon  $a_{ij} = 0$

donc :

$$|MT| \equiv |A^t| \quad m_{ij} \equiv a_{ji}$$

3-3-4 Calcul de la matrice des impédances de court-circuit du réseau :  $Z_{cc}$

$$|Z_{cc}| = |R_{cc}| + j|X_{cc}|$$

avec  $j^2 = -1$

$|R_{cc}|$  et  $|X_{cc}|$  sont des matrices colonnes de dimension  $n$  les éléments  $R_i$  et  $X_i$  des branches sont déterminés comme suit:

$$R_i = R_{ti} + R_{li}$$

$$X_i = X_{ti} + X_{li} + X_{ri}$$

Car nous avons prévu pour chaque branche trois éléments pour généraliser la méthode ; à savoir, un ou deux transformateurs en //, un réactor et une ligne (Fig.3-8)



- Fig. 3-8 -

$$\begin{aligned} A &\rightarrow K \\ B &\rightarrow K+1. \end{aligned}$$

$$|R_{cc}^*| = \begin{bmatrix} R_1^* = R_{t1}^* + R_{l1}^* \\ R_2^* = R_{t2}^* + R_{l2}^* \\ R_3^* = R_{t3}^* + R_{l3}^* \\ \vdots \\ \vdots \\ R_i^* = R_{ti}^* + R_{li}^* \\ \vdots \\ \vdots \\ R_n^* = R_{tn}^* + R_{ln}^* \end{bmatrix}$$

$$|X_{cc}^*| = \begin{bmatrix} X_1^* = X_{t1}^* + X_{l1}^* + X_{r1}^* \\ X_2^* = X_{t2}^* + X_{l2}^* + X_{r2}^* \\ X_3^* = X_{t3}^* + X_{l3}^* + X_{r3}^* \\ \vdots \\ \vdots \\ X_i^* = X_{ti}^* + X_{li}^* + X_{ri}^* \\ \vdots \\ \vdots \\ X_n^* = X_{tn}^* + X_{ln}^* + X_{rn}^* \end{bmatrix}$$

3-2-5 Présentation et calcul des paramètres du réseau.

En général nous avons :

$$|Z_e^*| = |MT| \times |Z_{cc}^*|$$

En développant nous obtenons

$$\begin{aligned} |R_e^*| + j|X_e^*| &= |MT| \times |R_{cc}^*| + j|X_{cc}^*| \\ &= |MT| \times |R_{cc}^*| + j|MT| \times |X_{cc}^*| \end{aligned}$$

En identifiant : nous avons

et

$$\begin{cases} |R_e^*| = |MT| \times |R_{cc}^*| \\ |X_e^*| = |MT| \times |X_{cc}^*| \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} R_{e1}^* \\ R_{e2}^* \\ R_{e3}^* \\ \cdot \\ \cdot \\ R_{ei}^* \\ \cdot \\ \cdot \\ R_{en}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & & & & \\ m_{21} & m_{22} & & & \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \\ R_{ei}^* & m_{i1} & m_{i2} & m_{i3} & \cdot & \cdot & m_{ij} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ R_{en}^* & m_{n1} & m_{n2} & m_{n3} & \cdot & \cdot & m_{nj} & m_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1^* \\ R_2^* \\ R_3^* \\ \cdot \\ \cdot \\ R_i^* \\ \cdot \\ \cdot \\ R_n^* \end{bmatrix}$$

Finalement nous aurons :

$$\begin{aligned} R_{e1}^* &= m_{11} \cdot R_1^* \\ R_{e2}^* &= m_{21} \cdot R_1^* + m_{22} \cdot R_2^* \\ \cdot & \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ \cdot & \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ R_{ei}^* &= m_{i1} \cdot R_1^* + m_{i2} \cdot R_2^* + \dots + m_{ij} \cdot R_j^* \\ \cdot & \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ \cdot & \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ R_{en}^* &= m_{n1} \cdot R_1^* + m_{n2} \cdot R_2^* + \dots + m_{nj} \cdot R_j^* + \dots + m_{nn} \cdot R_n^* \end{aligned}$$

d'une façon générale :

$$Re_i^* = \sum_{j=1}^i m_{ij} \cdot R_j^*$$

de même pour :  $Xe_i^* = \sum_{j=1}^i m_{ij} \cdot X_j^*$

et enfin nous calculons pour le noeud i

$$Ze_i^* = \sqrt{(Re_i^*)^2 + (Xe_i^*)^2}$$

S'il y a un moteur synchrone en ce point, nous calculons de nouveau :

$$Re_i'^* = \mathcal{R}(Ze_i^* // Zm_i^*)$$

$$Xe_i'^* = \mathcal{J}(Ze_i^* // Zm_i^*)$$

et finalement :

$$Ze_i'^* = \sqrt{(Re_i'^*)^2 + (Xe_i'^*)^2}$$

avec :  $Zm$  : impédance du moteur synchrone :

$$Zm^* = Rm^* + jXm^*$$

$$Rm^* \text{ étant négligeable, } Zm^* = Xm^*$$

### 3-~~B~~ ALGORITHME DE LA METHODE

1/ Introduction des données

$I_{cc}^*(m, j, 1)$  ; ( $1 = 1,2$ ) ; ( $j = 1,3$ ) ; ( $m = 1,30$ )  
 $N$  ;  $MT(k, j)$  ; ( $j = 1, N$ ) ;  
 $N_s, 11(i)$  ;  $S_s(i)$  ;  $S_b(i)$  ;  $X_s(i)$  ; ( $i=1, N_s$ )  
 $U(k)$  ;  $S_m(k)$  ;  $Str_1(k)$  ;  $Str_2(k)$  ;  $DPcc_1(k)$  ;  $DPcc_2(k)$  ;  
 $Ucc_1(k)$  ;  $Ucc_2(k)$  ;  $X_r(k)$  ;  $L(k)$  ;  $XO(k)$  ;  $RO(k)$  ;  $Inr(k)$  ;  
 ( $k = 1, N$ )

2/  $i = 1$

3/  $k = 1$

4/ tester  $Str_1(k)$

- si  $Str_1(k) = 0$  c'est à dire qu'il n'y a pas de transformateur au point  $k$ , faire :

$X_{tr}^* = 0, R_{tr}^* = 0$  ; aller à 6

- si  $Str_1(k) \neq 0$  c'est à dire qu'il existe un transformateur au point  $k$ , faire :

$$X_{tr_1}^*(k) = \frac{Ucc_1(k) \cdot S_b(i)}{100 \cdot Str_1(k)} ; R_{tr_1}^*(k) = \frac{DPcc_1(k) \cdot S_b(i)}{Str_1(k)^2}$$

5/ tester  $Str_2(k)$

- si  $Str_2(k) = 0$  cela veut dire qu'il n'y a pas de transformateur en parallele avec le premier dans ce cas faire

$X_{tr}(k) = X_{tr_1}^*(k) ; R_{tr}(k) = R_{tr_1}^*(k) ;$  aller à 6

- Sinon faire :

$$\overset{*}{X}_{tr_2}(k) = \frac{U_{cc_2}(k) \cdot Sb(i)}{100 \cdot Str_2(k)}; \overset{*}{R}_{tr_2}(k) = \frac{DPoc_2(k) \cdot Sb(i)}{[Str_2(k)]^2}$$

$$\overset{*}{X}_{tr}(k) = \Im \left\{ \frac{[\overset{*}{R}_{tr_1}(k) + j\overset{*}{X}_{tr_1}(k)]}{[\overset{*}{R}_{tr_2}(k) + j\overset{*}{X}_{tr_2}(k)]} \right\}$$

$$\overset{*}{R}_{tr}(k) = \Re \left\{ \frac{[\overset{*}{R}_{tr_1}(k) + j\overset{*}{X}_{tr_1}(k)]}{[\overset{*}{R}_{tr_2}(k) + j\overset{*}{X}_{tr_2}(k)]} \right\}$$

6/ tester Inr (k) (ce qui veut dire est ce qu'il y a un réacteur dans la branche k ?)

si oui aller à 7

sinon 
$$\overset{*}{X}_r(k) = \frac{X_r(k) \cdot Sb(i)}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot Inr(k) \cdot U(k)}$$

7/ 
$$\overset{*}{X}_l(k) = \frac{XO(k) \cdot L(k) \cdot Sb(i)}{[U(k)]^2}$$

$$\overset{*}{R}_l(k) = \frac{RO(k) \cdot L(k) \cdot Sb(i)}{[U(k)]^2}$$

8/ a ce niveau nous avons calculé les paramètres des trois éléments de la branche k à savoir : le (ou les) transformateur , le réacteur et la ligne (ou le Cable)

Maintenant nous calculons la réactance et la résistance de la branche k composée des trois éléments cités précédemment :

$$\overset{*}{X}(k) = \overset{*}{X}_{tr}(k) + \overset{*}{X}_l(k) + \overset{*}{X}_r(k)$$

$$\overset{*}{R}(k) = \overset{*}{R}_{tr}(k) + \overset{*}{R}_l(k)$$

- 9/ Maintenant nous déterminons l'impédance de court-circuit entre la source (ou le système) et le nœud k.

