

17/75

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

ret

DEPARTEMENT ELECTRICITE

# PROJET DE FIN D'ETUDES



## ANALYSEUR DE RESEAU

3 PLANCHES



Proposé par :

Gh. CIRTINA

Doct. - Ing.

Etudié par :

Br. MEFTAH

PROMOTION 1975

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département Electricité

PROJET DE FIN D'ETUDES

ANALYSEUR DE RESEAU

Proposé par :

Gh.CIRTINA

Doct. Ing.

Etudié par :

Br. MEFTAH

PROMOTION 1975 /

A mes PARENTS

A mes AMIS (ES)

Alger - juin 75 ...

Brahim MEFTAH

\*\*\*\*\*  
\*  
\* AVANT PROPOS \*  
\*  
\*\*\*\*\*

Que tous les professeurs qui ont contribué à ma formation  
veuillent bien trouver dans ce modeste ouvrage le témoignage  
de ma profonde gratitude et l'expression de ma vive amitié.

Je tiens particulièrement à assurer Mrs CIRTINA et STRIAPAN  
de toute ma reconnaissance pour les conseils et encouragements  
qu'ils n'ont cessé de me prodiguer durant l'élaboration de cette  
étude .

Qu'il me soit permis d'exprimer ma vive sympathie à tous  
les membres du service "contrôle électrique central" de SONEGAS  
et tout particulièrement à l'ingénieur en chef Mr BEN ABID de  
leur hospitalité et de l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail .

Je ne saurais oublier de remercier vivement le service  
"formation" de SONEGAS pour l'assistance qu'il m'a prêtée dans  
la confection de ce fascicule .

Je remercie enfin tous les amis(es) qui m'ont aidé dans la ré-  
daction de ce travail, et les assure de ma sympathie la plus  
profonde .

Alger - juin 75 ...

Brahim MEFTAH

## I N T R O D U C T I O N

La dépendance de notre civilisation contemporaine vis à vis de l'énergie sous son aspect électrique est devenue telle qu'il est courant de mesurer le niveau de développement d'un pays par la quantité d'électricité consommée en moyenne par habitant.

Cela explique l'évolution toujours perpétuelle et croissante de la structure des réseaux énergétiques ... Le bon fonctionnement d'un tel système est tributaire d'une surveillance poussée et d'un contrôle permanent des équipements existants tant en régime normal qu'en régime troublé. Ce contrôle nécessite que l'on sache prévoir quels sont les transits dans les différents éléments du réseau pour les différentes situations susceptibles de se présenter. On aura affaire soit à un calcul de répartition des charges ou de stabilité soit à une évaluation des surintensités ou sur-tensions transitoires.

Dans la pratique de l'exploitation des réseaux on s'intéresse à connaître la valeur des courants de court-circuit dans les différents points du réseau. Ceci est indispensable pour le choix de l'appareillage électrique et pour l'élaboration du système de protection.

Souvent, on sera amené à introduire des hypothèses de simplification qui sont fonction du résultat qu'on désire obtenir. Il va sans dire que plus le degré de précision est élevé, plus la simplification sera réduite, donc des calculs plus longs et plus ardu ; ce qui nécessite l'utilisation de moyens plus puissants mais aussi plus chers. Il s'agit là d'un choix, et la décision de vouloir obtenir telle ou telle précision doit nécessairement découler d'une étude économique et donc de la comparaison entre le coût des moyens utilisés et l'espérance mathématique du gain susceptible d'être obtenu. Ce gain est souvent difficile à estimer et l'on doit souvent se contenter de justifications à posteriori. Mais dans tous les cas où le gain probable est sûrement inférieur au coût du système à employer, il ne faut pas hésiter à s'en passer. Cette remarque évidente est pourtant souvent difficile à faire admettre.

Partant de ce principe, on s'est proposé d'analyser la situation actuelle du réseau algérien de transport électrique, compte tenu des travaux qui sont en cours de réalisation ou qu'on envisage de réaliser dans un proche avenir. On trouve alors qu'un analyseur à courant continu pour le calcul des courants de court circuit est peut être celui qui présente le meilleur avantage.

Dans le but de rendre à ce travail plus de systématisation et plus de facilité à la compréhension on l'a divisé en deux parties distinctes : la première constituant le support théorique de la seconde. C'est ainsi qu'on a été amené à faire d'abord un tour d'horizon sur la façon d'analyser les réseaux triphasés en régime équilibré puis en régime déséquilibré, en régime permanent puis en régime troublé. Ensuite on s'est attaché à développer le calcul général des courants de court - circuits pour voir enfin les divers modèles et auxiliaires de calcul utilisés dans le monde pour l'analyse des réseaux .... La seconde partie débutera par une description assez détaillée du réseau algérien de transport HT/THT, ainsi que des outils d'analyse des réseaux dont dispose la SONELGAZ ou envisage d'acquérir dans les cinq (5) années avenir. Une brève discussion économique nous amènera enfin à justifier notre choix porté sur la table à calcul à courant continu et à aborder le calcul d'un tel analyseur dans le cas du réseau national de transport de l'électricité en HT et THT.

-----

I - GENERALITES SUR LES RESEAUX ELECTROENERGETIQUES

Les systèmes de production et de transport d'énergie électrique sont par constitution symétriques et soumis à des forces électro - motrices triphasées équilibrées. Les appareils industriels, la plus part des moteurs, sont également par constitution triphasés symétriques. Cependant les appareils de faible consommation, tels que les appareils électroménagers ou les lampes d'éclairage, ils sont branchés entre une phase et le neutre. Mais comme ces appareils sont en très grand nombre et qu'on les répartit à peu près régulièrement entre les 3 phases leur ensemble constitue statistiquement un système équilibré. Par conséquent, l'ensemble formé par les circuits de production, de transport et de consommation de l'énergie électrique est un système symétrique soumis à des f e m équilibrées.

Cependant des dissymétries importantes, de deux types, peuvent se produire :

dissymétrie du 1er type : elle est due à la présence d'un appareil de grosse consommation qui soit par nature monophasé (ligne de chemin de fer alimentée en monophasé).

dissymétrie du 2° type : elle apparaît lorsqu'il survient un défaut dans le réseau (court-circuit, coupure de phases etc ....)

La connaissance des tensions et des courants dans le réseau est nécessaire que le fonctionnement soit caractérisé par la symétrie ou la dissymétrie. Dans le premier cas, l'étude est facile, puisque, comme on va le voir, elle se ramène à celle d'un réseau monophasé simple grâce à l'utilisation de la notion d'impédance et d'admittance cycliques. Dans le 2° cas cette méthode n'est plus applicable mais on peut cependant étudier le réseau dans son ensemble au moyen des composantes symétriques.

## 1.1 - Représentation monophasé d'un système triphasé équilibré

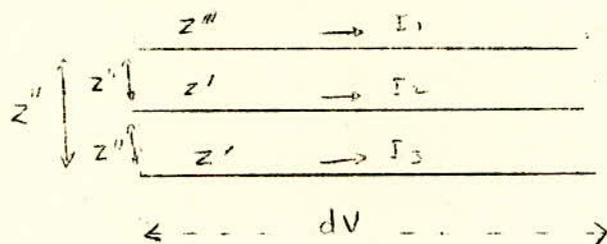
### 11.1 - Impédances et admittances effectives ou cycliques ((1))

Les conducteurs, les enroulements des générateurs et des récepteurs de chaque phase d'un système triphasé symétrique possèdent chacun une impédance propre, mais sont aussi, le plus souvent, couplés entre eux par mutuelle inductance ou par capacité.

La mise en équation d'un tel circuit conduit à un système de 3 équations à 3 inconnues assez ardu à résoudre dans le cas général. Mais, on va montrer sur deux exemples simples, comment il est possible de remplacer les circuits réels par des circuits fictifs équivalents dans lesquels les conducteurs ou les enroulements de phases ne sont plus couplés entre eux et peuvent être considérés comme totalement indépendants.

\* impédance cyclique

Soit un élément de longueur finie d'un système de conducteurs triphasés parcouru par des courants triphasés équilibrés. On note par  $z'$  l'impédance propre de chaque élément et par  $z''$  l'impédance mutuelle entre deux éléments.



on :

$$dV_1 = z' I_1 + z'' I_2 + z'' I_3$$

$$dV_2 = z'' I_1 + z' I_2 + z'' I_3$$

$$dV_3 = z'' I_1 + z'' I_2 + z' I_3$$

courants équilibrés  $\Rightarrow I_1 + I_2 + I_3 = 0$

$$\text{d'où : } d V_1 = (Z' - Z'') I_1$$

$$d V_2 = (Z' - Z'') I_2$$

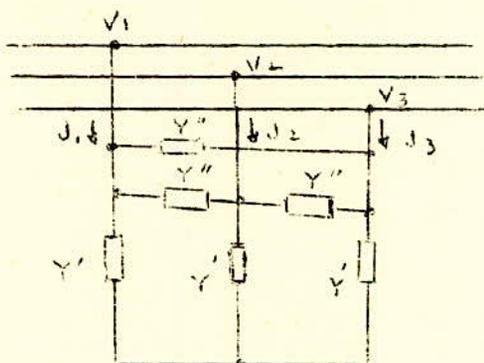
$$d V_3 = (Z' - Z'') I_3$$

Ainsi tout se passe comme si chaque conducteur possède une impédance propre  $(Z' - Z'')$  et pas d'induction mutuelle avec les conducteurs des autres phases.

L'impédance  $(Z' - Z'')$  est appelée impédance cyclique ou impédance effective par phase.

\* admittance cyclique  
.....

On alimente par des tensions triphasées équilibrées un récepteur symétrique possédant une admittance propre  $Y'$  par phase et une admittance  $Y''$  entre phase.



$$J_1 = Y' V_1 + Y'' (V_1 - V_2) + Y'' (V_1 - V_3)$$

$$J_2 = Y' V_2 + Y'' (V_2 - V_3) + Y'' (V_2 - V_1)$$

$$J_3 = Y' V_3 + Y'' (V_3 - V_1) + Y'' (V_3 - V_2)$$

$$\text{Tensions équilibrés } \Rightarrow V_1 + V_2 + V_3 = 0$$

d'où

$$J_1 = (Y' + 3Y') V_1 = Y_c V_1$$

$$J_2 = (Y' + 3Y'') V_2 = Y_c V_3$$

$$J_3 = (Y' + 3Y''') V_3 = Y_c V_3$$

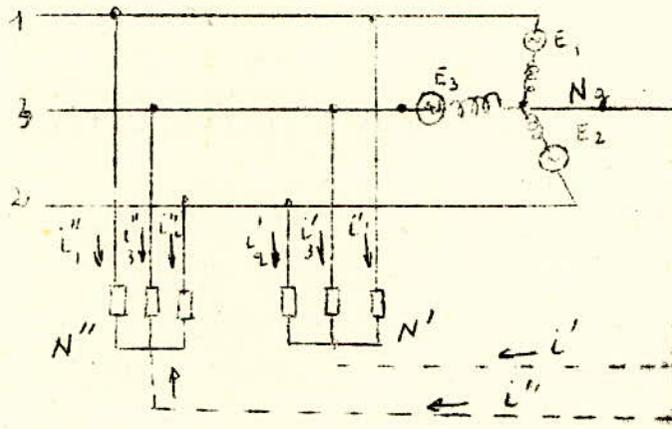
là aussi, grâce à l'introduction de l'admittance cyclique

$$Y_c = Y' + 3Y''$$

on obtient 3 équations identiques et indépendantes.

### 11.2 - Propriétés des points neutres

Lorsqu'on regroupe en étoile 3 éléments (générateurs ou récepteurs) le centre de l'étoile est appelé "point neutre". Soit donc un générateur triphasé équilibré débitant sur un ensemble de récepteur triphasés symétriques, tous couplés en étoile.



La loi des noeuds permet d'écrire :

$$\text{noeud } N' \text{ ----- } i' + i'_{1} + i'_{2} + i'_{3} = 0$$

$$\text{noeud } N'' \text{ ----- } i'' + i''_{1} + i''_{2} + i''_{3} = 0$$

Comme le système est triphasé et équilibré alors :

$$i'_{1} + i'_{2} + i'_{3} = 0$$

$$i''_{1} + i''_{2} + i''_{3} = 0$$

et  $\begin{cases} i' = 0 \\ i'' = 0 \end{cases} \text{ ===== } N', N'', N_g \text{ sont au même potentiel}$

Donc : En régime triphasé équilibré, tous les points neutres des éléments couplés <sup>en Y</sup> sont portés au même potentiel.

Dans les réseaux de transport d'énergie électrique on relie souvent un ou plusieurs points neutres à une prise de terre par une connexion d'impédance nulle ou non nulle. Cette connexion est, au cours du fonctionnement normal, parcourue par un courant identiquement nul et par conséquent tous les points neutres du réseau se trouvent au potentiel du sol.

D'ailleurs, même si tous les points neutres sont isolés de la terre on peut montrer qu'ils sont au même potentiel qu'elle. En effet chaque phase présente par rapport à la terre une capacité qui se trouve en parallèle avec la résistance des parties isolantes. Cet ensemble de capacités et de résistances d'isolement forme un circuit en étoile dont le point neutre est constitué par la terre elle-même.

### 11.3 - Schéma monophasé équivalent d'un système triphasé symétrique

De ce qui précède on voit que :

- les points neutres réels ou fictifs sont tous au même potentiel, et on peut donc les relier par un conducteur fictif dépourvu d'impédance.
- la notion d'impédance ou d'admittance cyclique permet de considérer chaque phase comme indépendante des autres .

Ces deux points permettent d'énoncer :

"L'étude de tout circuit triphasé se ramène à celle d'un simple circuit monophasé constitué par l'une des phases choisie arbitrairement et par un conducteur neutre sans impédance. Les tensions et les f.e.m considérées seront des grandeurs simples étoilées et les courants seront les courants de phase".

## 1.2 Aperçu sur la théorie des composantes symétriques

Il existe deux manières d'introduire la notion des composantes symétriques.

### 12.1 - La méthode géométriques : ((1))

Elle repose essentiellement sur la propriété géométrique suivante :

" tout système de  $m$  vecteurs quelconques peut être décomposé en  $m$  systèmes symétriques de  $m$  vecteurs ".

\* cas du système triphasé  $m = 3$  :

soit  $V_a$  ;  $V_b$  ;  $V_c$  les trois vecteurs. On définit 3 autres vecteurs  $V_h$  ,  $V_d$  ,  $V_i$  tels que :

$$V_h = \frac{V_a + V_b + V_c}{3}$$

$$V_d = \frac{V_a + a V_b + a^2 V_c}{3}$$

$$V_i = \frac{V_a + a^2 V_b + a V_c}{3}$$

où  $(a)$  est la racine cubique de l'unité.

en écriture matricielle :

$$\begin{pmatrix} V_h \\ V_d \\ V_i \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix}$$

comme :  $\det \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \neq 0 \implies$  Les vecteurs  $V_h, V_d, V_i$  sont indépendants.

inversement on a :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_h \\ V_d \\ V_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_h + V_d + V_i \\ V_h + a^2 V_d + a V_i \\ V_h + a V_d + a^2 V_i \end{pmatrix}$$

En considérant le dernier membre du système précédent on remarque que :

- les premiers termes, tous égaux à  $V_h$  constituent un système tripolaire symétrique d'ordre 0 que l'on appelle système homopolaire.
- les seconds termes  $V_d, a^2 V_d, a V_d$ , constituent un système tripolaire symétrique à succession directe d'ordre 1 qu'on appellera système direct.
- Les troisièmes termes  $V_i, a V_i, a^2 V_i$ , constituent un système tripolaire symétrique à succession inverse d'ordre 1 qu'on appellera système inverse.

La matrice  $F = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix}$  est nommée matrice de FORTESCIEU.

ou matrice des composantes symétriques non normée.

### 12.2 - La méthode des transformées ((3))

Elle consiste à appliquer au système de tensions

$V_a$   
 $V_b$  et courants  $\begin{matrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{matrix}$  une transformation (F) telle qu'elle  
 $V_c$

transforme la matrice cyclique des impédances en une matrice diagonale.

On vérifie que la transformation définie par la matrice

$F = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix}$  satisfait à la condition imposée.

en effet :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z & Z' & Z'' \\ Z'' & Z & Z' \\ Z' & Z'' & Z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = [Z]_{a,b,c} \cdot [I]_{a;b;c}$$

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} V_h \\ V_d \\ V_i \end{pmatrix} &= F^{-1} \begin{pmatrix} Z & Z' & Z'' \\ Z'' & Z & Z' \\ Z' & Z'' & Z \end{pmatrix} F \cdot \begin{pmatrix} I_h \\ I_d \\ I_i \end{pmatrix} \\
 &= \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Z & Z' & Z'' \\ Z'' & Z & Z' \\ Z' & Z'' & Z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_h \\ I_d \\ I_i \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} Z + Z' + Z'' & 0 & 0 \\ 0 & Z + aZ' + a^2 Z'' & 0 \\ 0 & 0 & Z + a^2 Z' + aZ'' \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_h \\ I_d \\ I_i \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} Z_h & 0 & 0 \\ 0 & Z_d & 0 \\ 0 & 0 & Z_i \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_h \\ I_d \\ I_i \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

$Z_h, Z_d, Z_i$  forment donc les valeurs propres de  $Z$   $a, b, c$  et les trois colonnes de la matrice  $F$  en définissent les directions propres. Dans la mesure où  $Z_h, Z_d, Z_i$  sont des grandeurs différentes les unes des autres, la matrice  $F$  définit le seul changement d'espace qui permet la diagonalisation de la matrice  $Z$   $a, b, c$ .

Dans le cas où  $Z_d = Z_i$  -ce qui se produit si  $Z' = Z''$ ) (cas des réseaux triphasés) alors, il existe une infinité de changement d'espace permettant la diagonalisation de  $Z$   $a, b, c$  et le changement d'espace défini par  $F$  n'en est qu'un cas particulier.

En effet on peut arriver à des résultats analogues en utilisant d'autres systèmes de composantes parmi lesquels on peut citer ceux d'EDITH - CLARKE, de CONCORDIA, de KIMBARK etc .....

## II - CALCUL DES RESEAUX

### 21 - Réseaux en régime permanent : ((2))

Là, le système triphasé est supposé à symétrie totale donc son étude se ramène à celle d'un réseau monophasé où la loi des mailles et la loi des noeuds sont facilement applicables (du moins théoriquement).

Les méthodes topologiques sont très pratiques surtout grâce au développement des machines à calculer arithmétiques ainsi qu'à l'élaboration de programmes de plus en plus étudiés.

Dans tous les cas il s'agit de définir l'état électrique du réseau d'énergie. Cet état peut être caractérisé par l'une des grandeurs suivantes :

- les tensions  $V$  imposées en chaque noeud ;
- les courants  $J$  injectés en chaque noeud ;
- les écarts de tension  $d.V$  le long des branches ;
- les courants  $I$  circulant dans les branches.

Les relations liant ces grandeurs s'expriment en écriture matérielle par :

$$* (1) \{dV\} = \{z\} \cdot \{I\} \quad \text{ou} \quad \{I\} = \{y\} \cdot \{dV\}$$

avec  $\{z\}$  = matrice diagonale des impédances de branches  
 $\{y\}$  = matrice diagonale des admittances de branches.

$$* (2) \{V\} = \{Z\} \{I\} \quad \text{ou} \quad \{J\} = \{Y\} \cdot \{V\}$$

avec  $\{Z\}$  = matrice des impédances de transfert ;  
 $\{Y\}$  = " " des admittances en court-circuit.

Pratiquement c'est l'équation  $\{V\} = \{Z\} \cdot \{J\}$  qu'on utilise mais sous une autre forme car en réalité dans un réseau énergétique les tensions ne sont contrôlées qu'en module dans une certaine plage et au lieu des courants  $J$  ce sont les puissances qu'on injecte aux noeuds. On a alors un système d'équations non linéaires et le problème n'est pas soluble dans le cas général.

Il faudra procéder à la linéarisation des équations et nous serons alors obligés de faire des approximations, d'admettre des hypothèses simplificatives ... Mais il faut qu'à chaque étape de calcul vérifier qu'on se trouve bien dans le domaine de validité des hypothèses formulées.

## 2.2 - Réseaux en régimes troublés.

L'étude des régimes troublés du système de production d'énergie est d'une grande importance puisque dans de tels états, le réseau se trouve dans des conditions anormales de fonctionnement. Il y a apparition de contraintes dangereuses pour la vie des installations, parmi ces régimes troublés on peut citer :

- les court-circuits
- les coupures de phases ;
- les pertes de synchronisme ...

Le court circuit est de loin de plus utile à analyser car :

- c'est une avarie très grave pour le réseau électroénergétique.
- il se produit souvent
- les deux autres types de défauts en sont souvent une conséquence directe.

### 22.1 - \* Définition du court-circuit

On désigne par court circuit tout contact imprévu entre les phases du réseau ou entre les phases et le sol. Ce contact se fait généralement par l'intermédiaire d'arcs électriques.

### 22.2 - \* Causes du Court-circuit : ((4))

Elles sont de quatre types :

- électriques : dégradation de l'isolation ou claquage de celle-ci à la suite des surtensions, de l'humidité ou du vieillissement.

- Mécaniques : rupture d'un conducteur (choc ..), d'un isolateur, contact d'un corps étranger avec les conducteurs (oiseaux, branches ....)
- atmosphériques : foudre - neige - verglas - tempête
- Fausses manoeuvres : ouverture d'un sectionneur en charge, ... etc.

### 22.3 - \* Conséquences du court-circuit : ((4))

La présence d'un court-circuit sur un réseau conduit à :

- a) des échauffements exagérés : Pendant un court-circuit il y a une circulation de courants très intenses (10 à 50 fois le courant normal) qui portent les cables à des températures élevées en quelques fractions de seconde.
- b) des effets électrodynamiques anormaux qui déforment (et même font éclater) les jeux de barres, les bobinages des transformateurs et les isolateurs.
- c) des accidents d'interrupteurs : le courant de court-circuit peut atteindre des valeurs telles que sa coupure par les interrupteurs chargés d'isoler l'élément défectueux devient très difficile.
- d) des chutes de tensions élevées : la circulation de courants très intenses conduit à des chutes de tension élevées ce qui risque d'entraîner le décrochage des machines synchrones et asynchrones.
- e) des pertes de synchronisme : le court-circuit étant principalement de nature réactive, il conduit à l'emballement des turbines et à une mise hors synchronisme des alternateurs correspondants.
- f) des perturbations dans les circuits de télécommunication qui suivent un trajet parallèle aux lignes d'énergie : Il y a possibilité de forces électromotrices dangereuses pour le personnel et les installations à cause du courant circulant dans le sol.

#### 22.4 \* Types de court-circuits : ((5))

Suivant le nombre de phases intéressées ou distinguées :

- court-circuit monophasé à la terre : PN ;
- court-circuit biphasé : 2 P ;
- court-circuit biphasé à la terre : 2 PN ;
- court-circuit triphasé : 3 P ;

Dans la majorité des cas (surtout pour les réseaux de transport THT et HT) les court-circuits se produisent ou tout au moins débutent entre une phase et la terre .... Les défauts 2 P sont très rares et sont presque toujours dûs à une cause mécanique telle que la mise en contact d'une phase avec une autre à la suite de sa coupure.

TYPE	SYMBOLE	PROBABILITE
Monophasé	PN	65 %
Biphasé à la terre	2 PN	20 %
Biphasé	2 P	10 %
TRiphasé	3 P (N)	5 %

#### 22.5 \* Processus du Court-circuit ((2))

Le processus de court-circuit débute par un régime transitoire de très faible durée qui est dû à l'apparition d'un échelon de tension qui se propage le long des lignes pour atteindre en quelques microsecondes les différents appareillages des postes. Ceux-ci excités par l'échelon de tension qui y arrive plus ou moins amorti et divisé par des réflexions et transmissions successives, engendrent des phénomènes oscillants dont les fréquences sont généralement de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de Hertz ... Leur action d'ensemble peut être synthétisée par l'indication d'une fréquence dominante dite fréquence propre du réseau.

Ces phénomènes oscillants s'amortissent en quelques périodes et la durée du régime transitoire ne dépasse guère le centième de seconde. En effet il s'établit un nouveau régime, quasi stable caractérisé par des courants élevés et dangereux, résultat de la superposition d'une composante apériodique et d'une composante périodique.

La composante apériodique a une durée de vie assez brève, ne dépassant pas quelques centièmes de seconde et son amplitude est fonction de l'instant auquel a lieu le court-circuit ... Le régime en question est dit quasi stable car au bout d'un délai de quelques dixièmes de secondes (ou même de secondes), l'action des mécanismes de régulation se fait sentir.

Mais pendant ce temps les turbines continuent à fournir aux alternateurs la même puissance mécanique :

$$P = \frac{E V}{X} \sin \theta$$

La réactance  $X$  de l'expression précédente varie en fonction du temps. Aussi si le court-circuit ne dure que quelques centièmes de seconde  $X$  sera la réactance subtransitoire qu'on désigne par  $X''$ .

Si le court-circuit se continue pendant plusieurs dixièmes de seconde (comme c'est le cas dans les réseaux actuels) on utilisera la réactance transitoire  $X'$  et s'il se prolonge au delà de la seconde la réactance synchrone  $X$ .

#### 22.6 \* Hypothèses simplificatrices utilisées dans un calcul de court-circuit : ((4)) ; ((5))

Ils dépendent du calcul envisagé. En général, on considère que :

- le phénomène transitoire aux fréquences propres du réseau est négligeable ;
- Pendant le régime quasi stable, les courants sont élevés et les tensions sont réduites. Il en résulte que les énergies réactives mises en jeu dans les capacités des lignes restent faible par rapport à celles qui sont absorbées par

les inductances de ces lignes. On peut donc négliger les capacités des lignes et représenter celles-ci par les dipôles.

Ceci n'est vrai cependant que pour les réseaux de transport HT. Dans le cas des réseaux MT, et particulièrement des câbles souterrains MT, les énergies capacitatives ne sont plus négligeables surtout si le court-circuit a lieu à travers une impédance qui limite fortement l'intensité :

- les circuits magnétiques sont non saturés ;
- les résistances des lignes aériennes sont négligeables devant les réactances (On donnera un exemple numérique pour appuyer cette affirmation dans le cas du réseau HT algérien) ;
- les charges sont négligeables (à l'exception de moteurs situés à proximité du court-circuit et dont la puissance dépasse 1 MVA) ;
- La composante aperiodique du courant ne doit être prise en considération que dans le cas du calcul des sollicitations thermiques ou électrodynamiques.

## 22 - 7 \* Calcul des courants de Court-Circuit : ((2))

Le courant de court-circuit est l'une des grandeurs  $\times$  essentielles qu'il faudrait calculer pour évaluer l'importance des effets néfastes susceptibles d'apparaître en cas de pareil défaut . Ce calcul <sup>n</sup>consistera à déterminer pour chaque type de court-circuit le courant J dans le défaut lui-même et les courants I dans les lignes que vont couper les disjoncteurs.

L'utilisation des composantes symétriques rendent le problème assez simple surtout que dans notre cas la cause unique de la dissymétrie est le court-circuit lui-même. On aura par conséquent 3 simples réseaux monophasés (direct, inverse, homopolaire) découplés entre eux et dépourvus de f.e.m (sauf le premier).

On fera un gain de temps appréciable si on tient compte de la remarque suivante :

"Prendre toujours pour phase de référence une phase de symétrie".

Ex : Court-circuit PN ---- phase en court-circuit  
 " " " 2P ----) ----phase saine  
 2 PN )

Dans son ensemble le régime de court circuit est considéré comme formé par la superposition de deux régimes :

a) Un régime antérieur au court-circuit (en absence de défaut) caractérisé par :

- des f.e.m symétriques (directes) appliquées au réseau.

- 3 tensions simples au point  $P_1$  où va apparaître le défaut

$$V_{ao} = V_n \quad ; \quad \bar{V}_{bo} = a^2 V_n \quad ; \quad V_{co} = a V_n$$

avec :

$$\begin{cases} 0. V_{ho} = 0 \\ 0. V_{io} = 0 \\ 1. V_{do} = V_{do} \end{cases}$$

b) Un régime additionnel caractérisé par :

- Un réseau ayant les f.e.m des groupes générateurs court circuités mais où on impose 3 tensions  $V_{aa}$ ,  $\bar{V}_{ba}$ ,  $V_c$  au point P entre le neutre et les 3 phases A,B,C tel que :

Tension V pendant le court-circuit =  $V_n + V$  additionnel  
 Les composantes symétriques de cette tension V s'écrivent :

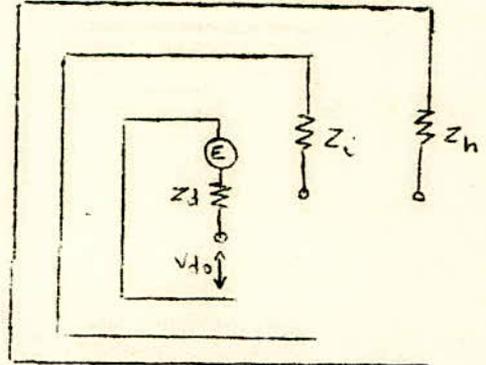
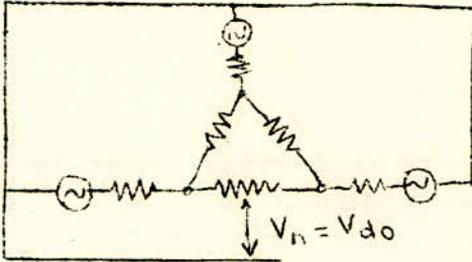
$$V_d = V_{do} + V_{da} \quad ; \quad V_i = V_{ia} \quad ; \quad V_h = V_{ha}$$

Le courant total J dans le défaut est alimenté seulement par les 3 phases du régime additionnel c'est à dire :

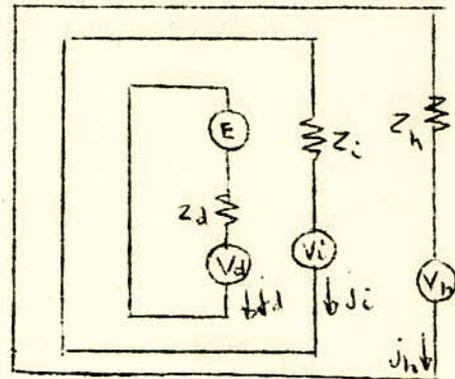
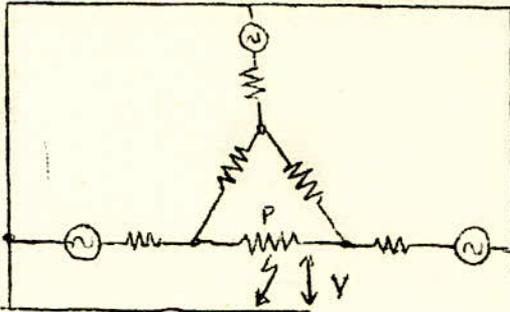
$$J_d = J_{da} \quad ; \quad J_i = J_{ia} \quad ; \quad J_h = J_{ha}.$$

On peut résumer tout ceci dans les schémas suivants :

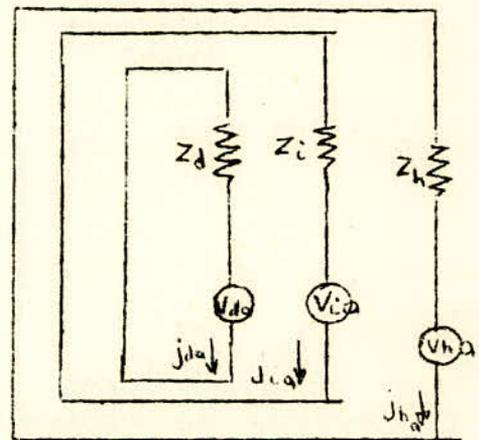
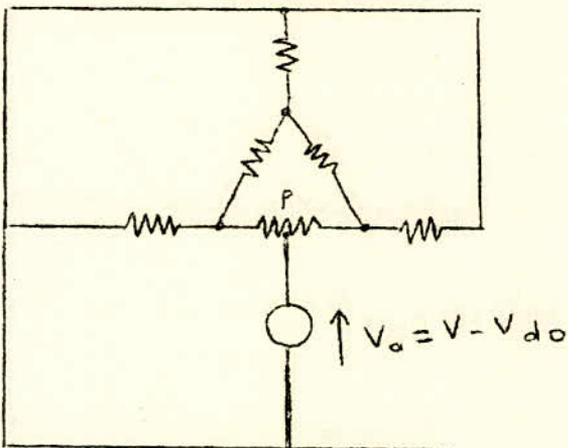
etat initial



etat final de court-circuit



etat additionnel



On remarque que :

Le calcul du courant total dans le défaut ne nécessite que 3 calculs de réseau, alors que le calcul du courant dans les branches nécessite en plus le calcul du régime antérieur au défaut.

D'une façon générale le problème consiste à résoudre un système d'équations à 6 inconnues : 3 tensions simples symétriques  $V_h, V_i, V_d$  et 3 courants symétriques  $J_h, J_i, J_d$ .

Entre ces 6 grandeurs on a :  
3 relations fournies par la nature du court-circuit.