$$\begin{aligned} X_e^*(k) &= \frac{X_s(i) \cdot S_b(i)}{S_s(i)} \\ R_e^*(k) &= 0 \end{aligned}$$

- 10/  $j = 1$

$$X_e^*(k) = X_e^*(k) + MT(k, j) \cdot X^*(j)$$

$$R_e^*(k) = R_e^*(k) + MT(k, j) \cdot R^*(j)$$

- 11/ tester j par rapport à k  
 -si  $j < k$ , incrémenter j et aller à 10  
 -si  $j = k$ , tester  $S_m(k)$  par rapport à Cste.  
 (Cste est fonction de la puissance du système;  
 pour notre cas  $Cste = 2 \cdot S_b(i) / 1000$ )  
 -si  $S_m(k) < Cste$  (c'est à dire qu'il n'y a pas de  
 moteur au point k, ou que sa puissance est faible)  
 aller à 12  
 -si  $S_m(k) \geq Cste$ , faire:

$$X_m^*(k) = 0,2 \cdot S_b(i) / S_m(k)$$

$$X_e^*(k) = \mathcal{I} \left\{ \left[ R_e^*(k) + jX_e^*(k) \right] // jX_m^*(k) \right\}$$

$$R_e^*(k) = \mathcal{R} \left\{ \left[ R_e^*(k) + jX_e^*(k) \right] // jX_m^*(k) \right\}$$

- 12/ Calculons le module de l'impédance réduite au point de défaut k :

$$Z_e^*(k) = \sqrt{[R_e^*(k)]^2 + [X_e^*(k)]^2}$$

13/  $Z_e^*(k) > 3$  ?

- Si oui, faire  $I_{cc} = \frac{S_b(i)}{\sqrt{3} \cdot Z_e^*(k) \cdot U(k)}$

imprimer  $k, U(k), R^*(k), X_e^*(k), Z_e^*(k), I_{cc}$ ; aller à 23

- Sinon faire :

14/  $i = 1$

15/  $m = 1$

16/  $A(m) = m/10$

17/  $Z_e^*(k) - A(m)$  ?

18/  $> 0$  faire  $m = m + 1$ , aller à 16

19/  $= 0$  faire  $C(j) = I_{cc}(m, j, 1)$  aller à 21

20/  $< 0$  faire :

$$C(j) = I_{cc}(m-1, j, 1) + 10 \left[ I_{cc}(m, j, 1) - I_{cc}(m-1, j, 1) \right] \\ \times \left[ Z_e^*(k) - A(m) \right] \text{ aller à 21}$$

21/  $I_{cc}(j) = \theta(j) \cdot S_b(i) / \sqrt{3} \cdot U(k)$  aller à 22

22/  $j = 3$  ?

Sinon, faire  $j = j + 1$ , aller à 15

si oui imprimer  $k, U(k), R_e^*(k), X_e^*(k), Z_e^*(k), I_{cc}(j)$

$j = 1, 3$

23/     $k = n ?$   
       non : faire  $k = k + 1$  ; aller à 4  
       oui :  $i = N_s ?$   
       non : faire  $i = i + 1$  ; aller à 3  
       oui : STOP

Remarque: Jusqu'ici notre algorithme nous calcule les courants court-circuit pour un seul réseau radial.

- Si nous avons plusieurs réseaux différents à traiter, il suffit dans ce cas d'introduire les données de chaque réseau les unes à la suite des autres.

### 3-4 ORGANIGRAMME

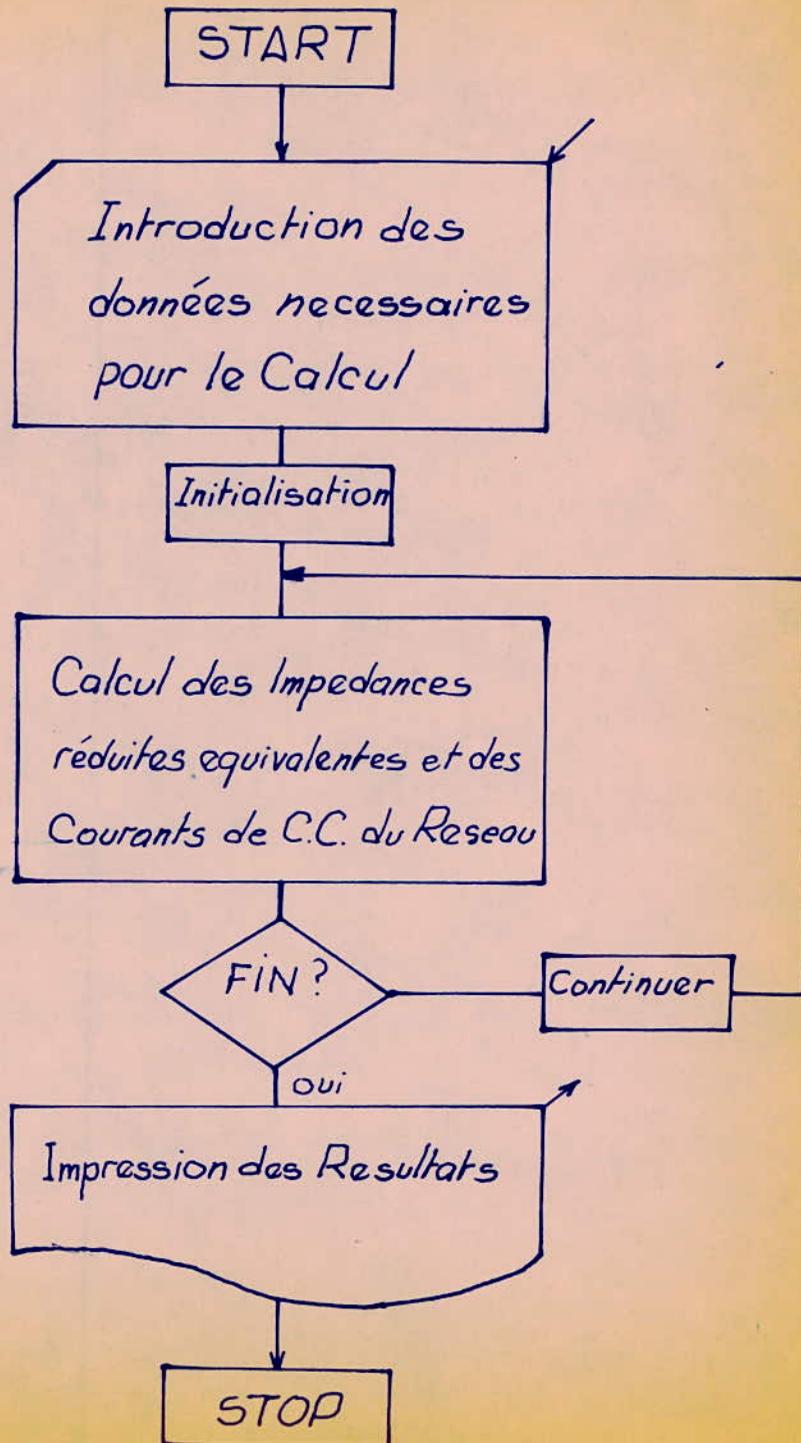
3-4-1 But :