Nature du C.C.	Relation entre grandeur de phase	Relation entre composants symétrique
3 P Franc	$V_a = V_b = V_c = 0$	$V_d = V_i = V_h = 0$
2 PN Franc	$V_2 = V_3 = 0$ $J_a = 0$	$V_d = V_i = V_h$ $J_d = J_i + J_h = 0$
2 P Franc	$V_b = V_c ; J_a = 0$ $J_b + J_c = 0$	$V_d = V_i$ $J_h = 0 ; J_d + J_i = 0$
PN (Résistant)	$V_a = R J_a ;$ $J_b = J_c = 0$	$J_d = J_i = J_h$ $V_d + V_i + V_h - 3 R J_h = 0$

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_h \\ V_d \\ V_i \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} J_h \\ J_d \\ J_i \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} J_a \\ J_b \\ J_c \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} V_h \\ V_d \\ V_i \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix}$$

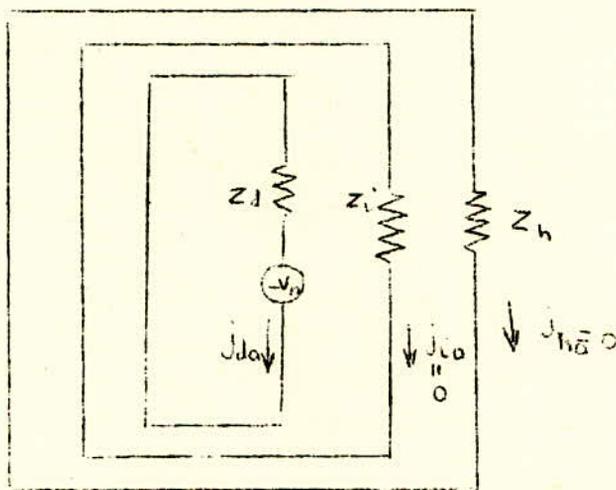
Les 3 autres relations nécessaires seront formées par application du théorème de superposition et l'utilisation des lois d'ohm et de Kirchoff aux 3 réseaux découplés du régime additionnel, bien qu'on peut aussi employer la méthode des connexions qui consiste à réaliser un groupement approprié des schémas direct, inverse et homopolaire de ce régime de façon à satisfaire aux conditions limites imposées par la nature du court-circuit.

Cette dernière méthode permet une résolution assez prompte surtout dans le cas de table de calcul.

APPLICATION :

Court - circuit triphasé :

$$v = 0 \implies V_a = V \quad i_a = -i_b = -i_c = -i_n$$



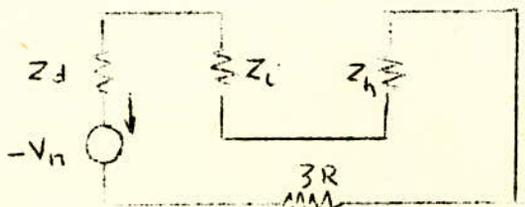
Court-circuit monophasé résistant :

$$i_d = i_i = i_h$$

$$V_d + V_i + V_h + 3 R J_h = 0$$

$$V_a = V \leftarrow V_h \rightarrow \rightarrow V_{da} = V_d \leftarrow V_n$$

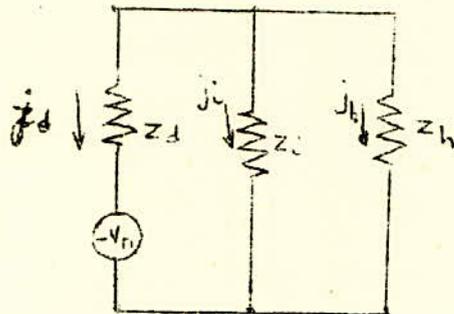
$$+ V_n + (V_{da} + V_{ia} + V_{ha}) + 3 R J_h = 0$$



$$\Rightarrow J_{da} = J_{ia} = J_{ha} = \frac{J}{3} = \frac{-V_n}{Z_d + Z_i + Z_h + 3R}$$

Court circuit biphasé franc à la terre =

conditions limites ( $V_d = V_i = V_h$  d'autre part  $V_{da} = V_d + V_n$ )  
 $(J_d + J_i + J_h = 0)$



On tire /

$$J_d = J_{da} = \frac{-V_n}{Z_d + (Z_i/Z_h)} = \frac{-V_n}{Z_d + \frac{Z_i Z_h}{Z_i + Z_h}} =$$

$$\frac{-V_n (Z_i + Z_h)}{Z_d Z_i + Z_d Z_h + Z_i Z_h}$$

$$J_{ia} = J_{ha} = \frac{-J_{da} Z_h}{Z_i + Z_h} = \frac{V_n Z_h}{Z_i + Z_h (Z_d + \frac{Z_i Z_h}{Z_i + Z_h})}$$

$$= \frac{Z_h}{Z_i Z_d + Z_h Z_d + Z_i Z_h} V_n$$

$$J_h = \frac{Z_i}{Z_i Z_d + Z_h Z_d + Z_i Z_h} V_n$$

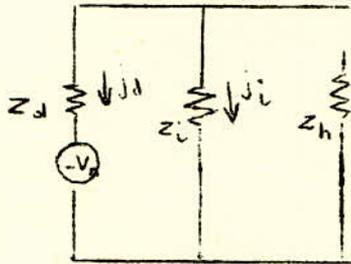
$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_h \\ J_d \\ J_i \end{pmatrix}$$

$$I_a = 0$$

$$\begin{aligned} I_b + I_c &= 2 J_h + J_d \cdot (a^2 + a) + J_i \cdot (a + a^2) \\ &= 2 J_h + (J_d + J_i) (a + a^2) = 2 J_h - (J_d + J_i) \\ &= 3 J_h \end{aligned}$$

Court-Circuit biphasé isolé franc :

$$\begin{aligned} \text{conditions aux limites : } & V_d = V_i & V_{da} &= V_d + V_h \\ & J_i + J_d = 0 \\ & J_h &= 0 \end{aligned}$$



$$J_i = + J_d = \frac{-V_n}{Z_d + Z_i}$$

$$\boxed{I_{circuit} = 0}$$

On peut regrouper tous ces résultats dans le tableau suivant :

Nature du C.C	Schéma triphasé du régime additionnel	Schéma des Connexions	Courants add. dans les phases et le neutre
3 P (franc)			$I_{Aa} = - \frac{V_n}{Z_d}$ $I_{Ba} = - a^2 \frac{V_n}{Z_d}$ $I_{Ca} = - a \frac{V_n}{Z_d}$
1 PN (résistant) (S. franc $R=0$ )			$I_{Ba} = I_{Ca} = 0$ $I_{Aa} = I_{\text{neutre}} = \frac{-3 V_n}{Z_d + Z_i + Z_h + 3R} = 3 J_h$
2 P N franc			$I_{Aa} = 0 ; I_{Ba} = I_{Ca}$ $I_{\text{neutre}} = \frac{I_{Ba} + I_{Ca}}{3} = \frac{3 V_n}{Z_h + Z_d + \frac{Z_h Z_d}{Z_i}}$
2 P (franc)			$I_{Aa} = 0 ; I_{\text{neutre}} = 0$ $I_{Ba} = -I_{Ca} = j\sqrt{3} \frac{V_n}{Z_d + Z_i}$

### III - SIGNIFICATION PHYSIQUE ET MESURE DES GRANDEURS SYMETRIQUES DANS LES RESEAUX.

#### 3.1 - Signification physique des grandeurs symétriques : ((1))

Les composantes symétriques des tensions, des courants ou des impédances ne sont pas que de simples artifices nécessaires à la simplification des calculs des régimes déséquilibrés, mais forment bel et bien des grandeurs physiques qui existent, puisqu'on peut

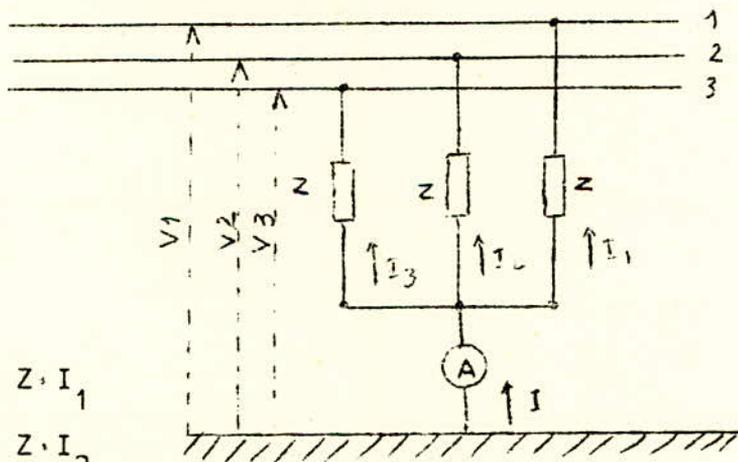
les mesurer et qu'elles engendrent des phénomènes physiques observables Ainsi :

- le courant de terre est égal au triple de la composante homopolaire des courants de phase.
- la tension apparaissant entre le sol et un point neutre quelconque du réseau non relié à la terre est égal à la composante homopolaire des tensions entre conducteurs et sol.
- dans les moteurs triphasés, la composante directe engendre un couple moteur et la composante inverse engendre un couple de freinage, alors que la composante homopolaire n'engendre aucun couple car le champ produit par cette dernière n'est pas un champ tournant.

### 3.2 - Mesure des composantes symétriques : ((1))

Il existe plusieurs dispositifs pour leurs mesures et qu'on utilise pour les automates de protection des réseaux électro-énergétiques

#### 32.1 - Mesure de la tension homopolaire



$$V_1 = Z \cdot I_1$$

$$V_2 = Z \cdot I_2$$

$$V_3 = Z \cdot I_3$$

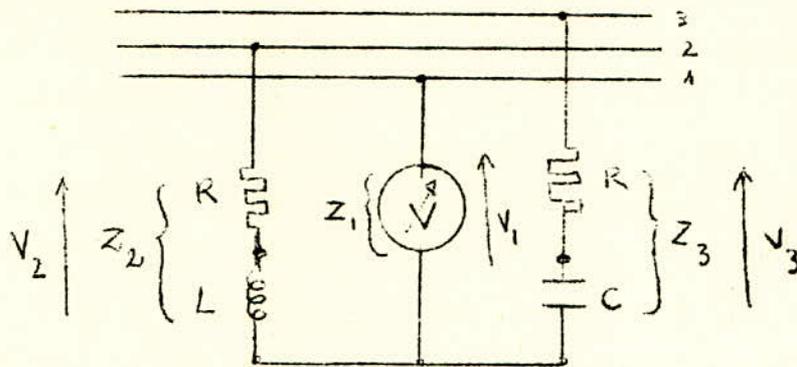
$$V_1 + V_2 + V_3 = Z (I_1 + I_2 + I_3)$$

$$3 V_n = Z \cdot I$$

$$\implies V_n = \frac{Z \cdot I}{3} \implies V_n = K \cdot I$$

Remarque : choisir des impédances Z assez élevées pour limiter la perturbation du réseau.

### 32.2 - Mesure des tensions directe et inverse



On choisit  $X_L$  et  $X_C$  tel que :

$$X_L = R\sqrt{3} \quad \text{et} \quad X_C = R\sqrt{3} \quad ; \quad (X_L = L\omega, X_C = \frac{1}{C\omega})$$

$$(-V_2 + V_1) = -Z_2 I_2 + Z_1 I_1$$

$$(-V_3 + V_1) = -Z_3 I_3 + Z_1 I_1$$

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

$$(V_1 - V_2) = (1-a^2) V_d + (1-a) V_i$$

$$(V_1 - V_3) = (1-a) V_d + (1-a^2) V_i$$

La résolution d'un tel système donne :

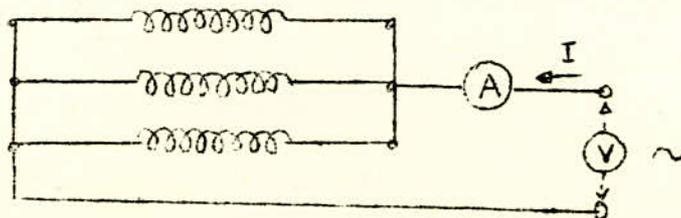
$$V_1 = \frac{3 Z_1}{2 R + Z_1} V_d$$

si  $Z_1 = R$ , alors on lira directement  $V_1 = V_d$

en permutant  $Z_2$  et  $Z_3$ , on lira  $V_1 = V_i$

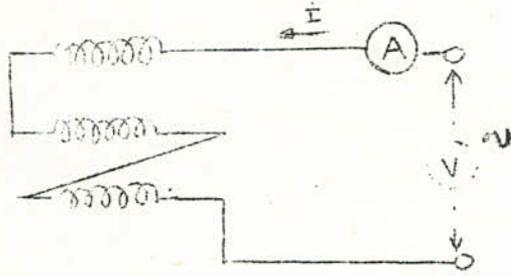
### 32.3 - Mesure des impédances homopolaires

Il suffit de réunir les trois phases en série ou en parallèle et de la alimenter par une tension alternative  $V$ .



$$\Rightarrow Z_h = \frac{3V}{I}$$

ou bien



$$\Rightarrow Z_h = \frac{V}{3I}$$

## IV - VALEURS DES IMPEDANCES $Z_h$ , $Z_i$ , $Z_d$

---

### 4.1 - Généralités

Les impédances résultantes  $Z_h$ ,  $Z_i$ ,  $Z_d$  qui interviennent dans le calcul des courants de court-circuit se déterminent à partir des impédances homopolaires, inverse et directe de chacun des éléments constitutifs du réseau (machines, transformateurs, lignes cables, etc ...)

En général on a  $Z_d = Z_i$  sauf pour les machines tournantes où  $Z_d$  diffère de  $Z_i$  car les champs tournants dus aux courants direct et inverse ont des sens de rotation opposés donc des vitesses différentes.

L'impédance homopolaire  $Z_h$  dépend des différents modes de liaisons du neutre et de la nature du couplage des enroulements. Elle n'a de valeur finie que s'il existe un chemin de retour pour les courants homopolaires. Ainsi :

- tout montage en étoile avec point neutre relié au conducteur de retour possède une impédance homopolaire finie.
- tout appareil en triangle ou en étoile avec point neutre isolé se caractérise par une impédance homopolaire infini.
- L'impédance homopolaire d'une ligne avec retour par le 4<sup>o</sup> fil ou par le sol est supérieure à l'impédance cyclique directe ou inverse.
- Pour un transformateur elle est égale à l'impédance directe (ou inverse) ou en diffère selon le mode de couplage utilisé.
- Pour une machine tournante, elle constitue l'impédance de fuite, généralement encore plus faible que l'impédance inverse.

La recherche d'une précision meilleur que 1% dans les calculs de courant de court-circuit est inutile et même stupide car d'une part les caractéristiques du réseau lors du court circuit ne sont guère connues avec une précision bien meilleure et d'autre part les résultats obtenus doivent tenir compte d'une marge de sécurité nécessairement imprécise qu'il s'agisse de la puissance de coupure d'un disjoncteur ou de la tenue mécanique d'un élément. La nécessité d'une telle marge de sécurité conduit à adopter des simplifications donnant un résultat par excès.

Aussi, en général on néglige les résistances devant les réactances dans l'expression des impédances des machines synchrones, des transformateurs et des lignes de transport. L'erreur introduite est souvent insignifiante. Elle devient néanmoins plus grande lorsqu'il s'agit de câbles souterrains ou de lignes de distribution à moyenne ou basse tension pour lesquels le terme résistance est égal ou supérieur au terme réactance. Enfin, en général il y a lieu de tenir compte de la résistance dans l'impédance équivalente aux récepteurs et qui correspond à la puissance active qu'ils absorbent.

#### 4.2 - Impédances des machines synchrones : ((4))

42.1 - Impédance directe : Elle ne fait intervenir que les grandeurs correspondant à l'axe longitudinal car lors d'un court-circuit triphasé, le courant débité par l'alternateur est presque entièrement réactif et le champ tournant des courants statoriques est alors démagnétisant et ses axes coïncident avec les axes des pôles de la machine. Le fonctionnement en court-circuit est donc un phénomène qui intéresse l'axe longitudinal de l'alternateur et les amortisseurs disposés sur les pôles.

La réactance directe prend des valeurs différentes selon qu'il s'agisse de phénomènes lents (1 à 2 s), très rapide (1 à 2/100s) ou intermédiaire (quelques dixièmes de secondes). Ces derniers mettent en jeu la réactance transitoire longitudinale  $X'd$ , correspondant aux fuites entre l'inducteur et l'induit, les secondes la réactance subtransitoire longitudinale  $X''d$  correspondant aux fuites en l'inducteur, l'induit et les amortisseurs, et les régimes lents la réactance synchrone longitudinale correspond à la pleine réactance  $L_w$  du stator.

#### 42.2 - Impédance inverse

Le champ de réaction d'induit n'est plus ici fixe par rapport aux pôles mais il tourne par rapport à ces derniers avec la vitesse  $2w$ . La réactance inverse dépend de phénomènes très rapides faisant intervenir par conséquent les 2 réactances subtransitoires longitudinale et transversale ( $X''d$  et  $X''i$ )

On peut prendre :

$$\begin{aligned} X_i &\doteq 1,45 X'' d && \text{pour 1 machine sans amortisseur} \\ X_i &= 1,22 X'' d && \text{pour un turbo générateur et machine} \\ &&& \text{avec amortisseur sur les 2 axes.} \end{aligned}$$

#### 42.3 - Impédance homopolaire :

La composante homopolaire des courants statoriques n'induit aucun champ au rotor et l'impédance homopolaire est indépendante de la présence ou l'absence d'amortisseur. Elle est faible et correspond aux fuites entre les enroulements de phases du stator : Elle varie dans de très larges limites tout en ne dépassant pas la moitié de  $X'd$ . Elle est évidemment infiniesi on a un couplage triangle ou étoile à neutre isolé. Le tableau ci-dessous donne la valeur de ces réactances exprimées en % de  $S_n / U_n^2$ .

REACTANCE	Alternateur à entrefer constant	Alternateur à pôles saillants
Synchrone $X_d$	150 ÷ 250 %	80 ÷ 120 %
transitoire $X'_d$	18 ÷ 25 %	25 ÷ 35 %
Subtransitoire $X''_d$	15 ÷ 20 %	15 ÷ 25 %
Inverse $X_i$	14 ÷ 10 %	14 ÷ 22 %
homopolaire	5 ÷ 10 %	7 ÷ 15 %

#### 4.3 - Impédance des Machines asynchrones ((4))

L'impédance directe correspond aux fuites entre le stator et le rotor ramenées au rotor. En général on la prend égale à celle présentée par la machine juste avant le court circuit. L'impédance inverse est assimilée à une réactance pure de l'ordre de 30 % de  $U^2 / S_n$ .

Quant à l'impédance homopolaire elle est évidemment infinie puisque le neutre est toujours isolé.

#### 4.4 - Impédance des transformateurs :

En négligeant les pertes à vide et les pertes cuivre, ce qui se justifie fort bien surtout en cas de court circuit où il y a une grande chute de tension, le schéma équivalent d'un transformateur sera un dipôle comportant une réactance. Là la réactance directe est égale à la réactance inverse (élément passif)

on les détermine généralement par la formule :

$$X = \frac{10 \cdot U_{cc} (\%) U_n^2 (K^2 V)}{S_n (K VA)} \text{ ohms}$$

Pour un transformateur à 2 enroulements elle est de l'ordre de 10 à 12 %

Pour un transformateur à 3 enroulements les éléments de l'étoile équivalente se calculent d'après la formule.

$$X_{12} = \frac{X_{12} + X_{13} + X_{23}}{2} \quad \text{ou} \quad X_{12} = 10 U_{cc12} (\%) \frac{U_n^2}{S_n} \begin{matrix} \text{(KV)} \\ \text{(KVA)} \end{matrix}$$

$$X_{13} = 10 U_{cc13} (\%) \frac{U_n^2}{S_n} \text{(KVA)} \quad X_{23} = \dots$$

ordre de grandeur  $U_{cc} (1/2) = 10 \div 12 \%$

$U_{cc} 13 = 6 \div 20 \%$

$U_{cc} 23 = 20 \div 6 \%$

\* L'impédance homopolaire : ((5))

Elle dépend du couplage des enroulements et de la nature du circuit magnétique en effet

Y - d ---  $X_0$  est égal à l'impédance du triangle et les courants homopolaires ne circulent qu'à l'intérieur du triangle.

Yo - yo --- La réactance  $X_0 = X$  (si 3 transformateurs monophasés), ceci n'est qu'approché pour les transformateurs triphasés.

Yo - y ---- Si l'appareil est à flux libres (4 colonnes ou mono phasé), les courants homopolaires se réduisent aux courants magnétisants et  $X_0$  est infiniment grande. Si le transformateur est à flux forcés (3 colonnes) les flux homopolaires sont en phase dans les 3 colonnes et ne peuvent se refermer que par l'extérieur du circuit magnétique.

$$X_0 = 40 \div 100 \%$$

#### 4.5 - Impédance des lignes et des Câbles :

Il faut distinguer le cas des lignes de transport HT du cas des câbles souterrains ou des réseaux de distribution BT et M. T. En effet le premier cas on ne tient compte que de la réactance alors que dans le second le terme de résistance devient égal ou même dépasse le terme réactif. Ceci est dû au fait que plus la distance entre conducteurs croît, plus l'inductance augmente. En effet :

##### 45.1 - Inductance d'une ligne triphasée symétrique ou plane mais transposée régulièrement ((5)).

$$L_1 = (0,5 + 2 \ln \frac{D}{r}) 10^{-4} \text{ H/KM}$$

avec  $D$  = distance géométrique moyenne =  $\sqrt[3]{D_{12} D_{13} D_{23}}$

$r$  = rayon du conducteur utilisé

$$\text{alors } L_1 = (0,5 + 4,6 \log \frac{D}{r}) 10^{-4} \text{ H/KM}$$

##### 45.2 - L'inductance homopolaire d'une ligne triphasée ((5))

Elle dépend du trajet suivi par le courant de retour par la terre .

D'après LANSAC, la distance  $D_{ct}$  entre le conducteur proprement dit et le lieu de retour à la terre est égale à :

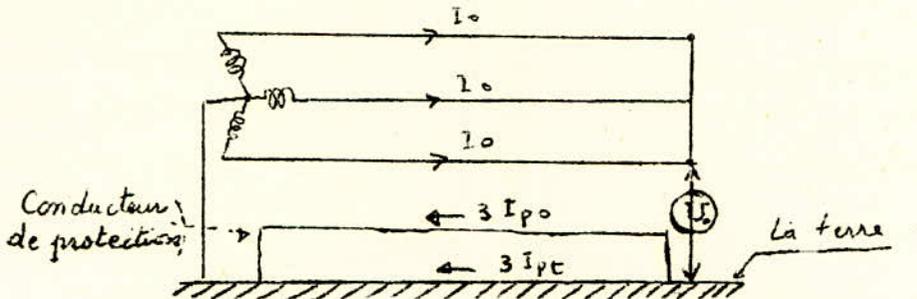
$$D_{ct} = \begin{array}{l} 3000 \text{ m pour la terre sèche (roche)} \\ 935 \text{ m pour la terre humide} \\ 94 \text{ m pour l'eau de mer} \end{array}$$

Et l'inductance homopolaire de la ligne est :

$$L_0 = 3 \frac{\mu_0}{2} \ln \frac{D_{ct}}{\sqrt[3]{r \cdot D^2}} = 3 \cdot 4,6 \log \frac{D_{ct}}{\sqrt[3]{r \cdot D^2}}$$

En général  $X_0 = (3 \div 3,5) X_1$

Remarque : il faut signaler cependant l'influence du fil de protection relié à la terre.



On voit aisément que le fil de protection constitue une 2<sup>e</sup> issue pour le retour du courant homopolaire. Par conséquent sa présence entraîne une diminution de la réactance homopolaire de la ligne. Le calcul montre qu'elles s'expriment par la formule :

$$X_0^{(p)} = X_0 - \frac{X_c^2 l_{p0}}{X_{p0}} = X_0 - w \cdot \frac{L_{p0}^2}{L_{p0}}$$

où  $L_{p0} = 4,6 \log \frac{D_{ct}}{r_p}$ ,  $r_p$  = rayon du conducteur de protection

$$L_{c p 0} = 4,6 \log \frac{D_{ct}}{D_{cp}} ; D_{ep} = \sqrt[3]{D_{1p} \cdot D_{2p} \cdot D_{3p}}$$

= distance géométrique moyenne entre le fil de garde et les 3 phases.

La valeur de réactance homopolaire dépend de la nature du conducteur de protection. Ainsi : ((6)).

Nature de la ligne	X <sub>0</sub>
1 ligne à 1 terna sans cond. de protection	3,5 X <sub>d</sub>
1 " " " " Cond. de protect en Cu ou AL	2 X <sub>d</sub>
1 " " " " Cond. Protect. en Ac	3 X <sub>d</sub>
1 " " à 2 ternes sans cond. de prot. " "	5,5 X <sub>d</sub>
1 " " " " avec cond de prot en Cu ou AL	3 X <sub>d</sub>
1 " " " " " " " " en Ac	4,7 X <sub>d</sub>

#### 4.6 - Impédance des charges ((4))

Il y a lieu ici de tenir compte des résistances qui correspondent à la charge active absorbée. Le calcul est ici un peu délicat car il faut savoir comment se répartit la puissance totale consommée P entre les différentes catégories de récepteurs.

Pour un réseau très puissant, elle peut se présenter comme suit :

Ca = 60 % correspond à des moteurs asynchrones ( $\cos \varphi_a \neq 0,7$ )

Cs = 10 % correspondent à des moteurs synchrones ( $\cos \varphi_s \neq 0,90$ )

Cp = 30 % " " " " à des charges passives ( $\cos \varphi_p \neq 1$ )

Cette distribution des puissances n'est valable que pour les pays hautement industrialisés (Ce qui n'est pas le cas de l'Algérie où actuellement il y a prédominance de la part correspondant à l'éclairage : charges passives).

Généralement on estime que dans le cas des moteurs la puissance apparente installée est égale à 2 fois la puissance consommée. Cette approximation est acceptable car l'influence des charges sur le courant de court-circuit est toujours faible et même négligeable.

Ainsi la puissance totale P sera absorbée par

$$\frac{2 C_s . P}{\cos \psi_s} = \frac{2 . C_s . P}{0,9} \quad : \text{ machine synchrone}$$

$$\frac{2 C_a P}{\cos \psi_a} = \frac{2 . C_a P}{0,7} \quad : \text{ machine asynchrone}$$

et  $C_p . P$  : charges passives.

Donc :

Les charges passives seront représentées par une résistance pure égale à :

$$Z = \frac{U^2}{C_p . P} + j . \theta \quad \text{avec } Z_d = Z_i$$

$$\text{moteurs synchrones } Z_d = 0 + j . x . \frac{U^2}{2 C_s . P / 0,9}$$

avec  $x$  = réactance en % ( $Z_d \neq Z_i$ )

$$\text{moteurs asynchrones } Z_d = \frac{U^2}{2 C_a . P / 0,7} (0,7 + j0,7) \quad .)$$

$Z_d$  = correspond à l'impédance présentée par la machine juste avant l'apparition du défaut

$$Z_i = 0 + j . x . \frac{U^2}{2 C_a . P} . 0,7$$

## V - AUXILIAIRES DU CALCUL DES RESEAUX

### 5.1 - Généralités

L'emploi des modèles et des tables à calcul permet de résoudre rapidement tous les problèmes de structure de réseaux dans les cas les plus divers ....

Par ailleurs, la rapidité considérable des calculateurs électroniques permet de répéter les calculs un très grand nombre de fois avec des données numériques différentes, de sorte que l'on peut étudier rapidement les problèmes que pose toute modification de la structure du réseau.

Les auxiliaires de calcul des réseaux peuvent être classés en trois catégories principales :

1° les modèles réduits

2° les modèles analogiques parmi lesquels on distingue :

- les tables à calcul
- les analyseurs transitoires

3° les calculateurs :

- analogiques
- arithmétiques.

### 5.2 - Modèles réduits : ((4))

La réalisation de modèles réduits de réseaux ou micro-réseaux au moyen des lois de similitude rencontre des difficultés plus importantes que celles soulevées par l'établissement des modèles d'ouvrages hydrauliques. Un modèle réduit de réseau ne permet pas en définitive d'étudier tous les cas de fonctionnement (par exemple avec retour à la terre).

Le micro réseau comprend des petits groupes générateurs et des éléments fixes qui constituent essentiellement, tant en régime normal, qu'en régime transitoire, une représentation des machines et des éléments du réseau réel à étudier.

Le respect de certaines conditions de similitude est impératif pour une concordance entre le réseau réel et sa représentation. Parmi les conditions, les plus importantes on note :

### 1° la similitude électrique

Elle consiste à avoir l'égalité des réactances exprimées en valeurs réduites rapportées (pour le réseau réel à une puissance apparente  $S_n$  et à la tension nominale de fonctionnement  $U_n$  ; pour le micro-réseau à la ~~puissance~~ puissance homologue  $s_n = K_s \cdot S_n$  et la tension homologue  $U_n = K_u \cdot U_n$ ) et l'égalité des constantes de temps puisque généralement le micro-réseau fonctionne aussi à 50 Hz

### 2° la similitude magnétique :

Là il s'agit de réaliser la correspondance entre caractéristiques partielles homologues.

Remarque : il est difficile de satisfaire rigoureusement et simultanément aux deux conditions précédentes. En pratique, on porte, l'erreur qui subsiste, sur la similitude magnétique.

### 3° la similitude mécanique

La similitude mécanique nécessite l'égalité des temps de lancer  $T$  et la correspondance entre les lois de variation des couples homologues sous l'action des différents régulateurs.

Ainsi les micro-machines ont des caractéristiques quasi identiques à celle des machines réelles qu'elles représentent (saturation du circuit magnétique, réactances dans les deux axes, constante de temps, amortissement, vitesse de réponse, constante d'inertie, etc ...) . Mais inutile de dire qu'une similitude géométrique d'un tel modèle et de son original est irréalisable. On utilise alors pour obtenir cette identité de caractéristiques toutes sortes d'artifices comme l'introduction de résistances négatives dans le circuit d'excitation pour accroître la constante de temps, l'usage de résistances négatives pour accroître la constante d'inertie, l'alimentation du moteur simulant la turbine du groupe au moyen de thyristors pour faire varier la charge etc .....

Les transformateurs sont des auto-transformateurs munis d'un enroulement triangle pour obtenir la réactance homopolaire désirée. Les enroulements seront à section sudimensionnée. Le réseau réduit comprend également des éléments de ligne en  $\Pi$ , triphasés et munis d'un quatrième conducteur figurant le retour à la terre ou un conducteur neutre.

On peut ainsi étudier, en courant triphasé, tous les régimes de fonctionnement d'un réseau équilibré ou non.

### 5.3 - Modèles Analogues

#### 53.1 - Les tables à calcul ((4)) ; ((2))

---

Les tables à calcul sont de deux types : à courant continu et à courant alternatif. Elles comportent un ensemble de résistances, de bobines à réactances et de condensateurs représentant à une échelle donnée les impédances et les admittances constituant le réseau réel à étudier. On applique au modèle réduit des tensions continue ou alternative très stables, aux points homologues de ceux où sont branchées les forces électromotrices du réseau donné. Il en découle que les tables à calcul ne sont en fait que de simples auxiliaires de calcul et que la résolution numérique d'un problème n'est possible que lorsque la résolution théorique en a été faite. En effet la méthode de résolution du problème étant connue, la table effectue les opérations pour l'opérateur et lui évite, ainsi de faire un calcul manuel.

En général, on représente un réseau polyphasé en régime équilibré par un schéma bifilaire équivalent. Si le régime est ~~triphase~~ triphasé, on utilise les composantes symétriques et on est conduit de ce fait, à faire figurer sur la table les schémas monophasés direct, inverse et homopolaire.

53.11 - Tableau à calcul à courant continu  
 .....

Ce type d'analyseur est basé sur l'approximation suivante :

" dans un réseau de transport d'énergie électrique, les résistances et les capacités sont négligeables devant les réactances". On assimile donc les éléments du réseau à des réactances pures qu'on représente en courant continu par des résistances. Cette approximation est légitime dans le cas du transport à haute tension (on justifiera cette affirmation par des exemples numériques dans le cas du réseau algérien).

Plusieurs analyses et études peuvent être effectuées sur ce type de calculateur. On peut citer entre autres :

- détermination des courants de court-circuits de divers types.
- détermination de la répartition des charges actives
- détermination des pertes actives et réactives
- étude de la stabilité grâce à la méthode pas à pas.

53.12 - Table à calcul à courant alternatif  
 .....

La représentation des lignes et des transformateurs est ici plus fidèle. L'utilisation d'une fréquence relativement élevée (généralement 500 Hz) permet d'avoir des éléments moins volumineux ... Les générateurs sont représentés par des régulateurs d'induction.

L'inconvénient de ce type de calculateur réside principalement dans le temps vraiment trop important que nécessite le double réglage phase amplitude, ce qui explique par ailleurs son abandon .

La table permet par contre de faire des études plus complètes et plus nombreuses que ne le permet l'analyseur à courant continu. En effet, en plus des études de répartition des charges, de court circuit, elle permet de déterminer :

- les tensions de rétablissement et les tensions des phases saines lors de défauts symétriques ou dissymétriques.
- Le calcul du déséquilibre des tensions dans les réseaux maillés alimentant des charges monophasées.
- L'étude du problème de la stabilité statique et dynamique, dans les réseaux d'énergie.

### 53.2 - Les analyseurs transitoires.

Ces appareils sont spécialement conçus pour l'étude des phénomènes périodiques oscillatoires ou apériodiques, notamment des surtensions d'origines externes ou internes, des phénomènes de ferroresonance etc ...

Ce sont des modèles analogiques dans lesquels le phénomène perturbateur est, par récurrence, reproduit périodiquement et enregistré sur l'écran d'un oscillographe.

### 5.4 - Les calculateurs

Il existe deux classes principales de machines à calculer.