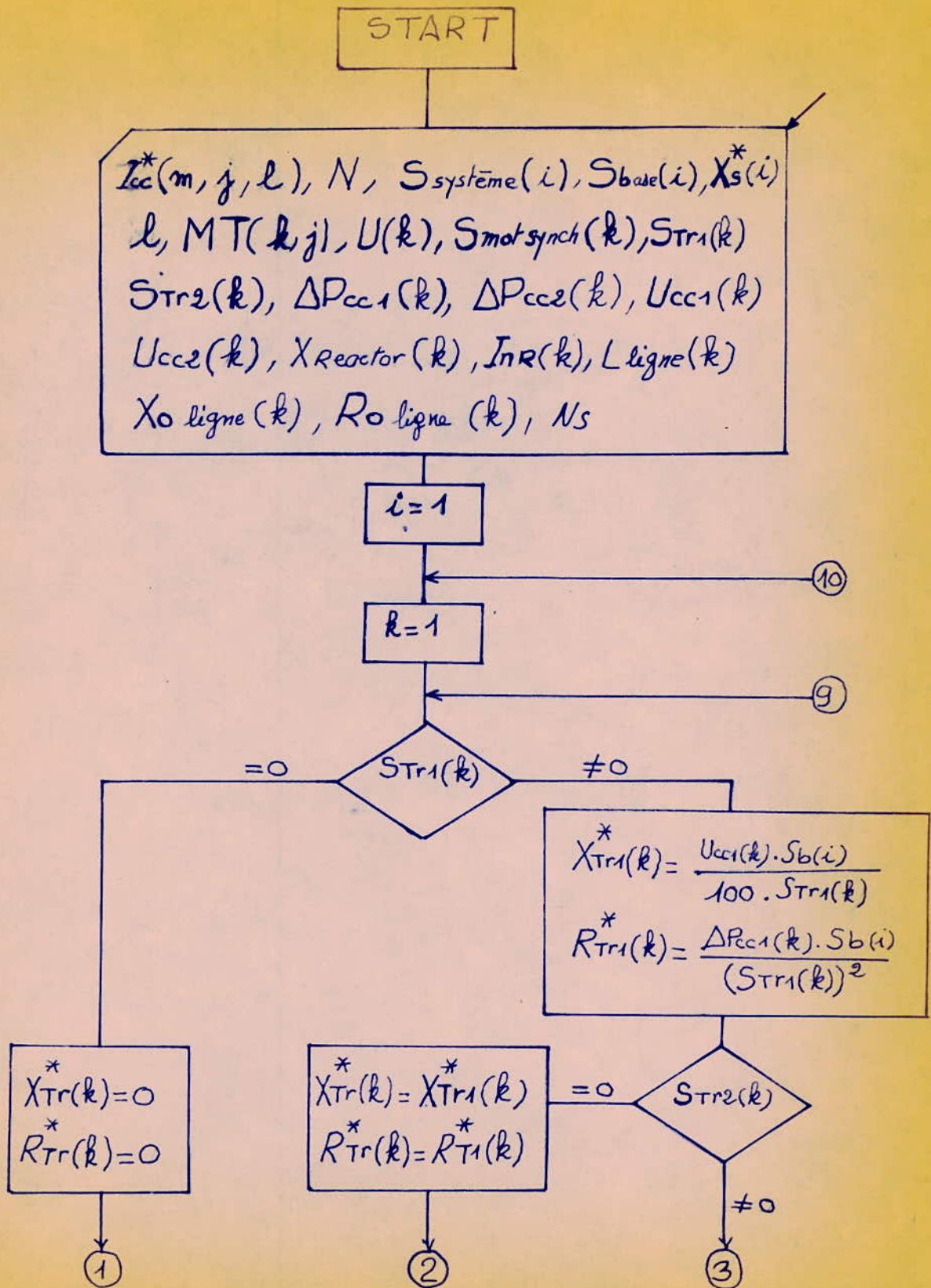
- l'algorithme que nous avons établi est tout à fait général de sorte qu'il peut être appliqué à n'importe quel réseau de structure purement radial (c'est à dire alimenté d'un seul côté), pour différentes valeurs de la puissance  $S_s(i)$ .

- En général, on calcule le courant de court-circuit pour deux cas.

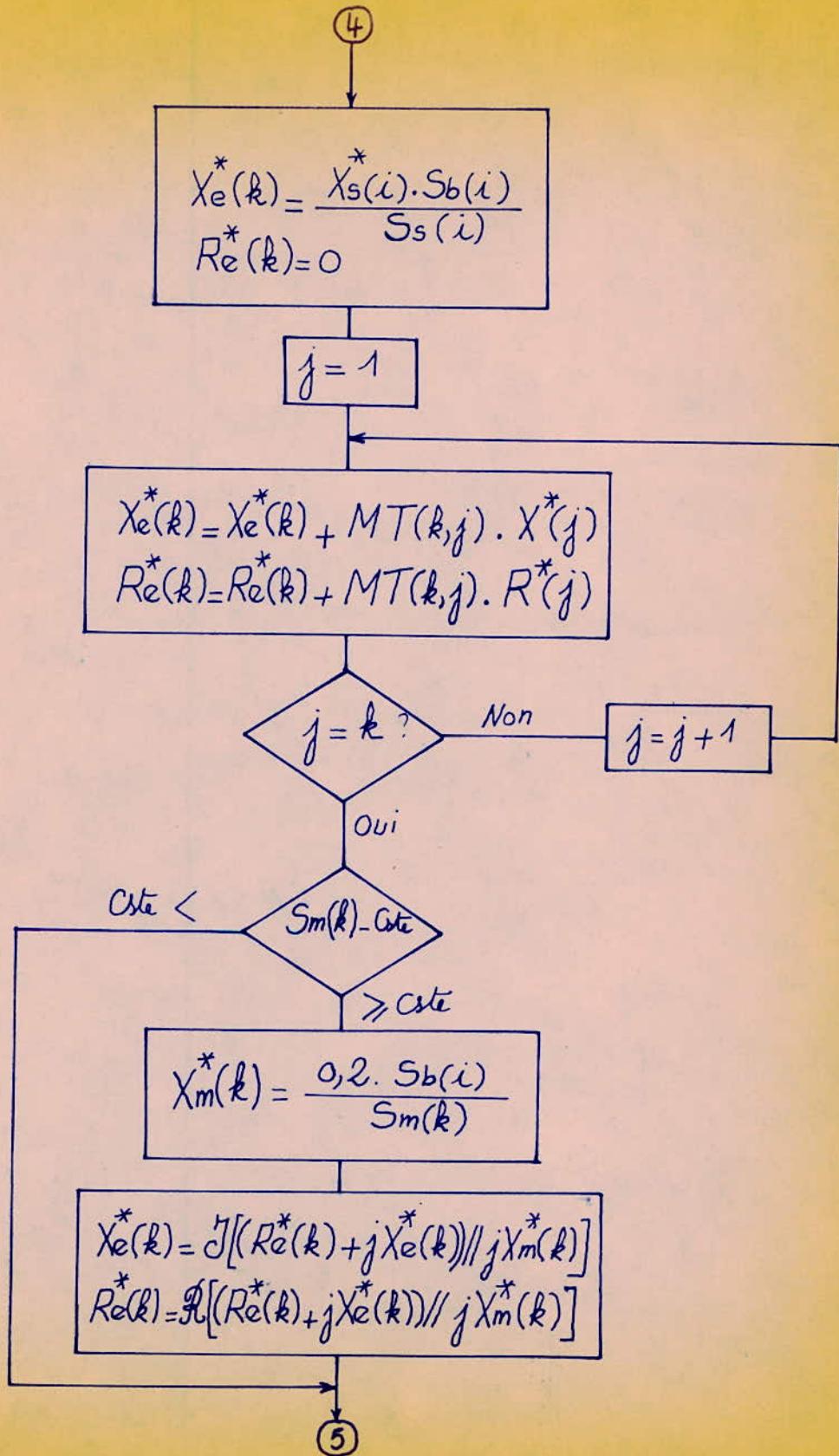
Pour le cas le plus défavorable c'est à dire quand toutes les sources du système électro-énergétique fonctionnent en pleine charge, et, pour le cas où le système est à charge minimale, c'est le cas le moins défavorable.