#### 54.1 - Les calculateurs analogiques

Ils effectuent la résolution des problèmes se traduisant par des systèmes d'équations algébriques ou d'équations différentielles simultanées (ex : réglage ...). Ils comprennent un certain nombre d'éléments électriques normalisés, combinés de manière que les tensions qu'ils mettent en jeu vérifient des équations de forme identique (ou analogues) à celle des équations traduisant le phénomène étudié.

On a ainsi des additionneurs, des multiplicateurs, des générateurs de fonctions.

1) - Le calcul de ...

## 54.2 - Les calculateurs arithmétiques

---

Ils opèrent sur les nombres discrets et fonctionnent selon un programme déterminé. Ils connaissent un développement assez poussé depuis surtout une dizaine d'années. C'est l'outil de calcul le plus puissant qu'on a jamais connu, mais la complexité des phénomènes dans les réseaux électriques réels, la limitation de la capacité des mémoires, la difficulté de la mise au point de programmes, forment malgré tout un sérieux handicap. D'autre part ils nécessitent des investissements énormes, une infrastructure adéquate et un personnel hautement spécialisé.

## I - LE RESEAU ALGERIEN DE TRANSPORT ELECTRIQUE

Quand on observe actuellement le réseau électroénergétique algérien . On constate qu'il est en pleine transformation. En effet le premier plan quadriennal a permis à plusieurs nouveaux groupes assez puissants de voir le jour à ANNABA à ALGER, à ORAN, à HASSI MESSAOUD etc ... La centrale de SKIKDA qui sera la plus puissante et la plus moderne qui existe en Algérie est en voie d'achèvement. Le décollage économique du pays au cours de ces dernières années a entraîné une demande toujours accrue d'énergie électrique. Si on ajoute à cela le fait que l'infrastructure de tout réseau électroénergétique doit toujours être en avance sur la demande qu'exige tout plan de développement on comprend pourquoi la SONELGAZ s'est empressée à renforcer son potentiel aussi bien humain que technique....

Si on analyse à cet effet le schéma N° 1, représentant la carte géographique du réseau électroénergétique on remarque que :

- les plus importants centres de production sont d'origine thermique et se dispersent assez régulièrement sur les 1200 Km de la côte algérienne. Ils se situent dans des zones industrielles assez importantes (ANNABA - SKIKDA - ALGER - ORAN).
- Les centrales hydrauliques se situent quant à elles plutôt à l'intérieur du pays, dispersées dans les montagnes de l'Atlas tellien. Si leur nombre est assez élevé, leur puissance est par contre quasi insignifiante à l'exception des centres de Mansouriah et de Darguinah qui sont relativement importants.

- En ce qui concerne le réseau de transport électrique les conditions géographiques et économiques de l'Algérie. expliquent la structure du maillage du réseau. En effet, le réseau algérien n'est que très faiblement maillé et cela est dû au fait que la plus grande partie des centres producteurs et consommateurs se situent dans l'étroite bande du tell ... Aussi peut-on assimiler le réseau de transport à une ligne double s'étalant d'Est en Ouest en passant par les différents centres de production et de consommation.

L'exception réside dans la ligne qui s'étend d'ANNABA au Nord au Djebel-Onk au sud en longeant la frontière algéro-tunisienne. Cette ligne sert à alimenter les trains électriques de transport des minerais de fer et de phosphate. Signalons en outre que notre réseau est relié au réseau tunisien par 2 lignes de 90 kV et va très bientôt être connecté au réseau marocain par une ou deux lignes en 220 kV ... Du point de vue tension, on distingue trois (3) échelles de tension : 60 ; 90 ; 150 kV. Néanmoins il faut préciser que des travaux sont en cours pour convertir en 200 KV les installations en 150 kV. A cela s'ajoute la construction de nouvelles lignes et de nouveaux postes en 220 kv s'étendant à travers toute la moitié Ouest du pays pour aller rejoindre la ville d'Oujda au Maroc. (sur le schéma n° 1 on voit d'ailleurs les dates de début de construction des postes et des lignes en projet et les dates de fin de réalisation des postes et des lignes en construction.)

De ce qui précède on peut déduire que vers les horizons de 1980 le réseau algérien sera à prédominance sous 220 KV. d'ailleurs le tableau des statistiques de 1970, de SONELGAZ quoique déjà largement très dépassé, donne :

Un	Existant au 1-6-70	Projet ou Construction	Total
150/220	1650 km	670 km	2320 Km
90	330	200	530
60	1750	560	2310

Ainsi la fin du second plan quadriennal verra un réseau relativement maillé, alimenté par les 6 grands centres de production ( 4 thermiques et 2 hydrauliques). La majorité de transit de puissance se réalisera par les lignes 220 KV étant donné que leur puissance caractéristique est 6 fois plus grande que celles des lignes 60 ou 90 KV, que leurs pertes joules sont plus faibles ...

C'est d'ailleurs ce que reflète le schéma N° 2 où on a volontairement négligé de représenter les groupes de très faible puissance nominale et qui pour la plupart se trouvent à la fin de leur vie.

On a omis également de représenter les lignes en 60 KV qui secondent les nouvelles lignes en 220 KV puisque du point de vue repartition de puissance leur contribution reste très médiocre et du point de vue courant de court-circuit elles lui présentent une impédance 13 fois plus grande ( $\frac{220}{60} \times \frac{220}{60} \approx 13,4$ )...

Sur ce schéma sont indiqués les puissances nominales des groupes et des transformateurs, la valeur des diverses tensions de service, la longueur, la section et la nature des lignes etc... A remarquer cependant que pour le cas des éléments en projet ou en construction les données peuvent être entachées d'une certaine erreur notamment, en ce qui concerne la longueur des lignes et les tensions de court-circuit des transformateurs. C'est pourquoi je prie les services compétents de SONEGAS de bien vouloir m'excuser et apporter éventuellement les corrections nécessaires dès qu'ils seront en possession des valeurs exactes.

Signalons enfin que parallèlement aux travaux de l'introduction de la tension 220 KV, la SONELGAZ est en train de se doter d'un <sup>ou central</sup> centre ultra-moderne. Ce centre n'entrera réellement en service qu'après 1980 à cause d'une part du manque de personnel hautement qualifié dans le domaine informatique, et d'autre part à cause de la complexité de la mise au point de programmes d'analyse des réseaux.

## II - L'UTILITE IMMEDIATE D'UN AUXILIAIRE DE CALCUL

Les nouveaux postes en construction ou en projet devant être dotés de disjoncteurs de puissance de coupure donnée et les nouvelles lignes en 220 KV allant être progressivement mises en service dès 1976, il devient impératif de rechercher un moyen qui nous permettra d'avoir une base sur laquelle on estime (compte tenu des coefficients de sécurité qu'on prendra et des prévisions d'extension future du réseau) la puissance de coupure des disjoncteurs à installer et le réglage du seuil de sensibilité des protections qu'on place. En effet, il ne s'agit pas de courir le risque d'avoir des avaries qu'on ne peut maîtriser. Certes on peut éviter un tel ennui en plaçant des disjoncteurs très fortement surdimensionnés et des relais à très faible seuil de sensibilité mais cela nous conduirait à des dépenses énormes qu'on pourra la qualifier sans crainte, de gaspillage...

Etant donné que le centre de calcul n'est pas encore près à entrer en service, la solution réside dans la construction d'un petit analyseur de réseau qui soit relativement précis, facile à construire, souple à manipuler et entraînant le minimum de dépenses... dans ces conditions on a pas tellement de choix puisqu'il n'existe que deux solutions :

- la table à calcul à courant alternatif
- la table à calcul à courant continu.

La table à calcul à courant alternatif présente l'avantage de permettre une représentation assez fidèle des lignes et des transformateurs puisqu'on peut tenir compte de la résistance et de la capacité des éléments. Elle donne par conséquent des renseignements très précis notamment sur le module et la phase des courants de court-circuit. Mais, elle se révèle d'un prix assez élevé à cause :

- des condensateurs
- des bobines de réactance
- des générateurs de courant alternatif de fréquence généralement voisine de 500 Hz (sinon on aurait des éléments trop volumineux).

La table à calcul à courant continu, quant à celle possède certes le défaut de donner des résultats moins précis mais elle a l'avantage d'être très peu encombrante et très bon marché du fait qu'elle n'utilise que des résistances dont le prix est vraiment négligeable devant celui d'une bobine ou d'un condensateur. D'autre part on n'a besoin ici que d'un simple redresseur de courant qu'on alimentera par le secteur. Elle ne donne évidemment aucun renseignement sur la phase des courants de court-circuit mais on sait qu'en pareil cas elle est voisine de  $\pi/2$  en arrière... D'ailleurs une trop grande précision sur le module ou la phase des courants en cas de court-circuit n'a aucun sens puisque dans de telle situation les caractéristiques exactes de réseau ne sont pas connues avec certitude. L'imprécision est même ici nécessaire du fait même qu'il faut tenir compte des coefficients de sécurité qu'on devra obligatoirement introduire...

Il devient par conséquent clair qu'une table à calcul à courant continu pour l'analyse des courants de court-circuit est l'auxiliaire de calcul de réseau qui présente dans notre cas l'optimum économique.

### III - TABLE A COURANT CONTINU POUR LE CALCUL DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT

#### DANS LE RESEAU ALGERIEN DE TRANSPORT ELECTRIQUE

##### 3.1 - Calcul de la table

###### 3.1.1. généralités

L'assimilation de toutes les impédances d'un réseau en état de court-circuit à des réactances pures permet de représenter ces dernières par des résistances parcourues par des courants continus.

En effet , les courants étant en phase dans tous les éléments du réseau leur répartition est identique à celle que l'on aurait si le réseau réduit était alimenté en courant continu et composé d'éléments purement résistifs de mêmes valeurs ohmiques que les éléments réactifs.

De là découle le principe général de l'analyseur en courant continu pour la calcul des courants de court-circuit. C'est ainsi que chaque élément du réseau réel est représenté par une résistance équivalente à sa réactance de phase ramenée à une tension de référence unique  $V_b$  et l'on établit entre ces résistances figuratives les mêmes connexions que celles qui existent en réalité. Dans le cas d'un défaut symétrique, on réunit les origines de toutes les résistances figurant les machines génératrices ou receptrices et l'on applique une tension continu de valeur fixée, entre cette origine commune et le point du réseau fictif où l'on désire établir le court-circuit.

Les courants circulants dans les différentes branches du réseau miniature sont alors égaux à un facteur près aux différents courants du régime additionnel de court-circuit dans le réseau réel.

Le défaut non symétrique est par contre un peu plus complexe à simuler car il exige en plus du schéma direct les deux schémas inverse et homopolaire, schémas qui seront connectés de façon à satisfaire aux conditions limites fournies par la nature du court-circuit (voir chapitre : calcul des courants de court-circuit).

### 3.1.2. Origine des données

Les schémas ainsi que la valeur des différentes caractéristiques proviennent des services Contrôle Central, transport et Equipement électrique de la SONEGAS.

Remarque :: La valeur des éléments de lignes et postes en projet peut ne pas être définitive.

### 3.1.3. Approximations admises

1° - On<sup>ne</sup> considéra que les réactances  $X$  des différents éléments (en effet on a vu que cette approximation est permise dans un réseau de transport électrique ou la résistance des alternateurs, des moteurs, des transformateurs est très faible par rapport à la réactance. D'ailleurs les transfo de moyenne et grande puissance ont des chutes inductives au moins égales à 8 % alors que les chutes résistives ne dépasse guère le 1 %. Seules les lignes présentent des résistances beaucoup plus voisines de leurs réactances mais là aussi, et surtout si on considère l'ensemble du réseau l'erreur n'est jamais grande puisqu'elle reste inférieur à 5 % quand la résistance est égal au tiers ( $1/3$ ) de la réactance/. En pratique cette erreur est toujours inférieur à celle résultant à l'incertitude sur les caractéristiques exactes du réseau (et surtout sur les récepteurs). En ce qui concerne les capacités, celles des alternateurs et des transformateurs est négligeable ; quant à celle des lignes elle n'intervient pratiquement qu'en cas de défaut à la terre et surtout s'il s'agit de câbles souterrains. On peut en tenir compte s'il y a lieu par une correction appropriée... De toute façon, le fait de négliger capacités et résistances conduit à une évaluation par excès des courants de court-circuit.

- 2° - On supposera que pour tous les éléments  $X_i = X_d$
- 3° - La réactance directe des lignes sera en général prise égale à 0,42 ~~ohm~~/Km alors que la réactance homopolaire sera le triple soit 1,26 ohms/Km.
- 4° - On ne tiendra pas compte des charges car ne contribuant que très faiblement à l'alimentation du court-circuit. De plus elles sont mal connues... La représentation des charges passives est contraire au principe même de la table à calcul à courant continu/.
- 5° - Les selfs servant à l'absorption de l'énergie réactive produite par les lignes longues à 220 KV ne sont également pas prises en considération car :
- elles sont de puissance nominale faible ( 10 MVA)
  - Leur tension de service est petite (  $U_n = 11$  KV).
- 6° - Dans le cas des générateurs on considèrera la réactance transitoire car on supposera que les protections rentreront en action après quelques ~~micro~~ dixièmes de seconde du début des court-circuit.

#### 3.1.4 - Types de court-circuits à considérer...

- Le court circuit triphasé 3P qui malgré sa faible probabilité (5 %) présente le courant de court circuit le plus élevé donc le plus dangereux.

- Le court-circuit monophasé 1PN qui, bien que présentant généralement le courant le plus faible, possède une probabilité très élevée (65 à 70 %).

Remarque : les autres types de court circuit ne présentent dans notre cas qu'un intérêt secondaire puisqu'ils sont encadrés par les court-circuit 3P et 1 PN.

### 3.1.5 - Lieux des court-circuits considérés :

- Bien que la position du défaut le plus défavorable dépend du genre de problème de traiter, elle se situe généralement à l'une des extrémités de la ligne. Ceci est dû au simple fait que quand on a deux impédances en parallèle, l'impédance équivalente est toujours plus faible que la plus petite d'entre elles. C'est pourquoi on ne considère que les court-circuits sur les jeux de barres.

### 3.1.6 - Grandeurs à mesurer :

Il y a nécessité de connaître, en plus de la valeur des courants dans le court circuit servant à la détermination des puissances de court circuit, la valeur des courants repartis dans les différentes branches que doivent couper les disjoncteurs. Dans le cas d'un court circuit monophasé il faudra connaître aussi la valeur des tensions homopolaires résiduelles car généralement les automates utilisés pour la protection du réseau sont sensibles non pas au courant homopolaire mais à la puissance homopolaire.

On pourra en outre déterminer les impédances équivalentes directes et homopolaire vues du point de court circuit et cela pour faire des vérifications ou pour tout autre besoin.

### 3.1.7 - Tension de base utilisée

Tous les éléments sont réduits à la tension de base  $U_b = 220 \text{ KV}$ .

### 3.1.8 - Echelles de réduction utilisées

Tout projet de modèle réduit nécessite la fixation de facteurs de similitude entre les grandeurs de l'objet réel et celles de l'objet image réduit. Dans notre cas on se fixe :

- le coefficient de réduction des réactances  $k = R/X$
- le coefficient de réduction des courants  $K = i/I$

où

$R$  = résistance placée sur la table et représentant la réactance  $X$  correspondante dans le réseau

$i$  = courant dans le circuit monophasé réduit de la table

$I$  = courant de phase du réseau réel.

$k, K$  peuvent à priori prendre n'importe quelle valeur mais dans notre cas on prendra :

$$k = 10 \text{ et } K = 10^{-5}$$

C'est à dire que :

- Une réactance d'1 ohm dans le réseau réel sera représentée par une résistance de 10 ohms sur le réseau réduit.
- Un courant de 100 A dans le réseau réel sera représenté par un courant de 1 mA dans le réseau réduit.

Ce choix a été motivé par des impératifs de commodité. En effet la réduction des réactances<sup>des</sup> éléments du réseau réel à la tension de base  $U_b = 200$  KV a montré que les valeurs trouvées sont en général assez faibles (quelques dizaines d'ohms). Le fait de prendre  $k = 10$  nous permet d'avoir une meilleure précision, une plus faible dissipation et surtout d'être dans le grand domaine des résistances radio qui possèdent les trois qualités suivantes : bonne précision, très faible encombrement, prix réduit au maximum. La faible dissipation due à la grande valeur de  $k$  et l'assez petite valeur de  $K$  permet de son côté l'emploi d'une source de tension de faible puissance, transistorée, légère, pratique et d'un coût relativement bas.

### 3.1.9 - Schémas des composantes symétriques représentées

Comme on ne considère que le court circuit triphasé et le court-circuit monophasé on n'a besoin alors que<sup>de</sup> l'expression de  $Z_d$  et de  $(Z_d + Z_i + Z_h)$ .

Or on sait que  $Z_d = Z_i$  ;  $Z_d + Z_i = 2 Z_d$   
d'où :  $Z_d + Z_i + Z_h = 2 Z_d + Z_h = 2 (Z_d + Z_h/2)$ .

On pourrait donc représenter simplement  $Z_d$  et  $Z_h/2$  c'est à dire l'impédance directe et la moitié de l'impédance homopolaire.