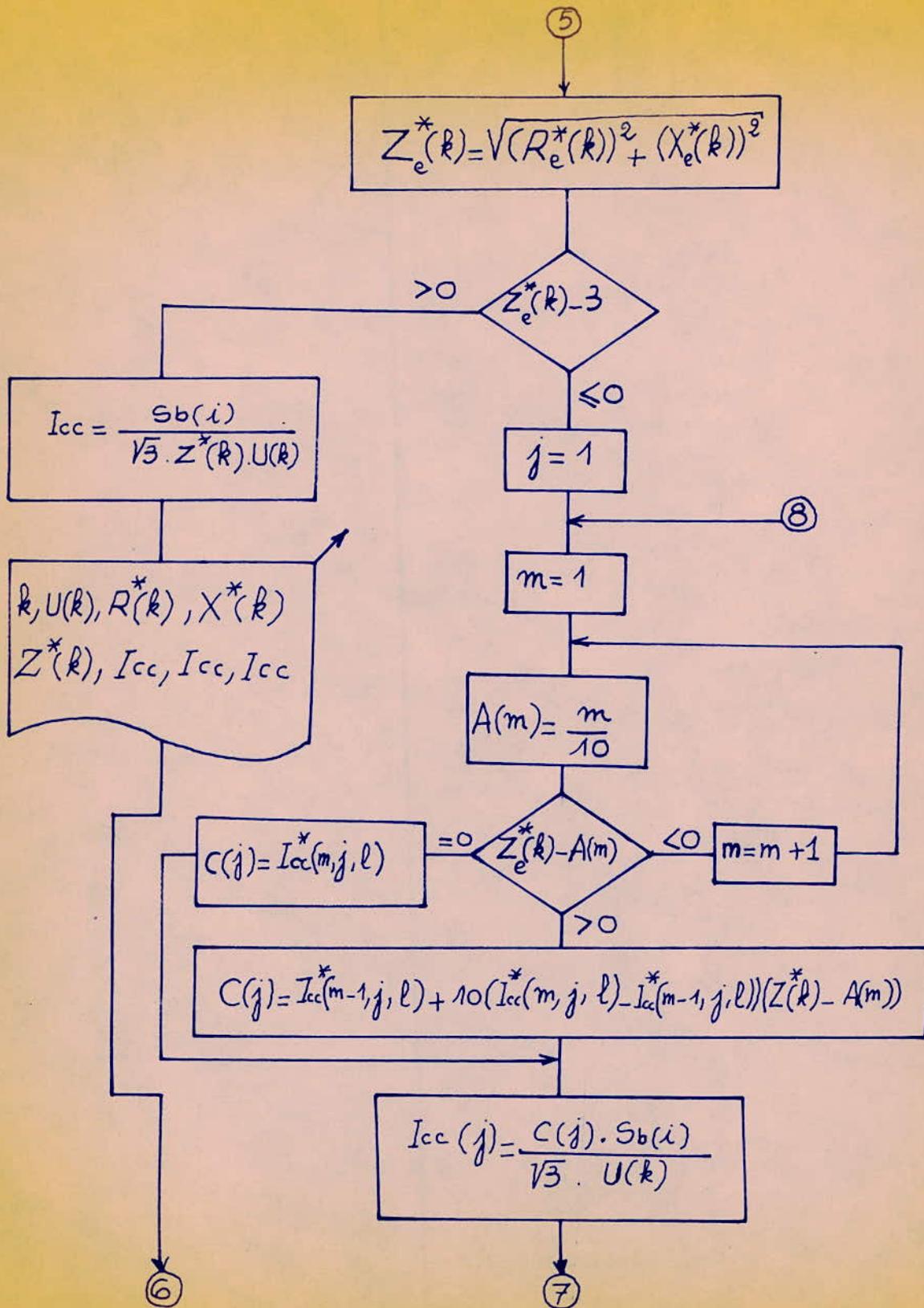
## 3\_4\_2 Bloc Diagramme

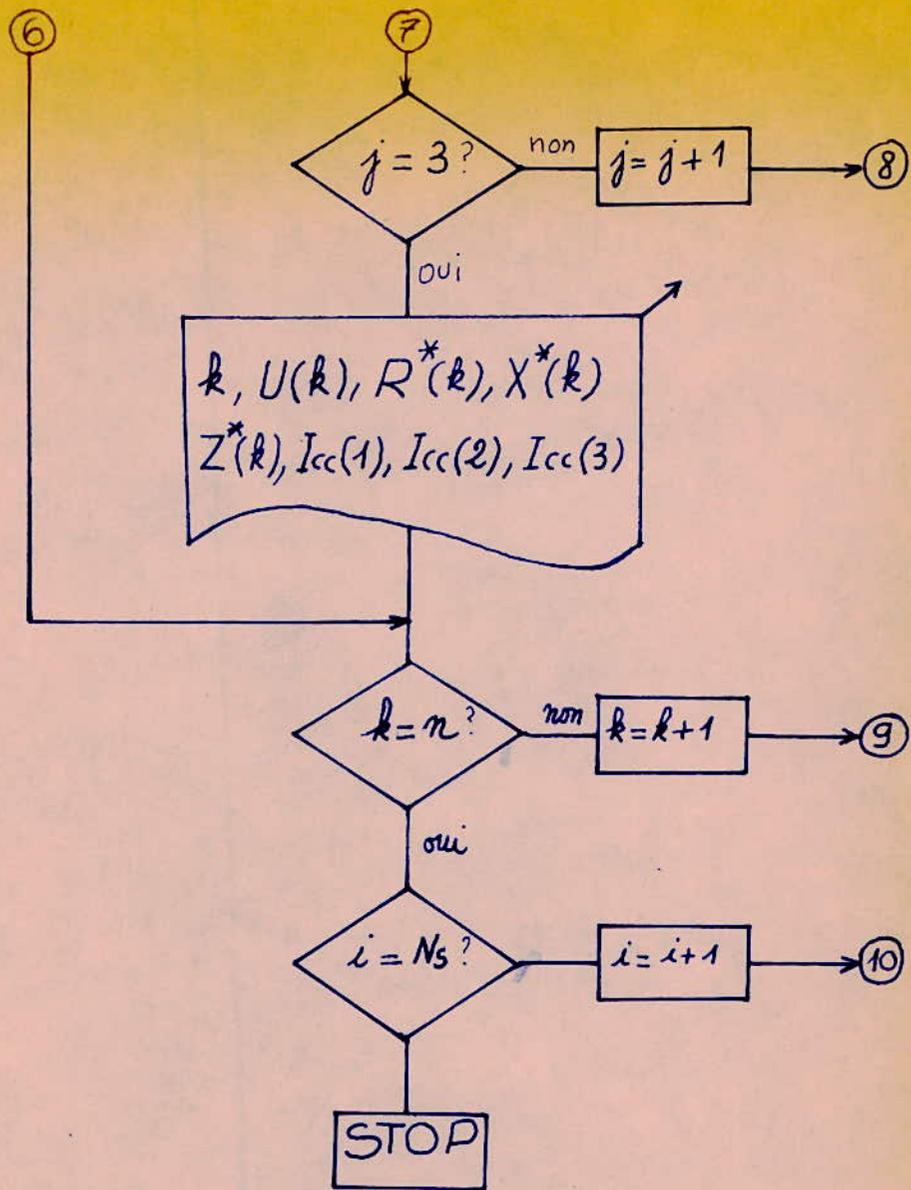












° N O T E S °

## 3-4-4' Nomenclature de la notation utilisée.

Notation	Notation FORTRAN	Désignation
$I_{cc}^*(m, j, l)$	B(M, J, L)	Composante triphasée périodique réduite du C.deCC donnée par les courbes de calcul.
$n, MT(k, j)$	N, MT(K, J)	Nombre de noeuds et de branches et matrice topologique du réseau de dimension (n x n)
$Ns, Ss(i)$	NS, SS(I)	Puissance du système ou source (ou puissance de CC.) en MVA
$Sb(i)$	SB(I)	Puissance de base du système (Pn) en MVA
$Xs^*(i)$	XTRS(I)	Réactance transitoire réduite du système ou de la source
$U(k)$	U(K)	Niveau de tension en chaque noeud du réseau en KV
$Sm(k)$	SM(K)	Puissance du moteur synchrone en MVA
$Str_1(k)$	ST1 (K)	Puissance du 1er groupe de transformateurs en MVA
$Str_2(k)$	ST2(K)	Puissance du 2ème groupe de transformateurs en MVA
$DPcc_1(k)$	DPC1(K)	Pertes dans le cuivre du 1er groupe de transformateurs en MWW

Notation	Notation FORTRAN	Désignation
$DPcc_2(k)$	DPC2(K)	Pertes dans le cuivre du 2ème groupe en MW
$Ucc_1(k)$	UCC1(K)	Tension de court-circuit du 1er groupe de transformateurs en %
$X_{tr_1}^*(k)$ $R_{tr_1}^*(k)$	XT1(K) RT1(K)	Réactance du groupe 1. (en Valeur Réduite) Résistance " " " " Réduite
$X_{tr_2}^*(k)$ $R_{tr_2}^*(k)$	XT2(K) RT2(K)	Réactance du groupe 2. (en Valeur Réduite) Résistance du groupe 2. Réduite
$X_{tr}^*(k)$ $R_{tr}^*(k)$	XT(K) RT(K)	Réactance du transformateur équivalent. (en Valeur Réduite) Résistance du transformateur équivalent. (en Valeur Réduite)
$Inr(k)$	AIRE(K)	Courant nominal du réactor en KA
$Xr^*(k)$ $Xr(k)$	XRRE(K) XRE(K)	Réactance réduite du réactor Réactance du réactor en %
$XO(k)$ $RO(k)$	XO(K) RO(K)	Réactance spécifique de la ligne en $\Omega/km$ Résistance spécifique de la ligne en $\Omega/km$
$L(k)$	AL(K)	Longueur de la ligne (ou cable) en km
$Xl^*(k)$ $Rl^*(k)$	XL(K) RL(K)	Réactance réduite de la ligne Résistance " " " "

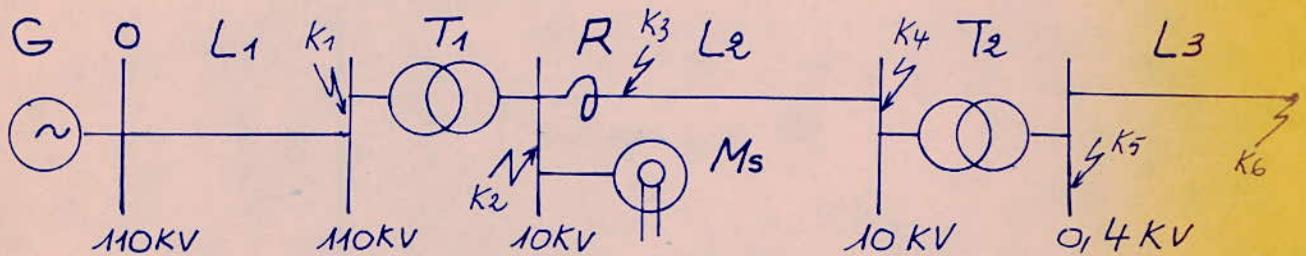
Notation	Notation FORTRAN	Désignation
$X^*(k)$	X(K)	Réactance de la branche k du réseau (en valeur réduite)
$R^*(k)$	R(K)	Résistance de la branche k du réseau (en valeur réduite)
$X_e^*(k)$	XR(K)	Réactance équivalente réduite des k branches depuis la source jusqu'au point k de court-circuit
$R_e^*(k)$	RR(K)	Résistance équivalente réduite des k branches depuis la source jusqu'au point k de court-circuit
$Z_e^*(k)$	ZR(K)	Impédance équivalente réduite des k branches depuis la source jusqu'au point k de court-circuit
$I_{cc}(j)$	ACC(J)	Courant de court-circuit triphasé en KA calculé quand $Z_e \leq 3$ et pour
$I_{cc}(1)$	ACC(1)	$t = \infty$
$I_{cc}(2)$	ACC(2)	$t = 0,2 \text{ sec}$
$I_{cc}(3)$	ACC(3)	$t = 0$
$I_{cc}$	CC	Courant de court-circuit triphasé en KA quand $Z_e > 3$ (il correspond a peu près à $I_{cc}(3)$ )