### 3.1.10 - Calcul des impédances des éléments de la table :

#### 3.1.10.1 - Les lignes

Les caractéristiques de la plupart des lignes aériennes sont résumées dans le tableau suivant :

U (KV)	90/60	150/220	220
S(mm <sup>2</sup> ) AA	238-228	228	411
Diamètre (mm)	19,5	22	26,4
D (m)	5,04	5,53	7,1
H (m)	15	22	22
R(ohm)/km	0,158	0,138	0,088
X(ohm)/km	0,392	0,40	0,410
S(10 <sup>-6</sup> S/km)	2,797	2,8	2,777
Zc (ohm)	389	389	389
Pc (MW)	20,8	130	130
$\left(\frac{R}{X}\right)$	$\frac{1}{2,5}$	$\frac{1}{2,9}$	$\frac{1}{4,6}$

On voit bien que l'erreur commise en assimilant l'impédance cyclique à une réactance pure n'est pas grande.

$$Z = \sqrt{X^2 + R^2} = X \sqrt{1 + \frac{R^2}{X^2}}$$

l'erreur relative

$$e\% = \frac{Z - X}{Z} \approx \frac{Z - X}{X} \approx \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R}{X}\right)^2$$

Pour la ligne AA 253 - 223 :  $e \% = \frac{1}{2} (0,16) = 0,08 = 8 \%$

AA 288 - :  $e \% = \frac{1}{2} (0,12) = 0,06 = 6 \%$

AA 411 :  $e \% = \frac{1}{2} (0,06) = 0,03 = 3 \%$

La valeur de la réactance sera prise en gros égale à 0,42 ohm/km

\* Pour les câbles ceci n'est plus exact. Dans ce cas :

$$X = \omega L = 2\pi f (0,5 + 4,6 \lg \frac{D}{r}) 10^{-4} \text{ hm/km}$$

en prenant  $D = 4r$  Alors

$$X = 100 \pi (0,5 + 4,6 \log 4) 10^{-4} 0,103 \text{ hm}$$

on voit que X est assez faible. Elle est du même ordre que  $R = p \frac{1}{S}$

avec  $p = 1,6 \mu \text{ ohm/cm}$  alors  $R = 0,003 \text{ ohm}$

En ce qui concerne la table à calcul, la valeur de l'impédance des troncs de câble représentés n'a été déterminée que par mesure directe).

Toutes les impédances ont été calculées à la tension de base  $U_b = 220 \text{ KV}$  et on a :

$$Z'd = k \cdot Z_d \text{ réel} \times L \times \left( \frac{U}{U_b} \right)^2 \quad \text{avec} \quad \begin{matrix} k = 10 \\ L = \text{longueur en km} \end{matrix}$$

$$Z'h = \frac{k}{2} Z_h \text{ réel} \times \left( \frac{U}{U_b} \right)^2$$

$Z_d$  réel et  $Z_h$  réel sont ou bien fournies par S. BELGAI qui les connaît par mesure directe ou bien déterminées par la formule :  $Z_d \text{ réel} = 0,42 \cdot L$

(L = longueur en km)

$$\text{et } ((Z_h) \text{ réel}) = 3 \cdot 0,42 \cdot L$$

Ainsi :

\* pour la ligne KHEOUB - EL AOUJIBET caractérisée par :

L = 119 km et  $U_{\text{service}} = 220 \text{ KV}$

$$Z'd = 10 \cdot 0,42 \cdot 119 \cdot \left(\frac{220}{220}\right)^2 = 500 \text{ ohms}$$

$$\text{et } Z'h = \frac{3}{2} (500) = 750 \text{ ohms}$$

\* ligne ZAHANA - Petit lec dont les caractéristiques sont

$$L = 25 \text{ km} ; \text{ Uservice} = 60 \text{ kV}$$

$$Z'd = 10 \cdot 0,42 \cdot 25 \cdot \left(\frac{220}{60}\right)^2 = 1420 \text{ ohms}$$

$$Z'h = \frac{3}{2} \cdot 1420 = 2130 \text{ ohms}$$

\* Pour le tronçon de cable reliant HAMMA à Port II

$$Z'd = Z'd_{\text{table}} = 10 \cdot 0,24 \cdot \left(\frac{220}{60}\right)^2 = 32,3 \text{ ohms}$$

$$Z'h = \frac{3}{2} \cdot 32,3 = 48,5 \text{ ohms}$$

Toutes les valeurs ont été regroupées sur un même tableau n° 1 donnant::

- le nom de la ligne
- la tension de service
- Nature et section
- Impédances réelles
- impédance table

### 3.1.10.2 - . les transformateurs

La connaissance de ces réactions de fuites se fait par des essais en court circuit. Pour passer des impédances en % aux ohms on applique la formule :

$$X = 10 U_{cc} (\%) \frac{U_b^2}{S_n} \left( \frac{\text{KV}}{\text{KVA}} \right)$$

Avec  $U_{cc} (\%)$  = tension de court circuit ou impédance de fuite en %

$S_n$  = Puissance nominale du transformateur

$U_b = 220$

Un transformateur à 3 enroulements sera représenté par son schéma équivalent en étoile. Rappelons qu'un tel transformateur est caractérisé par une ou plusieurs puissances nominales... Les puissances nominales du primaire et du secondaire sont en général très voisines sinon identiques alors que l'enroulement tertiaire généralement couplé en triangle possède une puissance plus faible ( $= \frac{1}{3}$ ).

Le calcul des impédances de la table se fera par les formules :

$$Z'd = K \cdot 10 \cdot U_{cc} (\%) \frac{U_b^2 (KV)}{S_n (KVA)}$$

Pour un transformateur à 2 enroulements :

$$Z'd = K \cdot 10 \frac{U_b^2 (KV)}{S_n (KVA)} \left( U_{cc} (\%)_{12} + U_{cc} (\%)_{13} - U_{cc} (\%)_{32} \right) \times \frac{1}{2}$$

$$Z'2d = K \cdot 10 \frac{U_b^2}{S_n} \left( U_{cc} (\%)_{21} + U_{cc} (\%)_{23} - U_{cc} (\%)_{13} \right) \times \frac{1}{2}$$

$$Z'_3 d = \dots$$

$S_n$  = Puissance nominale de l'enroulement HT :

et dans tous les cas  $\frac{Z'd}{2} = Z'h$

EXEMPLES :

\* Poste ANNABA :

$S_n = 70 \text{ MVA}$      $U_{cc} = 9,5 \%$

$$Z'd = 10 \cdot 10 \cdot 9,5 \cdot \frac{(220)^2}{70 \cdot 1000} = 660 \text{ ohms}$$

\* Poste TIARET :

$$\begin{aligned} S_n &= 80 \text{ MVA} & U_{cc} 12 &= 12 \% \\ U_{cc} 13 &= 7 \% & U_{cc} 23 &= 6 \% \end{aligned}$$

$$Z'd_1 = 10 \cdot 10 \frac{(220)^2}{80 \cdot 1000} (12 + 7 - 6) \cdot \frac{1}{2} = \frac{485}{8.2} = 395 \text{ ohms}$$

$$Z'd_2 = \frac{485}{16} \cdot (12 + 6 - 7) = \frac{485}{16} \cdot 11 = 334 \text{ ohms}$$

$$Z'd_3 = \frac{485}{16} \cdot (6 + 7 - 12) = 30,3 \text{ ohms}$$

$$\text{et } Z'h_1 = \frac{Z'd_1}{2} = 197,5 \text{ ohms}$$

$$Z'h_2 = 168 \quad Z'h_3 = 15,1$$

\* Poste d'ARBA :

$$\begin{aligned} S_n &= 80 \text{ MVA} & U_{cc} 12 &= 12 \% \\ U_{cc} 13 &= 6,6 \% & U_{cc} 23 &= 2 \% \end{aligned}$$

$$Z'd_1 = 10 \cdot 10 \frac{(220)^2}{80 \cdot 1000} \cdot \frac{1}{2} (12 + 6,6 - 2) = 504$$

$$Z'd_2 = \dots\dots\dots (12 + 2 - 6,6) = 290$$

$$Z'd_3 = \dots\dots\dots (6,6 + 2 - 12) = 103$$

Remarquez la valeur négative de  $Z'd_3$ . Ceci arrive assez souvent surtout pour l'enroulement MT. Il est évident qu'une résistance négative n'est pas représentable sur la table aussi à toutes les fois qu'on se trouve devant un tel cas ou prendre une valeur nulle.

Les valeurs de toutes les réactances sont rapportées sur le tableau n° 2 .

### 3.1.10.3. Les groupes

Pour un défaut en ligne, la réactance homopolaire des alternateurs n'intervient pas puisque les bornes sont montées sur le triangle du transformateur de groupe. La réactance directe à installer sur la table est égale à =

$$Z'd = K \cdot 10 \cdot X (\%) \frac{U_b^2 (KV)}{S_n (KVA)}$$

avec  $X$  = réactance transitoire en %

$S_n$  = Puissance nominale

$U_b$  = 220 KV

Le tableau N° 3 donne les valeurs complètes de ces réactances

## LIGNES 60 KV (Tableau n° 1 )

Ligne ou câble	Longueur (km)	Nature Section	Impédance Directe ( $\Omega$ )	Impédance homopolaire ( $\Omega$ )	VALEUR TAC	
					Z'd ( $\Omega$ )	Z'h ( $\Omega$ )
Ravin blanc- Petit Lac	5,06+0,156	192+75Cu	0,73	1,2	96	80
(2)	5,36	192 Cu	0,73	1,2	96	90
Zahana-Petit Lac (1)	25	116Cu	10,5	31,5	1400	2100
(2)	25	116 Cu	10,5	31,5	1400	2100
Arba-Hamma (1)	18,90	192et167Cu	7,85	24,3	1050	1630
(2)	18,70	"	8,05	24,3	1070	1630
Arba-EL.Harrach (1)	12	167 Cu	5,22	17,7	700	1200
(2)	12	167 Cu	5,22	17,7	700	1200
El-Harrach.Hamma (1)	9,53	167 Cu	1,05	2,2	140	147
(2)	9,53	167 Cu	1,05	2,2	140	147
Hamma - Port II (1)	2,2	192 Cu	0,24	0,51	32,3	48,5
(2)	2,2	192 Cu	0,24	0,51	32,3	48,5
El.Hadjar-Annaba(1)	1240,8	617 AA et 800 Cu	4,9	17	6,55	1140
(2)	"	"	"	"	"	"
(3)	"	"	"	"	"	"
El-Hadjar.SNS (†)	2,5	617 AA	1	3	134	201
(2)	"	"	"	"	"	"

## LIGNES 90 KV (Tableau n° 1)

Ligne ou cable	Longueur	Section Nature	Impédance Directe	Impédance homopolaire	IMPEDANCE TAC	
					Z'd	Z'h
El-Hadjar M'sfa	44	238 AA	18,5	55,5	1110	1660
M.Sfa-El'Acouinet	81	238 AA	34	102	2040	3060

## LIGNES 225 KV (Tableau n° 1)

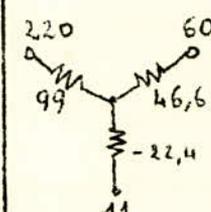
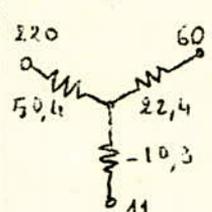
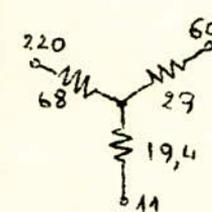
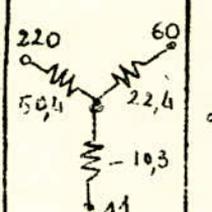
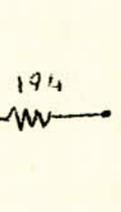
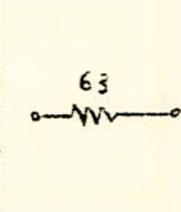
Ghazaouet-Tlemcen	55	288 AA	23	69	230	345
Tlemcen-Zahana	111	288 AA	46,6	140	466	700
Ravin-Blanc-Zahana	30	288 AA	12,6	37,8	126	189
Zahana-Sidi B. Abbes	39	411 AA	16,4	49,2	164	246
Sidi B. Abbes-Saïda	80	411 AA	33,6	101	336	505
Zahana-M.E. Hadjadj	33	411 AA	13,9	41,7	139	208
Zahana-Relizane	92	116 Cu	38,6	116	386	580
Relizane-Tiaret	85	411 AA	35,6	107	356	535
Relizane-O.Sly	80	411 AA	33,6	101	336	505
M.E. Hadjadj-O.Sly	150	"	63	189	630	945
O.Sly-El Khemis (1)	90	411 AA	37,8	113	378	565
(2)	90	411 AA	37,8	113	378	565
El-Khemis-Arba (1)	96	288 AA	40,3	121	403	605
(2)	97	411 AA	40,7	122	407	610
Arba-Bouira	90	288 AA	37,8	113	378	566
Arba-Tizi.ouzou	90	288 AA	37,8	113	378	566
Bouira-Darguinah	135	288 AA	56,7	170	567	850
Tizi-Ouzou-Darguinah	125	288 AA	52,5	157	525	785
Darguinah-EL.Hassi	55	288 AA	23	69	230	345
El.Hassi-Khroubs	110	288 AA	46,6	139	462	695
Darguinah-Khroubs	157	288 AA	66	198	660	990
Khroubs-Skikda	75	288 AA	31,5	95	315	475
Skikda-El Hadjar	88	288 AA	37	111	370	555
El-Hadjar.Khroubs	126	288 AA	53	159	530	795
Khroubs-El Acouinet	119	288 AA	50	150	500	750

## LIGNES 150 KV (Tableau n°1 )

ligne ou cable	longueur	Section Nature	Impédance Directe	Impédance Homopolaire	Impédance TAC	
					Z'd	Z'h
Mansouriah-Darguinah	23	288 AA	9,6	29	20,6	209
	"	"	"	"	"	"

POSTES	GHAZAOUET	TLEMCEM	ORAN	ORAN
Sn par Transfo en MVA	40	40	75	90
Un (KV)	220/60/11	220/60/11	10/60	10/225
Ucc %	Ucc 12 = 13,1 % Ucc 13 = 19 % Ucc 23 = 5,1 %	Ucc 12 = 13,1 % Ucc 13 = 19 % Ucc 23 = 5,1 %	Ucc = 9,15	Ucc = 8,5
Schéma équivalent à 220kV en Ohm				
Impédance D	1640 0 665	1640 0 665	590	460
TAC en Ohm H	820 0 332	820 0 332	295	230
Couplage	Y Y Δ	Y Y Δ	Δ Y	Δ Y
Observations	2 transfo. T* * ; T2 * *	2 Transfo. T* * ; T2 * *	1 Transfo groupe * 13	1 Transfo Groupe * 14 *



Postes	Relizane	Oued Sly	Khemis. M	Araba	Hamma	Alger-port	
Sn (MVA)	40	80	60	80	25	75	
Un (Kv)	220/60/11	220/80/11	220/60/11	220/60/11	10/60	10/60	
Ucc%	1-2 = 12 % 1-3 = 6,3 % 2-3 = 1,9%	1-2 = 12% 1-3 = 6,6% 2-3 = 2%	1-2 = 12 % 1-3 = 10,8% 2-3 = 6%	1-2 = 12% 1-3 = 6,6% 2-3 = 2 %	1-2 = 10%	1-2 = 9,7 %	
Schema équivalent à 220 KV en ohm							
Impédance TC en ohm	D	990 466 0	504 224 0	680 290 194	504 224 0	1940	630
	H	495 233 0	252 112 0	340 145 97	252 112 0	970	315
Couplage	Y Y Δ	Y Y Δ	Y Y Δ	Y Y Δ	Δ Y	Δ Y	
Observations	2 transfo	2 transfo	2 transfo	3 transfo	2 transfo groupe	2 transfo groupe	

\*\*\*\*\*  
\*\*  
\*\* TABLEAU N° 2 \*\*  
\*\*  
\*\*\*\*\*

Postes	Tizi ouzou	Bouira	Darguinah	Darguinah	Darguinah	Mansourah
Sn(NVA)	60	60	40	40	57	57
Un (kV)	220/60/11	220/60/11	220/60/11	11,5/220	150/220	11,5/150
Ucc %	1-2 = 12% 1-3 = 7,6% 3-2 = 7,6%	1-2 = 12% 1-3 = 7,6% 3-2 = 7,6%	1-2 = 12% 1-3 = 6,3% 3-2 = 2%	18 %	13 %	13 %
Schema Equivalents à 220KV en ohm						
Impédance	485	485	990	2180	1110	1110
TAC en ohm	485	485	466	0	0	0
H	242,5 242,5 64,5	242,5 242,5 64,5	495 233 0	1090	555	555
Couplage	Y Y Δ	Y Y Δ	Y Y Δ	Δ Y	Y Y	Δ Y
Observation	2 transfo	2 transfo	2 transfo	1 groupe	transfo	groupe

\*\*\*\*\*  
 \*\*  
 \*\*  
 TABLEAU N° 2 ..  
 \*\*  
 \*\*  
 \*\*\*\*\*





Centrales	Sn ( MVA )	Réactance		Valeur TAC Z' d	OBSERVATION
		transitoire en %	longitudinale à 220 KV (ohms.)		
Ravin BLANC	70	22	222	2220	1 groupe
	90	22	119	1190	1 groupe
Hamma	23	28	590	5900	2 groupes
Alger-Port	75	31	200	2000	2 groupes
Darguinah	40	30	364	3640	2 groupes
Mansourah	57	28	238	2380	2 groupes
Skikda	170	20	52	520	2 groupes
ANNABA	70	32	222	2220	1 groupe
	90	22	119	1190	1 groupe
*****					

\*\*\*\*\*  
 \*\*  
 \*\*  
 \*\*  
 \*\*  
 \*\*  
 \*\*  
 \*\*  
 \*\*  
 \*\*\*\*\*

TABLEAU N°3 ...