## Chap: 4 APPLICATION DE LA METHODE

### 4-1 Exemple 1

Par cet exemple simple traitant du cas général, nous illustrons notre étude pour une bonne compréhension de la méthode

#### 4-1-1 Schema Electrique du Reseau Radial



Avec:

$$G: S_G = 1000 \text{ MVA}$$

$$O: S_{cc} = 4000 \text{ MVA}, S_b = 1000 \text{ MVA}$$

$$L_1: X_0 = 0,4 \Omega/\text{km}, R_0 = 0, L = 30 \text{ km}$$

$$T_1: S_T = 30 \text{ MVA}, U_{cc} \% = 10,5, \Delta P_{cu} = 0$$

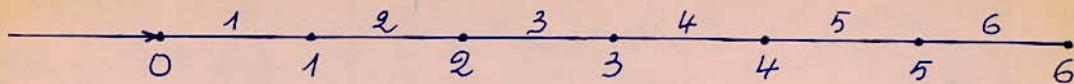
$$R: I_{nr} = 2 \text{ kA}, X_R = 8\%$$

$$L_2: X_0 = 0,075, R_0 = 0,006 \Omega/\text{km}, L = 1 \text{ km}$$

$$T_2: S_T = 0,32 \text{ MVA}, U_{cc} = 5,5\%, \Delta P_{cu} = 0,0055 \text{ MW}$$

$$L_3: X_0 = 0,08 \Omega/\text{km}, R_0 = 0,0012 \Omega/\text{km}, L = 0,8 \text{ km}$$

## 4-1-2 Schéma topologique du Réseau



Nous nous proposons de calculer les courants de court-circuit pour les six points ( $K=1 \div 6$ ) du réseau, connaissant la puissance de court-circuit ( $S_{cc}$ ) et la puissance de base ( $S_b$ ) au nœud de référence "0"

## 4-1-3 Matrice Topologique [MT]

$$[MT] = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

Remarque: Avant d'introduire les données dans la mémoire de la machine, il faut respecter le format d'écriture, il faut aussi veiller à ne pas dépasser la réservation de mémoire fixée à l'avance.

## 4 - 1.4 Caracteristiques Numeriques (données) du Reseau

branches Nœuds ( $k$ )	1	2	3	4	5	6
$U(k)$	110	10	10	10	0,4	0,4
$S_M(k)$	0	0	3,25	0	0	0
$S_{tr1}(k)$	0	30	0	0	0,32	0
$S_{tr2}(k)$	0	0	0	0	0	0
$\Delta P_{cc1}(k)$	0	0	0	0	0,0055	0
$\Delta P_{cc2}(k)$	0	0	0	0	0	0
$U_{cc1}(k)$	0	10,5	0	0	5,5	0
$U_{cc2}(k)$	0	0	0	0	0	0
$I_{nr}(k)$	0	0	2	0	0	0
$X_R(k)$	0	0	8	0	0	0
$L(k)$	30	0	0	1	0	0,8
$R_0(k)$	0	0	0	0,006	0	0,0012
$X_0(k)$	0,4	0	0	0,075	0	0,08

## 4. 1.5 Resultats donnés par l'ordinateur

Nœuds ( $k$ )	1	2	3	4	5	6
$U(k)$ en KV	110	10	10	10	0,4	0,4
$R_e^*(k)$	0	0	0	0,06	53,771	59,771
$X_e^*(k)$	1,242	4,742	6,329	7,804	179,679	579,678
$Z_e^*(k)$	1,242	4,742	6,329	7,804	187,552	582,752
$I_{cc}$ en KA $t = \infty$	4,467	12,190	9,134	7,407	7,705	2,479
$I_{cc}$ en KA $t = 0,2$ sec	3,784	12,190	9,134	7,407	7,705	2,479
$I_{cc}$ en KA $t = 0$ sec	3,994	12,190	9,134	7,407	7,705	2,479

Remarque : Pour  $Z_e^* > 3$   $I_{cc}(t = \infty) \# I_{cc}(t = 0,2) \# I_{cc}(t = 0)$

#### 4-2 Exemple 2 (Application à un Réseau Reel)

Nous, avons jugé utile, d'appliquer notre méthode à un réseau existant; c'est une portion du réseau MT de la Grande Kabylie qui part du poste de SOUK-DJEMA laquelle est connectée au réseau HT. (60KV)

Souk - Djema possède aussi une petite usine hydro-électrique d'une puissance installée de 10,5 MVA

Nous avons pris comme puissance du système ( $S_s$ ) la puissance de court-circuit sur le jeu de barre 60KV, et comme puissance de base, la puissance nominale de la centrale thermique d'ALGER-PORT.

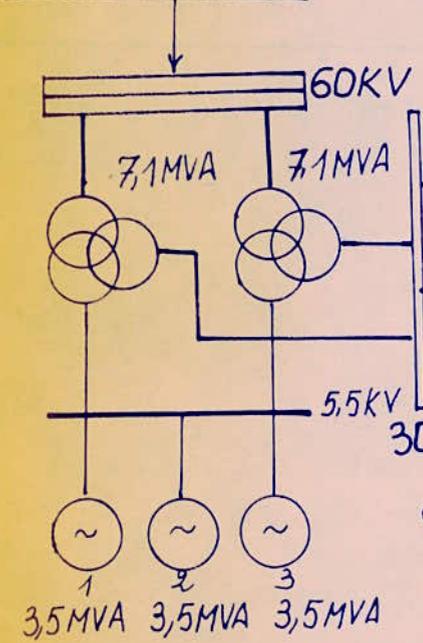
Toutes les caractéristiques du réseau nous ont été fournies par SONELGAZ.

Remarque: la puissance de court-circuit sur le jeu de barre 60KV a été calculée par la table à courant continu d'El-Hamma, les groupes de la centrale hydroélectrique étant à l'arrêt.

##### 4-2-1 Schéma Electrique

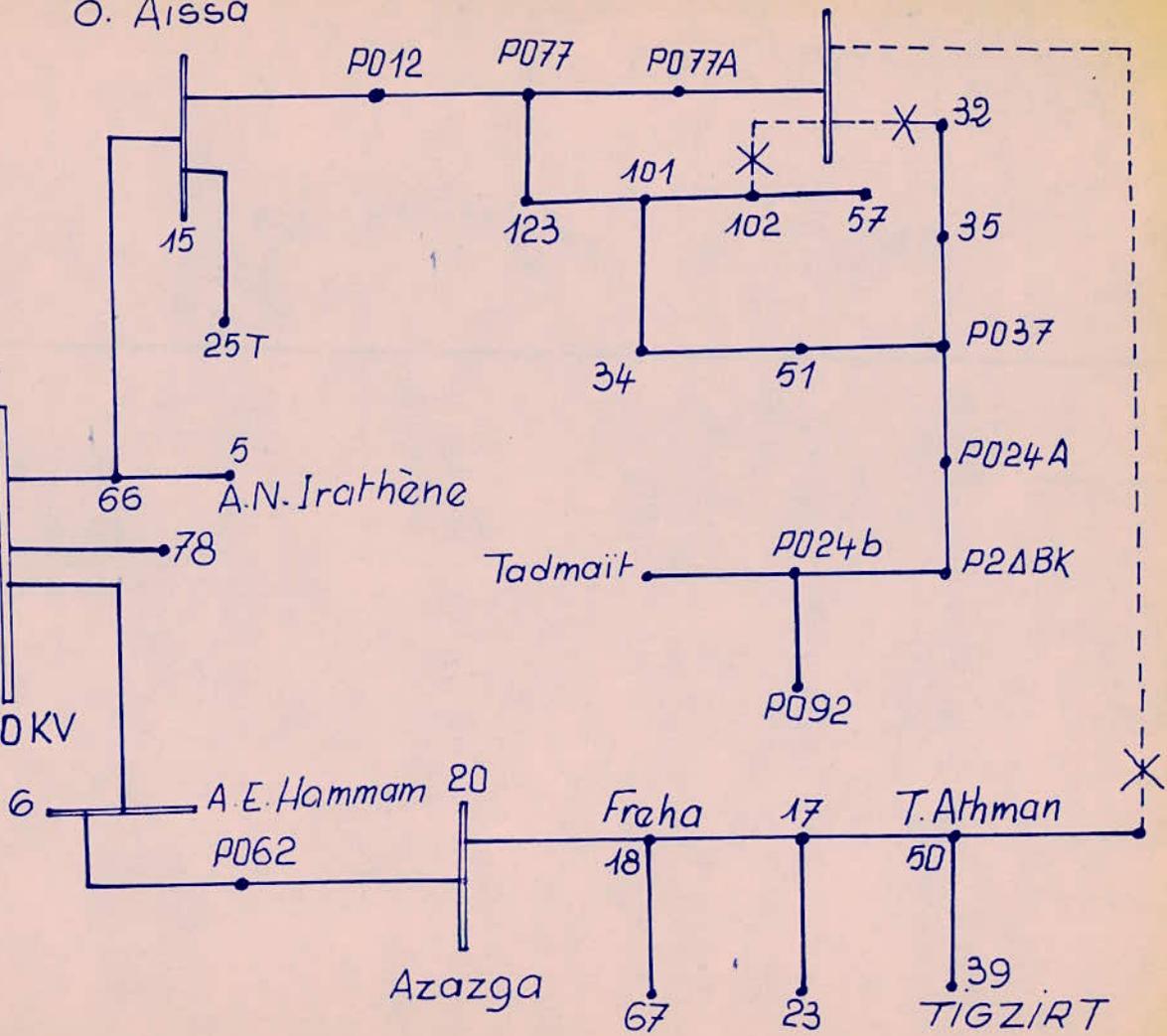
Ce schéma nous a été fourni aussi par le service XD de la SONELGAZ.

$S_{ccMAX} = 185 \text{ MVA}$   
 $S_{ccMIN} = 95 \text{ MVA}$

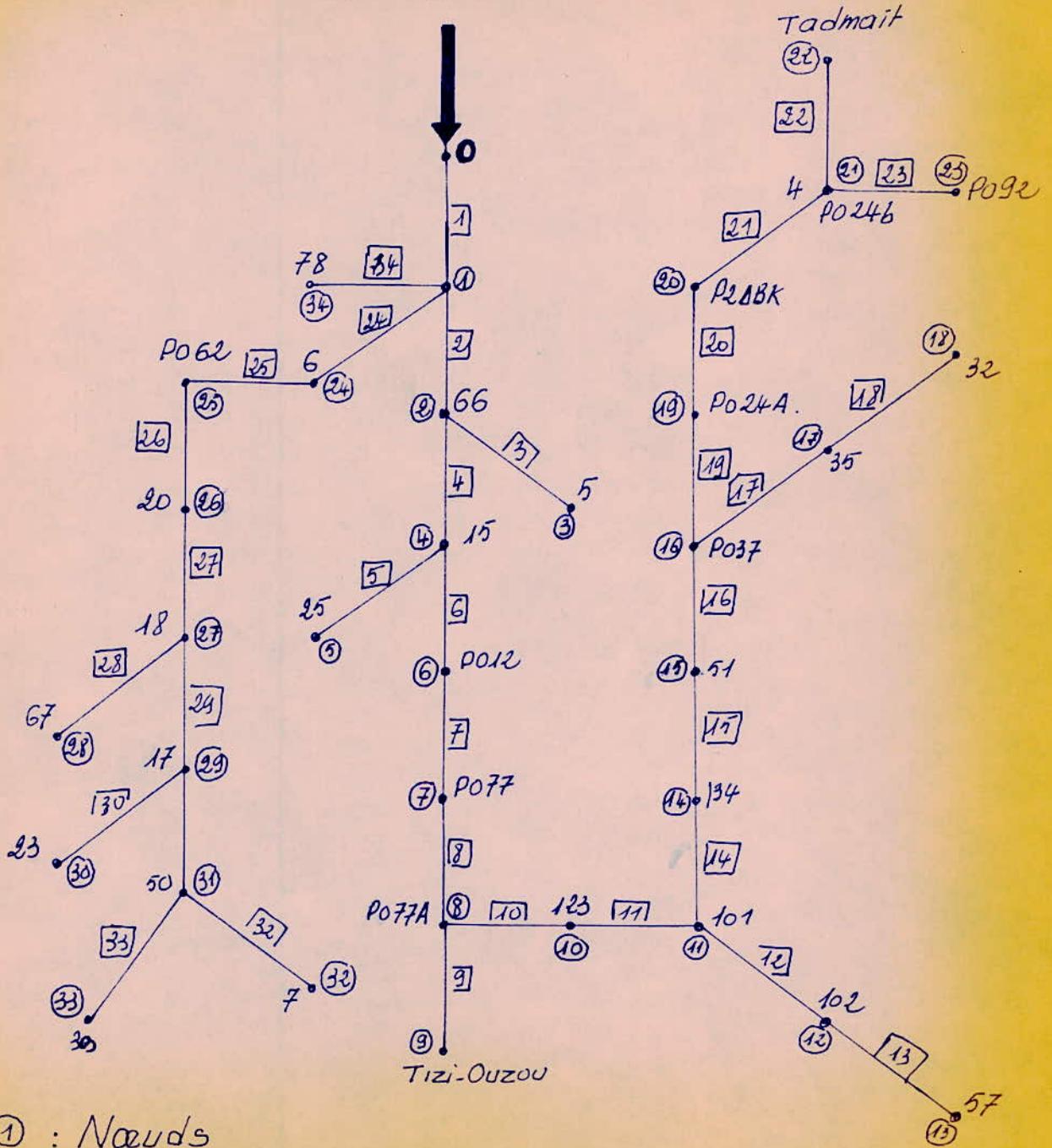


O. Aïssa

TIZI-OUZOU



4-2-2 Schéma Topologique.



① : Nœuds

□ : Branches

66 : Code Sonelgaz

## 4.2.3 Matrice Topologique [MT]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34					
1	1																																						
2	1	1																																					
3	1	1	1																																				
4	1	1		1																																			
5	1	1		1	1																																		
6	1	1		1		1																																	
7	1	1		1		1	1																																
8	1	1		1		1	1	1																															
9	1	1		1		1	1	1	1																														
10	1	1		1		1	1	1		1																													
11	1	1		1		1	1	1		1	1																												
12	1	1		1		1	1	1		1	1	1																											
13	1	1		1		1	1	1		1	1	1	1																										
14	1	1		1		1	1	1		1				1																									
15	1	1		1		1	1	1		1				1	1																								
16	1	1		1		1	1	1		1				1	1	1																							
17	1	1		1		1	1	1		1				1	1	1	1																						
18	1	1		1		1	1	1		1				1	1	1	1	1																					
19	1	1		1		1	1	1		1				1	1	1																							
20	1	1		1		1	1	1		1				1	1	1																							
21	1	1		1		1	1	1		1				1	1	1																							
22	1	1		1		1	1	1		1				1	1	1																							
23	1	1		1		1	1	1		1				1	1	1																							
24	1																																						
25	1																																						
26	1																																						
27	1																																						
28	1																																						
29	1																																						
30	1																																						
31	1																																						
32	1																																						
33	1																																						
34	1																																						

Tout les blancs Correspondent à des "0"

4-2-4 Caracteristiques du Reseau

$$\left. \begin{array}{l} S_b = 150 \text{ MVA} \\ S_s = 185 \text{ MVA} \end{array} \right\} l=1 \text{ (predominance thermique)}$$

$$S_{tr1}(1) = 7,1 \text{ MVA} = S_{tr2}(1)$$

$$S_{tr1}(k) = S_{tr2}(k) = 0 \quad (k=2,3,4)$$

$$\Delta P_{cc1}(1) = 0,055 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{cc2}(1) = 0,035 \text{ MW}$$

$$U_{cc1}(1) = 7,3 \%$$

$$U_{cc2}(1) = 7,84 \%$$

$$S_H(k) = 0$$

$$I_{nr}(k) = 0, \quad X_R(k) = 0$$

$$U(0) = 60 \text{ KV}, \quad U(k) = 30 \text{ KV} \quad (k=1,3,4)$$

branches (k)	1	2	3	4	5	6	7
L(k) km	0	14,20	4	6,2	6,4	4	1,3
R <sub>0</sub> (k) Ω/km	0	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61
X <sub>0</sub> (k) Ω/km	0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

branches (k)	8	9	10	11	12	13	14
L(k) km	5,7	1,8	0,5	1,2	0,5	0,8	2,3
R <sub>0</sub> (k) Ω/km	0,61	0,61	0,48	0,48	0,63	0,38	0,38
X <sub>0</sub> (k) Ω/km	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