### 3.1.11 - Détermination des tensions d'alimentation de la table.

#### 3.1.11.1 - Cas d'un défaut triphasé (D)

Soit  $Z_d$  l'impédance directe équivalente du réseau vue du point P, lieu d'un court circuit, triphasé franc ....

Le courant de défaut I est donné par la formule

$$I = \frac{U_b}{Z_d} ; (z_d \text{ calculé à la tension de base } U_b)$$

Si au point P, la tension simple nominale est  $V_n$  alors le courant réel de défaut est :

$$I_n = (U_b/V_n) \times (U_b/Z_d) = U_b^2 / (V_n \cdot Z_d) \quad (1)$$

Sur la table à calcul où l'impédance  $Z_d$  du réseau est représentée par une résistance  $Z'_d = k Z_d$ , injections entre N (origine commune aux sources génératrices ou réceptrices) et P (point de court-circuit) une tension continue  $v_n$  qui donne un courant  $i$  sur  $Z'_d$ .

$$\text{d'où } i = \frac{v_n}{Z'_d} = \frac{v_n}{k \cdot Z_d}$$

Des questions (1) et (2) on tire :

$$I_n = \frac{k \cdot U_b^2 i}{v_n \cdot V_n} = \frac{k \cdot U_b^2 \cdot \sqrt{3}}{v_n \cdot U_n} \cdot i \quad \text{avec } U_n = \sqrt{3} V_n$$

comme on sait que  $K = \frac{i}{I_n}$  alors on a

$$v_n = \frac{k \cdot K \cdot U_b^2 \cdot \sqrt{3}}{U_n}$$

Application numérique :

$$K = 1/100.000 ; k = 10 ; U_b = 220 \text{ kV}$$

on trouve

$$v_n = \frac{820}{U \text{ (KV)}} \text{ en volts}$$

Ainsi pour  $U_n = 60 \text{ KV} : \rightarrow v_n = 13,67 \text{ V}$   
 $U_n = 90 \text{ KV} : \rightarrow v_n = 9,1 \text{ V}$   
 $U_n = 220 \text{ KV} : \rightarrow v_n = 3,73 \text{ V}$

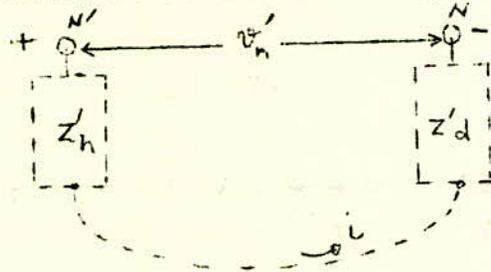
### 3.1.11.2 - Cas d'un défaut monophasé (H)

Le courant dans un défaut monophasé est  $I = 3 \cdot U_b / (2Z_d + Z_h)$  rapporté à la tension nominale  $V_n$  ce courant devient :

$$I_n = (U_b / V_n) \cdot (3 U_b / (2(Z_d + Z_h/2))) \quad (1)$$

Remarquer la somme  $Z_d + Z_h/2 \dots$

Réalisons cette somme sur la table à calcul sur laquelle on trouve le réseau direct  $Z'_d = k Z_d$  et le réseau homopolaire  $Z'_h = k \cdot Z_h/2$  et appliquons une tension continue  $v'_n$  entre les points N et N' respectivement origines des sources du réseau direct et du réseau homopolaire.



Le courant  $i$  qui circule est égal à :

$$i = v'_n / k \cdot (Z_d + Z_h/2) \quad (2)$$

Les relations (1) et (2) donnent :

$$K = \frac{i}{I_n} = \frac{2 \cdot V_n \cdot v'_n}{3 \cdot k \cdot U_b^2}$$

ce qui donne

$$v'_n = \frac{3}{2} v_n$$

soit :

$U_n = 60 \text{ KV} \rightarrow v'_n = 20,47 \text{ V}$   
 $U_n = 90 \text{ KV} \rightarrow v'_n = 13,7 \text{ V}$   
 $U_n = 220 \text{ KV} \rightarrow v'_n = 5,6 \text{ V}$

### 3.111.3 Conclusion

On peut regrouper les valeurs précédentes sur le tableau ci-dessous.

Tension de service $U_n$ (KV)	tension d'alimentation de la table (V)	
	Défaut D	défaut H
220	3,7	5,6
90	9,1	13,7
60	13,7	20,5

On remarque que la tension maximum d'alimentation de la table est inférieure à 21 volts. On peut alors disposer d'une alimentation électronique transistorisée très pratique et ne présentant aucun danger d'électrocution pour le personnel.

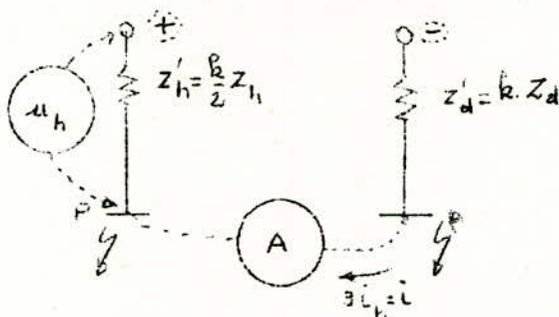
### 3.112 - Mesure des tensions et des courants répartis

#### 3.1.12.1 - Mesure des courants

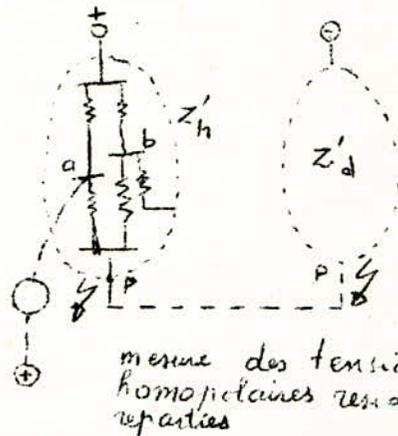
Outre la détermination des courants dans le court-circuit, donc des puissances de court - circuit, la table doit permettre une mesure aisée des courants dans les différentes branches qui alimentent le court-circuit. Ceci est très important car ce sont ces courants qui doivent être coupés par les disjoncteurs et il est par conséquent utile de connaître leurs valeurs de façon à pouvoir régler le seuil de sensibilité des automates chargés de protéger le réseau électroénergétique. Le principe de la mesure est très simple. En effet il suffit de trouver un moyen pratique d'insérer un ampèremètre (éventuellement étalonné en kilo ampères) dans la branche dont on veut connaître le courant qui la traverse.

### 3.1.12.2 - Mesure des tensions

Alors qu'un court circuit triphasé engendre une circulation très intense de courants et que son élimination se fait assez facilement grâce à une protection ampérométrique instantanée à maximum de courant, un court circuit monophasé ne provoque généralement que des courants faibles et son élimination par une telle protection s'avère peu sélective.... Aussi utilise-t-on souvent des détecteurs directionnels sensibles à la puissance homopolaire. C'est pourquoi en plus du courant il faut aussi connaître la tension homopolaire résiduelle au différents points du réseau. La table élaborée permet un tel travail. Le schéma de la mesure est le suivant :



mesure des tensions homopolaires résiduelles



mesure des tensions homopolaires résiduelles réparties

### 3.1.12.3 - Correspondance entre grandeurs mesurées sur la table et grandeurs homologues sur le réseau réel.

#### a - Cas des courants dans le court-circuit

Là aucun problème ne se pose puisqu'on a fixé dès le départ un coefficient de réduction des courants ( $K = 1/100.000$ ) et cela sans aucune hypothèse sur la tension de service du lieu du court-circuit.

Ainsi 1 mA sur la table représentera 100 A dans le réseau réel.

b - Cas des courants répartis dans les différentes branches

Là on a la même chose que précédemment à la seule différence qu'il faudra tenir compte de la tension de service de la branche considérée.

$$I \text{ (réel réparti)} = i \text{ (lu sur le K.A)} \times \frac{U_s \text{ (du lieu de court-circuit)}}{U_s \text{ (de la branche)}}$$

c - Cas des tensions homopolaires résiduelles

Dans le réseau réel, en un point où la tension de service est  $U_{bj}$ , la tension simple homopolaire résiduelle est :

$$V_{hj} = Z_{hj} \cdot (3 I_{hj}) \quad (1)$$

Sur la table à calcul où tout est ramené à la tension de base  $U_b$ , l'impédance homopolaire est  $Z'_h = k \cdot Z_h/2$

et est traversé par le courant résiduelle  $3i_h = i$

La tension résiduelle est alors /

$$u_h = \frac{k}{2} \cdot Z_h \cdot 3i_h$$

$$\text{Or } i_h = K \cdot I_h \implies u_h = \frac{k}{2} Z_h \cdot 3 \cdot K \cdot I_h$$

Si on ramenait  $Z_h$  à une autre tension de référence  $U_{bj}$  elle devient :

$$Z_{hj} = Z_h \cdot \left( \frac{U_{bj}}{U_b} \right)^2$$

$$\text{d'où } u_h = \frac{k}{2} \cdot Z_{hj} \cdot \left( \frac{U_b}{U_{bj}} \right)^2 \cdot 3 \cdot K \cdot I_h \quad (2)$$

En tenant compte de (1) et du fait qu'on s'est fixé à priori une échelle de réduction des courants sans tenir d'aucune hypothèse sur  $U_b$  alors :

$$u_h \frac{U_{bj}}{U_b} + \frac{k}{2} \cdot K \cdot \left( \frac{U_b}{U_{bj}} \right)^2 \cdot V_{hj}$$

d'où

$$V_{hj} = \left( \frac{2}{k \cdot K} \right) \cdot \frac{U_{bj}}{U_b} \cdot u_h \quad (3)$$

On voit ainsi que  $\frac{V_{hj}}{u_h}$  n'est pas constant : il dépend de la tension  $U_{bj}$  du réseau où l'on suppose le défaut.

L'application numérique donne :

$U_{bj}$	$V_{hj}/u_h$
2200 KV	20 KV/V
90 KV	3,34 KV/V
60 KV	1,48 KV/V

Ainsi pour un court circuit en point du réseau où la tension de service est 90 KV par exemple, on devra faire correspondre à 1 volt sur la table 3,34 KV sur le réseau réel.

#### d) Tensions homopolaires résiduelles réparties

Là il faudra rapporter l'indication du kilovoltmètre KV à la tension de service de la branche considéré.

exemple :

Supposons que dans le cas d'un court circuit monophasé, en un point P où la tension de service est 90 KV, on se propose de mesurer la tension résiduelle en un point M (différent de P) où la tension de service est 60KV la tension en ce point M est alors :

$$V_{hj} \text{ (répartie)} = 3,34 \times \frac{60}{90} \cdot u_h$$

$$V_{hj} \text{ (répartie)} = 2,23 \cdot u_h \quad \text{où : } \begin{matrix} (V_{hj} \text{ en KV}) \\ (u_h \text{ en V}) \end{matrix}$$

### 3.2 - Analyse de la table à calcul élaborée

#### 3.2-1 - Description sommaire :

La table se présente sous la forme d'un meuble dont l'aspect général a été représenté sur le schéma n° 4. La forme adoptée répond à des impératifs de commodité et de facilité des conditions d'exploitation. Ainsi l'agent technique utilisateur, tout en étant tranquillement assis sur chaise appropriée (ou à défaut un tabouret), pourra simuler n'importe quel défaut à un endroit quelconque du réseau de transport et mesurer la grandeur qu'il désire.

La face externe du panneau vertical avant se divise en deux parties : La partie principale et la partie supplémentaire. La première est la plus importante : elle occupe le centre et la partie droite et contient le schéma général du réseau algérien de transport électrique .... Comme à l'exemple particulier du poste du Zahana (schéma n°3), on a au niveau de chaque jeu de barres trois trous (4,5,6) destinés à recevoir la fiche triple mâle qui permettra la simulation d'un court-circuit. De plus chaque départ est muni d'un interrupteur mécanique (noté par 1) qui coupe ou met en service ~~simultanément les jonctions~~ directe et homopolaire des éléments de réseau qu'il dessert. Les trous 2 et 3 qu'on remarque permettent la mesure des courants répartis respectivement direct et homopolaire. En effet l'introduction d'une simple tige (1) isolante dans le trou 2 entraîne le basculement des contacts correspondant et permet d'intercaler le kiloampèremètre en série dans la branche considérée du réseau direct. La même opération effectuée dans 3, permet de relever le courant homopolaire reparté ... Les accès Hx et Dx, au niveau de chaque jeu de barres, permettent la réalisation de nouvelles jonctions <sup>R</sup> représentant toute création de nouveaux éléments (ligne, groupe, transfo etc ...) ou tout autre hypothèse (comme par exemple l'adaptation de la table à la mesure des transits de puissance active).

La partie supplémentaire contient les accès aux extrémités d'un ensemble de résistances libres (résistances de réserve) dont le groupement adéquat de certains d'entre elles permettra de représenter les réactances directes et homopolaires des éléments nouveaux à relier par cordons souples aux bornes Hx et Dx désirées.

Si les différentes connexions, les parties actives des différents interrupteurs, des contacteurs ainsi que les résistances de réserve s'accrochent sur la face interne du panneau vertical avant, les résistances représentant le schéma actuel du réseau seront placées, pour des impératifs de commodités, sur circuits imprimés (1 circuit pour chaque poste).

Certes cela entraîne une petite dépense supplémentaire mais la diminution du risque d'erreur en cours de câblage et la facilité de toute vérification constituent un avantage indéniable.

La table comporte un appareillage de mesure et de contrôle. Celui-ci se situe sur le pupitre et comprend :

- un voltmètre Vc qui contrôle les tensions d'alimentation des court-circuits.
- un voltmètre KV, gradué en KV, qui mesure les tensions résiduelles.
- un milliamperemètre KA, gradué en KA et permettant la mesure des courants de court-circuit repartis ou globaux.
- Un ohm-mètre Z qui n'est plus ni moins qu'un milliamperemètre gradué en ohm et destiné à la mesure des impédances équivalentes Zh et Zd.

La mise en marche de l'installation se fait par différents bouton-poussoirs qu'on pourra munir éventuellement de lampe-temoins.

- M/A pour la mise sous tension
- Zo ; Zd pour l'excitation des bobines des relais Zo et Zd.
- R pour l'excitation de la bobine du relais R permettant la mesure instantanée des courants et tensions répartis
- H ; D pour le passage d'un court-circuit monophasé à un court circuit triphasé.
- 220 ; 90 ; 60 pour la sélection de la tension d'alimentation du court-circuit.

La partie active de tout cet appareillage ainsi que le fusible de protection, les différentes connexions, la source d'alimentation continue etc ... se trouvent évidemment à l'intérieur du meuble à accès par l'arrière.

### 32.2 - Matériel utilisé

#### 3.221 - La source d'alimentation .....

C'est une alimentation ordinaire qu'on trouve généralement dans tout laboratoire de mesure et qui délivre une tension continue stabilisée de 25 volts ... Cette tension est appliquée à travers les résistances réglables R1 et R2 aux étalons de tension constitués par les diodes zeners D1 , D2, .... D7. Ces diodes seront de préférence des ZSF de la forme SLCB et qu'on trouve assez facilement chez tout revendeur de matériel électronique. De plus ces diodes possèdent une assez bonne précision (1 %) . Ainsi on prendra :

D1 = D2 = ZSF 1,0 (1,0 V à 1% ; Pmax = 500 mW)  
 D3 = D5 = ZSF 3,6 (3,6 V " " )  
 D4 = ZSF 1,8 (1,8 V " " )  
 D6 = ZSF 4,7 (4,7 V " " )  
 D7 = ZSF 6,8 (6,8 V " " )

### 32.2.2- Voltmètre de contrôle Vc :

.....

C'est un simple voltmètre de classe 1,5 ou 2 et capable de mesurer 25 volts. Pour faciliter les lectures, il comprendra plusieurs calibres de mesure : 0 - 3 V ; 0 - 15V ; 0 - 30 V.

Son cadran comportera en outre plusieurs repères assez nets correspondant aux différentes tensions nécessaires (Zo, Z1, 220 H, .... etc).