4-2-4 Caracteristiques du Reseau

$$\left. \begin{array}{l} S_b = 150 \text{ MVA} \\ S_s = 185 \text{ MVA} \end{array} \right\} l=1 \text{ (predominance thermique)}$$

$$S_{tr1}(1) = 7,1 \text{ MVA} = S_{tr2}(1)$$

$$S_{tr1}(k) = S_{tr2}(k) = 0 \quad (k=2,3,4)$$

$$\Delta P_{cc1}(1) = 0,055 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{cc2}(1) = 0,035 \text{ MW}$$

$$U_{cc1}(1) = 7,3 \%$$

$$U_{cc2}(1) = 7,84 \%$$

$$S_H(k) = 0$$

$$I_{nr}(k) = 0, \quad X_R(k) = 0$$

$$U(0) = 60 \text{ KV}, \quad U(k) = 30 \text{ KV} \quad (k=1,3,4)$$

branches (k)	1	2	3	4	5	6	7
L(k) km	0	14,20	4	6,2	6,4	4	1,3
R <sub>0</sub> (k) Ω/km	0	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61
X <sub>0</sub> (k) Ω/km	0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

branches (k)	8	9	10	11	12	13	14
L(k) km	5,7	1,8	0,5	1,2	0,5	0,8	2,3
R <sub>0</sub> (k) Ω/km	0,61	0,61	0,48	0,48	0,63	0,38	0,38
X <sub>0</sub> (k) Ω/km	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Nodes (k)	8	9	10	11	12	13	14
$R_e^*(k)$	3,855	4,038	3,315	3,411	3,464	3,515	3,557
$X_e^*(k)$	3,724	3,844	3,352	3,372	3,381	3,394	3,411
$Z_e^*(k)$	5,360	5,575	4,715	4,797	4,840	4,886	4,928
$I_{cc}(k)$ (KA)	0,539	0,518	0,613	0,603	0,597	0,592	0,587

Nodes (k)	15	16	17	18	19	20	21
$R_e^*(k)$	3,586	3,627	3,683	3,840	3,830	4,389	4,389
$X_e^*(k)$	3,418	3,445	3,492	3,574	3,578	3,945	3,945
$Z_e^*(k)$	4,954	5,002	5,075	5,246	5,242	5,902	5,902
$I_{cc}(k)$ (KA)	0,583	0,578	0,570	0,551	0,551	0,490	0,490

Nodes (k)	22	23	24	25	26	27	28
$R_e^*(k)$	4,389	5,698	1,054	1,572	3,175	3,784	4,424
$X_e^*(k)$	3,945	4,458	1,964	2,524	2,917	3,212	3,631
$Z_e^*(k)$	5,902	7,235	2,229	2,974	4,312	4,962	5,723
$I_{cc}(k)$ (KA)	0,490	0,400	1,330	1,012	0,670	0,582	0,505

Nodes (k)	29	30	31	32	33	34	
$R_e^*(k)$	4,821	4,807	4,890	6,975	6,024	0,996	
$X_e^*(k)$	3,712	3,704	3,744	5,111	4,164	1,991	
$Z_e^*(k)$	5,084	6,069	6,159	8,647	7,323	2,226	
$I_{cc}(k)$ (KA)	0,475	0,476	0,469	0,334	0,395	1,330	

CHAPITRE 5 :-- EXPLOITATION DU PROGRAMME --

## 5.1 - TRAVAIL DE PREPARATION

- La méthode de calcul étant générale, nous avons fait en sorte que l'utilisateur n'aura pratiquement aucune instruction à ajouter dans le programme principal.

Pour cela, nous avons donné à notre "Modèle" une dimension maximale (cent branches et cent noeuds) qui nous semble être la moins encombrante pour la mémoire d'une machine moyenne, ceci d'une part. D'autre part vu que le réseau est alimenté d'un seul côté, un nombre de branches trop élevé entraîne une chute de tension relativement importante (pour  $N = 34$  :  $U = 12\%$ ).

Cependant, si d'une façon ou d'une autre,  $N$  dépasse cent, deux cas sont à envisager :

- Soit augmenter la dimension des matrices en  $N$ , si le programme est accessible à l'utilisateur.

- Soit prendre les dernières valeurs comme grandeurs initiales d'un nouveau système et continuer le calcul, si le package est stocké dans la bibliothèque de l'ordinateur.

- Si toutes les conditions citées précédemment sont réunies, il suffit dans ce cas de construire la matrice topologique du schéma étudié, d'introduire les données sous les formats indiquées (voir notice), de mettre les cartes de contrôle du compilateur utilisé (éventuellement, assigner les ordres d'entrée et de sortie) et d'attendre les résultats.

Remarque : Si le compilateur indique des erreurs de la forme : "FORTRAN RUNTIME '9BCDREAD'" il faut bien revoir l'écriture des données.

: "MEMORY OVERFLOW" cela veut dire que le trancon de mémoire réservée à l'utilisateur se trouve dépassée, dans ce cas il faut l'augmenter.

- Le programme proposé étant écrit en FORTRAN IV il faut respecter scrupuleusement l'ordre d'écriture des données, ainsi que leurs formats.

Comme nous avons dit plus haut (chap.3) chaque **branche** k est composée des trois éléments à savoir : un transformateur, un réactor, et une ligne. Et en chaque noeud nous avons prévu un éventuel moteur synchrone. Sur les trois éléments un au moins existe réellement les autres sont virtuels et dans ce cas leurs caractéristiques sont nulles.

IMPORTANT : Toutes les données alpha-numériques doivent être perforées sur cartes par une perforatrice IBM 29.

5-2 INTRODUCTION DES DONNEES

N <sup>o</sup>	Lecture (READ)	FORMAT
1	N	I3
2	(MT(K,J), J=1,N , K=1,N)	80I1
3	NS	I2
4	L1(I), I=1,NS	8I1
5	SS(I), I=1,NS	8F10.4
6	SB(I), I=1,NS	8F10.4
7	XTRS(I), I=1,NS	8F5.2
8	U(K), K=1,N	10F7.3
9	SM(K), K=1,N	10F7.3
10	ST1(K), K=1,N	10F7.3
11	ST2(K), K=1,N	10F7.3
12	DPC1(K), I=1,N	10F7.4
13	DPC2(K), K=1,N	10F7.4

	Lecture (READ)	FORMAT
14	UCCK (K), K=1,N	10F5.2
15	UCC2 (K), K=1,N	10F5.2
16	XRE(K), K=1,N	12F5.2
17	AIRE(K), K=1,N	12F5.2
18	AL(K), K=1,N	10F7.3
19	XO(K), K=1,N	10F6.3
20	ROC(K), K=1,N	10F7.4
21	NM	I2
22	NOM(I), I=1,NM	20A4

Remarque : le format A4 est prévu pour l'écriture et l'impression des caractères alpha-numériques (titre, commentaire, etc...) Chaque mot de format A est composé de quatre caractères donc 20A4 peut nous écrire 80 caractères par carte.

## 5.3 Configuration et performances des machines utilisées

Type		I.B.M 1070 (CERI)	I.B.M 370 (SONELGA7)	I.B.M 370 (CNTI)
Capacité		448 K octets	144 K octets	512 K octets
Cartes lues par mn		1200	1200	1200
Cartes perforées/mn		400	300	300
Lignes imprimées/mn		1000	1100	1100
Durée de la compilation STEP 01	N	6	0,31 mn	13,79 sec
		34	0,30 mn	13,70 sec
		6&34	0,31 mn	15,01 sec
Durée du Lien STEP 02	N	6	0,10 mn	3,69 sec
		34	0,09 mn	3,71 sec
		6&34	0,10 mn	3,77 sec
Durée de l'exécution STEP 03	N	6	0,01 mn	1,40 sec
		34	0,03 mn	2,78 sec
		6&34	0,05 mn	3,25 sec
Temps de Calcul	N	6	0,44 mn	4 mn 23 sec
		34	0,44 mn	4 mn 21 sec
		6 & 34	0,48 mn	5 mn 3 sec
Coût (DA/H)		1200	1800 ÷ 2000	1300

K = 1024 octets

N: dimension du Réseau

### CONCLUSION

- A mesure que la consommation de l'énergie électrique augmente, la puissance produite<sup>ou</sup> installée augmente à un rythme tel que le contrôle de l'état du système devient difficile et onéreux, surtout pour les pays en voie de développement comme le notre, et par conséquent les risques d'accidents tels que les court-circuits, augmentent. C'est ainsi qu'il est important de connaître les courants de court-circuit pour les prévenir et <sup>par</sup> la même prendre les mesures nécessaires pour limiter leurs effets.

Jusqu'à présent, la détermination de ces courants ainsi que les grandeurs qui en découlent (la puissance de court-circuit, la puissance de coupure des disjoncteurs, les courants dans les branches, les courants de réglage des relais de protection ect...) se faisait soit à la main, ce qui exigeait beaucoup de temps et, est assez approximative, soit par les procédés de simulation tels que les analyseurs de réseaux (tables à courant continu et à courant alternatif).

- Dans cette étude nous nous sommes fixés pour but d'élaborer un modèle mathématique adapté aux réseaux radiaux en général, quelques soient leurs dimensions. Grâce à ce modèle qui à l'avantage d'être général, nous nous sommes bornés pour le moment au calcul du courant de court-circuit symétrique car c'est le courant le plus grand qui cause le plus de dégats. Pour cela nous avons utilisé la méthode des courbes de calcul laquelle, nous permet d'avoir le courant de cc pour différents temps; cette méthode se révèle assez précise.

Nous avons fait en sorte que notre modèle soit utilisé avec le maximum de rendement, en rappelant toutes les formules nécessaires au calcul au chapitre 1 et au chapitre 2 et en mettant au point un algorithme simple et optimal (chap.3), une notice simple par l'utilisateur du programme sur ordinateur en chapitre 5 (voir page 81) et enfin nous avons illustré notre méthode par un exemple et une application réelle à un réseau existant (SONELGAZ) en chapitre 4.

- La précision du calcul nous semble être satisfaisante quoique nous avons fait expressement dans certains cas d'avoir des résultats par excès.

Enfin il est bien évident que ce projet n'est que le commencement d'une étude d'importance vitale pour notre pays et nous espérons à l'avenir continuer dans cette voie et d'étendre notre étude, pour un premier temps, au calcul des courants de court-circuit non symétriques et plus tard, au réseau maillé du territoire national.

-----

ANNEXE :

## PROGRAMME FORTRAN

## C INTRODUCTION DES DONNEES

```

DIMENSION B(30,5,4, ),A(30),C(5),ACC(5),MT(100,100),SS(5),SB(5),XTRS(5),
S      U(100),AL(100),XO(100),XL(100),RO(100),RL(100),UCC1(100),
S      UCC2(100),DPC1(100),DPC2(100),ST1(100),ST2(100),XT1(100),
S      XT2(100),XT(100),RT1(100),RT2(100),RT(100),XRE(100),AIRE(100),
S      XRRE(100),X(100),R(100),XR(100),RR(100),ZR(100),SM(100),XM(100)
S      L1(5)

```

```

INTEGER NOM(330)

```

```

REAL NUM1,NUM2,NUM3,NUM4,NUM5,NUM6,NUM7

```

```

READ(5,1)((B(M,J,L),L=1,2),J=1,3),M=1,30)

```

```

1  FORMAT (12F6.3)

```

```

99 READ(5,2,END=50)N

```

```

2  FORMAT(I3)

```

```

DO 80 K=1,N

```

```

80 READ(5,3) (MT(K,J),J=1,N)

```

```

3  FORMAT(80I1)

```

```

READ(5,4)NS

```

```

4  FORMAT(I2)

```

```

READ(5,5)(L1(I),I=1,NS)

```

```

5  FORMAT(8I1)

```

```

READ(5,6)(SS(I),I=1,NS)

```

```

6  FORMAT(8F10.4)

```

```

READ(5,7)(SB(I),I=1,NS)

```

```

7  FORMAT(8F10.4)

```

```

READ(5,8)(XTRS(I),I=1,NS)

```

```

8  FORMAT(8F5.2)

```

```

READ(5,9)(U(K),K=1,N)

```

```

9  FORMAT(10F7.3)

```

```

READ(5,10)(SM(K),K=1,N)

```

```

10 FORMAT(10F7.3)

```

```

READ(5,11)(ST1(K),K=1,N)

```

```

11 FORMAT(10F7.3)

```

```

. )

```

```

      READ(5,12)(ST2(K),K=1,N)
12  FORMAT(10F7.3)
      READ(5,13)(DPC1(K),K=1,N)
13  FORMAT(10F7.4)
      READ(5,14)DPC2(K),K=1,N)
14  FORMAT(10F7.4)
      READ(5,15)(UCC1(K),K=1,N)
15  FORMAT(10F5.2)
      READ(5,16)(UCC2(K),K=1,N)
16  FORMAT(10F5.2)
      READ(5,17)(XRE(K),K=1,N)
17  FORMAT(12F5.2)
      READ(5,18)(AIRE(K),K=1,N)
18  FORMAT(12F5.2)
      READ(5,19)(AL(K),K=1,N)
19  FORMAT(10F7.3)
      READ(5,20)(XO(K),K=1,N)
20  FORMAT(10F6.3)
      READ(5,21)(RO(K),K=1,N)
21  FORMAT(10F7.4)
      READ(5,210)NM
210 FORMAT(I2)
      READ(5,211)(NOM(I),I=1,NM)
211 FORMAT(20A4)
C    CALCUL DES ELEMENTS DU RESEAU RADIAL
      WRITE(6,22)
22  FORMAT(1H1//)
      WRITE(6,210)(NOM(I),I=1,NM)
220 FORMAT(26X,20A4/)
      DO 49 I=1,NS
      WRITE(6,23)SS(I),SB(I)
23  FORMAT(///,25X,'PUISSANCE DU SYSTEME =',F10.4,'MVA',5X,'PUISSANCE
S DE BASE =',F10.4,'MVA')
      WRITE(6,24)
24  FORMAT(25X;35(1H*),5X,32(1H*)//)

```

```

WRITE(6,25)
25 FORMAT(80X,'T=INFINI',10X,'T=0.2 SEC',10X,'T=C.0 SEC'/)
WRITE(6,26)
26 FORMAT(3X,'K',7X,'U EN KV',12X,'RES-RED',10X,'REAC-RED',10X,'IMPD-
S RED',10X,'ICC EN KA',10X,'ICC EN KA',11X,'ICC EN KA'/)
DO 48 K=1,N
IF(ST1(K))28,27,28
27 XT(K)=0.
RT(K)=0.
GO TO 31
28 XT1(K)=UCC1(K)*SB(I)/(100.*ST1(K))
RT1(K)=DPC1(K)*SB(I)/(ST1(K)*ST1(K))
IF(ST2(K))30,29,30
29 XT(K)=XT1(K)
RT(K)=RT1(K)
GO TO 31
30 XT2(K)=UCC2(K)*SB(I)/(100.*ST2(K))
RT2(K)=DPC2(K)*SB(I)/(ST2(K)*ST2(K))
NUM1=XT1(K)*XT2(K)*(XT1(K)+XT2(K))
NUM2=XT1(K)*RT2(K)*RT2(K)
NUM3=XT2(K)*RT1(K)*RT1(K)
NUM4=RT1(K)*RT2(K)*(RT1(K)+RT2(K))
NUM5=RT1(K)*XT2(K)*XT2(K)
NUM6=RT2(K)*XT1(K)*XT1(K)
DNUM1=(RT1(K)+RT2(K))*(RT1(K)+RT2(K))+(XT1(K)+XT2(K))*(XT1(K)+
S XT2(K))
XT(K)=(NUM1+NUM2+NUM3)/DNUM1
RT(K)=(NUM4+NUM5+NUM6)/DNUM1
31 IF(AIRE(K))33,32,33
32 XRRE(K)=0.
GO TO 34
33 XRRE(K)=XRE(K)*SB(I)/(173.*AIRE(K)*U(K))
34 XL(K)=XO(K)*AL(K)*SB(I)/(U(K)*U(K))
RL(K)=RO(K)*AL(K)*SB(I)/(U(K)*U(K))
X(K)=XT(K)+XRRE(K)+XL(K)

```

```

R(K)=RT(K)+RL(K)
C  CALCUL DU COURANT DE COURT_CIRCUIT
XR(K)=XTRS(I)*SB(I)/SS(I)
RR(K)=0.
DO 35 J=1,K
XR(K)=XR(K)+MT(K,J)*X(J)
RR(K)=RR(K)+mt(K,J)*R(J)
35 CONTINUE
IF(SM(K)-2*SB(I)/1000.)37,36,36
36 XM(K)=0.2*SB(I)/SM(K)
NUM7=XR(K)*XM(K)*(XR(K)+XM(K))+RR(K)*XM(K)*(RR(K)+XM(K))
DNUM2=RR(K)*RR(K)+(XR(K)+XM(K))*(XR(K)+XM(K))
XR(K)=NUM7/DNUM2
RR(K)=RR(K)*XM(K)*XM(K)/DNUM2
37 ZR(K)=SQRT(XR(K)*XR(K)+RR(K)*RR(K))
IF(ZR(K)-3.)38,38,46
38 L=L1(I)
DO 44 J=1,3
M=1
39 A(M)=0.1*I
IF(ZR(K)-A(M))41,41,40
40 M=M+1
GO TO 39
41 C(J)=B(M,J,L)
GO TO 43
42 C(J)=B(M-1,J,L)+10.*(B(M,J,L)-B(M-1,J,L))*(ZR(K)-A(M))
43 ACC(J)=C(J)*SB(I)/(1.73*U(K))
44 CONTINUE
WRITE(6,45)(K,U(K),RR(K),XR(K),ZR(K),(ACC(J),J=1,3))
45 FORMAT(1X,I3,5X,F7.3,6(10X,F8.4)/)
GO TO 48
46 CC=SB(I)/(1.73*ZR(K)*U(K))
WRITE(6,47)(K,U(K),RR(K),XR(K),ZR(K),CC,CC,CC)
47 FORMAT(1X,I3,5X,F7.3,6(10X,F8.4)/)
48 CONTINUE
49 CONTINUE
GO TO 99
50 STOP
END

```

BIBLIOGRAPHIE :

✓ COURS de "calcul des réseaux"

Dr. Ing. G. CIRTINA  
(E.N.P.A 1974)

COURS de "Centrales et Postes"

Dr. Ing. PREDA  
(E.N.P.A 1975)"Processus électromagnétiques transitoires" V. OULIANOV  
(Moscou 71)"Les réseaux d'énergie électrique" R. PELISSIER  
(Dunod 71)

"FORTRAN IV"

M. DREYFUS  
(Dunod 70)