### 32.23 - Le kilovoltmètre KV

.....

Ici il y a nécessité d'une précision assez élevée. Aussi on prendra un appareil de classe 1. On le graduera directement en kilo-volts. Pour faciliter les lectures on prendra un appareil à plusieurs calibres. De plus son cadran portera trois échelles de graduations :

La première correspond au court circuit sur 220 KV (où :

1V  $\rightarrow$  20 KV)

La seconde " " " " " 90 KV (où :

1V  $\rightarrow$  3,34 "

la troisième " " " " " 60 KV (où :

1V  $\rightarrow$  1,48KV)

### 32.24 - Le kiloampèremètre :

.....

Là aussi on prendra un appareil de classe de précision égale à 1 qu'on graduera directement en KA (d'après la loi 1m A -- 100 A). Le courant le plus fort correspond généralement à un défaut direct dans un poste voisin de sources génératrices ....

compte  
De plus en tenant d'une part des tensions d'alimentation des différents court-circuits et d'autre part de la configuration du schéma général du réseau, on constate qu'il est vraiment assez délicat de calculer le courant maximum. Aussi on ne choisira l'amperemètre qu'après différents essais sur la table qu'on aura déjà terminée.

### 32.25 - L'ohm -mètre Z .....

Il est constitué d'un milliamperemètre étalonné directement en ohm-ètre puisqu'on l'alimente sous tension constante 2 volts pour  $Z_d$  et un volt pour  $Z_o$ . Il comportera éventuellement plusieurs calibres ( $\times 10$  ;  $\times 100$  ; ....) .... Le cadran sera gradué de telle façon qu'on lira les impédances réelles sur le réseau rapportées à 220 KV. D'ailleurs cette conversion est facile par le fait que le coefficient de réduction des réactances est égal à 10.

Ainsi à un courant de 1m A correspondra une impédance de 200 ohms sur le réseau réel  
Il pourra aussi comporter trois échelles : l'une pour 220 KV, l'autre pour 90 KV et la dernière pour 60 KV.

### 32.26 - Les relais .....

Les différentes commutations  $Z_d$ ,  $Z_o$ , D, H ou R étant relativement nombreuses, seront faites par relais.

Ainsi on prendra pour

$Z_o$	:	un	relais	(24 V)	à	6	contacts	(3	positions	repos ;	
										3	travail)
$Z_d$	:	"	"	"	"	4	"	(2	"	"	;
										2	travail)
R	:	"	"	"	"	5	"	(3	"	"	;
										2	travail)

D : 2 relais (12V) à 4 contact en position de repos  
 H : " " " " " " " "

Ces relais pouvant être de n'importe quelle marque. On les alimentera directement par la source de courant continue de la table

Remarque : Les boutons poussoir de la commande des relais Zo et Zd devront être à ressort de rappel (c'est à dire que les relais ne seront excités que si l'opérateur maintient <sup>la pression</sup> sur le bouton). En ce qui concerne le cas des relais D et H il faudra que leur mise simultanée en action soit impossible. Pour cela on adoptera la même solution que celle utilisée dans les sélecteurs de grammes d'ondes dans les postes radio.

#### 32.27 - Les interrupteurs et les contacteurs .....

1°) Les interrupteurs 1, Nécessaires pour isoler un départ quelconque seront comme le montre l'exemple particulier du poste de Zahana à action simultanée sur le réseau direct et homopolaire. Ce sont des interrupteurs doubles muni d'un verouillage.

2°) Les contacteurs 2 et 3 destinés à permettre la connaissance des courants répartis dans les différentes branches du réseau seront des douilles spéciales. Le basculement des contacts se fera par l'introduction d'une tige isolante dans le trou de la douille.

Les douilles AEG à 2 contacts peuvent convenir....

#### 32.28 - Les cavaliers de mise à la terre .....

La mise à la terre des différents neutres des transformateurs sera réalisée par une liaison métallique franche entre les 2 trous N - N considérés. Cette liaison pourra se faire par simple fil métallique rigide et de forme adéquate ou par des cavaliers spécialement conçus.

### 32.29 - Les résistances fixes .....

Ces éléments seront des résistances agglomérées qu'on trouve couramment dans le commerce. Il suffira de prendre des éléments à  $\frac{1}{2}$  ou 1 W à 2 %

### 32.2.10 - Les résistances réglables : .....

\* Les résistances réglages R1 et R2 sont nécessaires pour un fonctionnement normal des étalons de tension : elles limitent le courant qui traverse des diodes zeners ..... Compte tenu de la puissance maximale admissible des diodes utilisées on trouve : R2 voisine de 90 ohms et R1 voisine de 20 ohms.

\* Pour la représentation de l'étranger on utilise des potentiomètres ou des résistances réglables. En effet vu des bornes d'un poste l'étranger présente une impédance homopolaire et une impédance directe résultante .... Aussi on aura par poste et par liaison avec tout réseau externe, deux résistances ajustables qui seront respectivement placées entre jeu de barre et points communs aux sources.

## 3.2.3 - Explication du fonctionnement

### 3.2.31 - Mesure des courants .....

Analysons simultanément les schémas 3 et 4 et supposons qu'on désire simuler un court circuit triphasé donc direct sur le jeu de barres 220 KV du poste de Zahana. Pour cela on doit :

\* Placer la fiche triple mâle dans le lieu qui lui est réservé au niveau de la barre 220 KV.

\* Appuyer sur le bouton (D) pour sélectionner les types de défauts et exciter la bobine de tous les contact (D) ;

\* Appuyer sur le bouton (220) pour sélectionner la tension. Ces opérations permettent d'envoyer  $+D = 3,5V$  à toutes les bornes (6). On rejoint ensuite la borne (5) en passant par le KA. Enfin on vient se refermer sur le (-) en traversant l'impédance du schéma équivalent direct qu'on voit à partir de la barre de 200 KV de Zahana.

Si maintenant on veut simuler un défaut H sur la même barre, il suffisait d'appuyer sur le bouton H. Ceci, par action mécanique, remet en position repos le bouton H. Une tension déterminée (+H) est alors envoyée aux points communs à toutes les sources de courant homopolaire. Elle traverse l'impédance  $Z'h$  équivalente et atteint la borne (4). On passe ensuite à travers le KA qui nous permet de rejoindre la borne (5). et se refermer sur le (-) après avoir traversé l'impédance équivalente  $Z'd$ .

Donc cette opération a consisté à appliquer une tension entre le point commun aux sources homopolaires et le point commun aux sources directes et à intercaler le KA entre 4 et 5.

Au cas où on désire mesurer un courant qui traverse n'importe quelle branche du réseau il faut appuyer sur le bouton d'excitation de la bobine du relais R ce qui permet d'isoler le KA et de relier directement les bornes (4) et (5) dans le cas d'un défaut homopolaire et (6), (5) dans le cas d'un défaut direct. Ensuite l'introduction d'une fiche isolante dans la borne (2) (courant réparti direct) ou (3) (courant reparti homopolaire) entraîne la commutation des contacts respectifs, ce qui permet d'intercaler le KA dans la branche prise en considération.

### 3.2.3.2 - Mesure des impédances :

.....  
Il suffit d'appuyer sur l'un des boutons poussoirs  $Z_o$  ou  $Z_d$ . Cette action coupe les tensions  $+D$  et  $+H$  et envoie une tension de référence de 1 ou 2V. LA lecture directe sur l'échelle appropriée donne la valeur réelle de l'impédance équivalente ( $Z_b$  ou  $Z_d$ ).



3.2.4 - Estimation du PRIX :

Désignation	Quantité	Prix Unitaire en DA	TOTAL en DA
Interrupteurs (1)	243	5,00	1215
Contacteurs (2)	243	4,00	0972
(3)	243	4,00	0972
Résistances fixes	180	1,00	0180
Résistances Suppl.	050	1,00	0050
Relais	007	12,00	0084
Diodes	007	1,50	0010,50
Alimentation	001	150,00	0150
Appareils de Mesure	004		0400
Meuble	001	200,00	0200
Main d'oeuvre			0500
		Total	4733,50

En tenant compte des frais supplémentaires ~~que~~ le prix de l'ensemble sera de l'ordre de 5 à 6 mille dinars.

D'autre part si les interrupteurs (1) sont remplacés par des cavaliers doubles (comme ceux utilisés pour le cas trous N-N de mise à la terre du neutre) on diminue assez sensiblement le coût de la table (d'environ 900 DA)...

3.2.5 - Mode d'exploitation

La conception adoptée pour la table à courant permet une exploitation très facile. En effet avec un minimum de connaissance technique, on peut y travailler dessus.



C O N C L U S I O N

L'étude qui vient d'être faite démontre la nécessité et la possibilité d'exécution d'un analyseur pour le calcul des courants de court-circuit dans le réseau algérien de transport électrique .

On s'est consacré à voir les différentes solutions possibles et à effectuer le calcul des différents paramètres appareillages pour proposer enfin une forme de construction .

Il reste cependant , aux services intéressés , de réaliser les divers schémas d'installation .

Bien que dans certains pays fortement évolués on pousse l'automatisation à l'extrême ( en France , EDF possède une table à calcul à courant continu munie d'un clavier d'appel téléphonique et de têtes chercheuses électroniques ) , dans notre cas on a adopté volontairement un degré d'automatisation moyen ; car trop bas il conduirait à une exploitation pénible de l'appareil , trop élevé il entraînerait des dépenses insupportables .

Ainsi d'un prix peu élevé , et de technique courante , l'analyseur proposé rendra un service indéniable à l'organisme qui l'adoptera ... En effet non seulement il permettra une mesure rapide et relativement précise des courants de court circuit dans n'importe quel point du réseau mais donnera aussi la valeur des impédances équivalentes directes et homopolaires à n'importe quel point de ce même réseau ; grandeurs très utiles dans le cas de calculs de stabilité par la méthode pas à pas ou dans le cas du réglage des protections de distances .

L'existence des départs libres  $H_x$  et  $D_x$  , et des résistances de réserve confère à la table une souplesse d'exploitation très élevée puisqu'il est possible de tenir compte de n'importe quelle modification de la structure du réseau électroénergétique ( coupures de lignes , arrêt de groupe , création de nouvelles liaisons ) .

De plus au prix d'une très légère modification , la table pourra servir à la détermination de la répartition des puissances actives à travers le réseau national

Enfin par son caractère physique elle se présente comme un excellent moyen pédagogique dans l'étude des court-circuits symétriques et non symétriques .

B I B L I O G R A P H I E

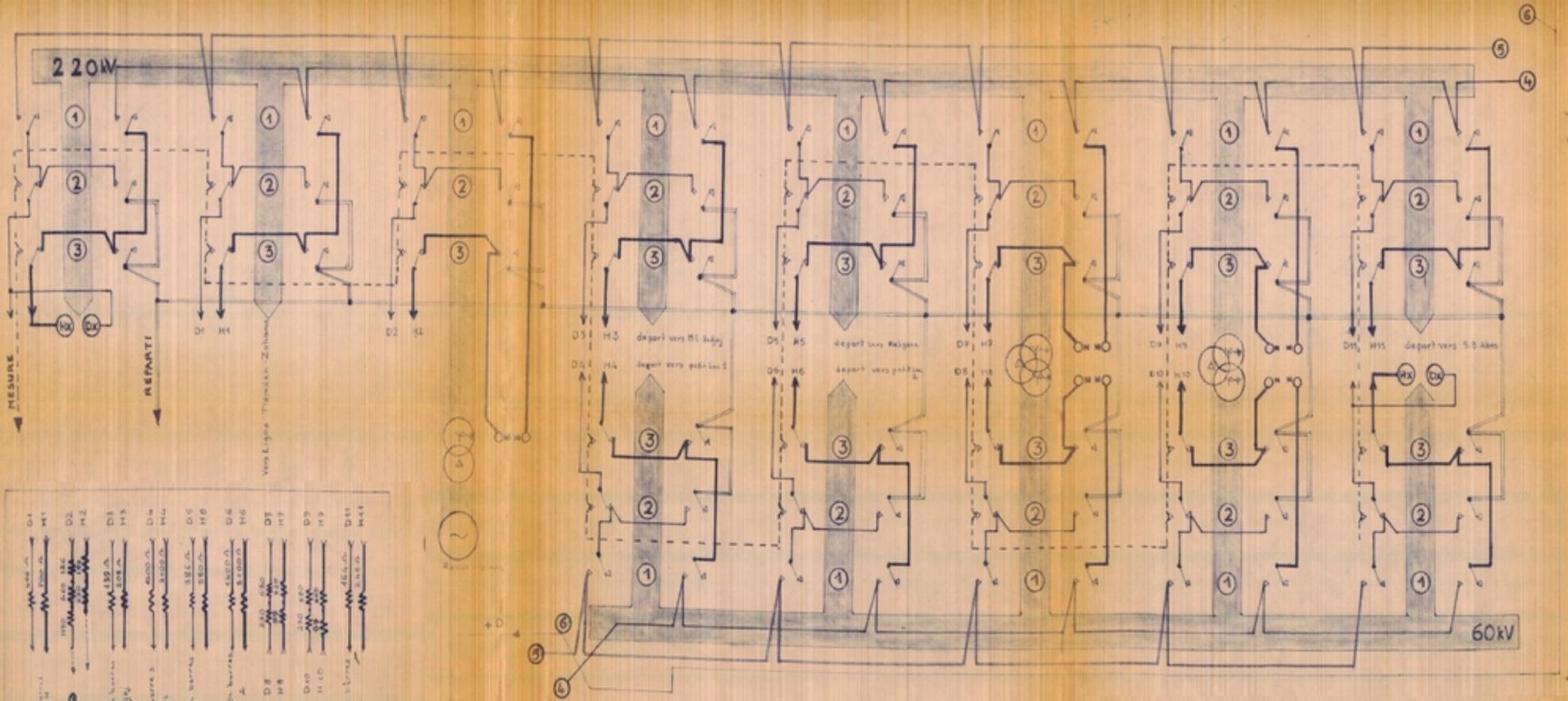
-----

- ((1)) - F.CAHEN - Electrotechnique - t.1 - Circuit et réseaux en régime permanent - Gauthier Villars et Cie - Paris 1962.
- ((2)) - R.PELISSIER - Les réseaux d'énergie électrique t II - Dunod - Paris 1971.
- ((3)) : H.EDELMANN - Théorie et calcul des réseaux de transport d'énergie électrique - Dunod - Paris 1966
- ((4)) : Technique de l'ingénieur - t III - 21 rue Cassette Paris.
- ((5)) : Gh. CIRTINA - Calcul et Projets des réseaux électriques cour polycopié t - II - ALGER 73-74.

-----

## TABLE DES MATIERES

** Introduction	P1
** 1ère PARTIE.	
• I - Généralités sur les réseaux électroénergétiques	
1.1 - Représentation monophasé d'un système triphasé équilibre	P3
1.2 - Aperçu sur la théorie des composantes symétriques	P4
*II - Calcul des réseaux	
2.1 réseaux en régime permanent	P11
2.2 réseaux en régime troublé	P12
*III - Signification physique et mesure des grandeurs symé- triques dans les réseaux	
3.1 Signification physique des grandeurs symétriques	P23
3.2 Mesure des grandeurs symétriques	P24
*IV - Valeurs des impédances $Z_0$ ; $Z_i$ ; $Z_d$	
4.1 Généralités	P27
4.2 Impédances des machines synchrones	P28
4.3 Impédances des machines asynchrones	P30
4.4 Impédances des transformateurs	P30
4.5 Impédances des lignes et des câbles	P32
4.6 Impédances des charges	P34
• V - Auxiliaires du calcul des réseaux	
5.1 généralités	P36
5.2 Modèles réduits	P 36
5.3 Modèles analogues	P 38
5.4 Les calculateurs	P 40
** 2ème PARTIE	
* I - Le reseau algérien de transport électrique	P 42
*II - L'utilité immédiate d'un auxiliaire de calcul	P 46
*III- Table à courant continu pour le calcul des courants de court-circuit dans le réseau algérien	P
3.1 - Calcul de la table	P 47
3.2 - Analyse de la table élaborée	P 76
* * CONCLUSION	P 86
* * BIBLIOGRAPHIE	P 87



vers 220 V. 2200 W. Δ	D1	4000 Ω	H1
Common	D2	1950 Ω	H2
vers 220 V. 2200 W. Δ	D3	1950 Ω	H3
vers 220 V. 2200 W. Δ	D4	4000 Ω	H4
vers 220 V. 2200 W. Δ	D5	3850 Ω	H5
vers 220 V. 2200 W. Δ	D6	4800 Ω	H6
D8	D8	500 Ω	H8
D9	D9	210 Ω	H9
D11	D11	4650 Ω	H11

ECOLE POLYTECHNIQUE

POSTE DU ZAHANA

date le 20-4-75

révisé par MeFlah

Schema : 3

SCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE BIBLIOTHÈQUE

ORAN

ALGER

SKIKDA

ANNABA

MER MEDITERRANÉE

MAROC

TUNISIE

ECHELLE  
0 100 200 km

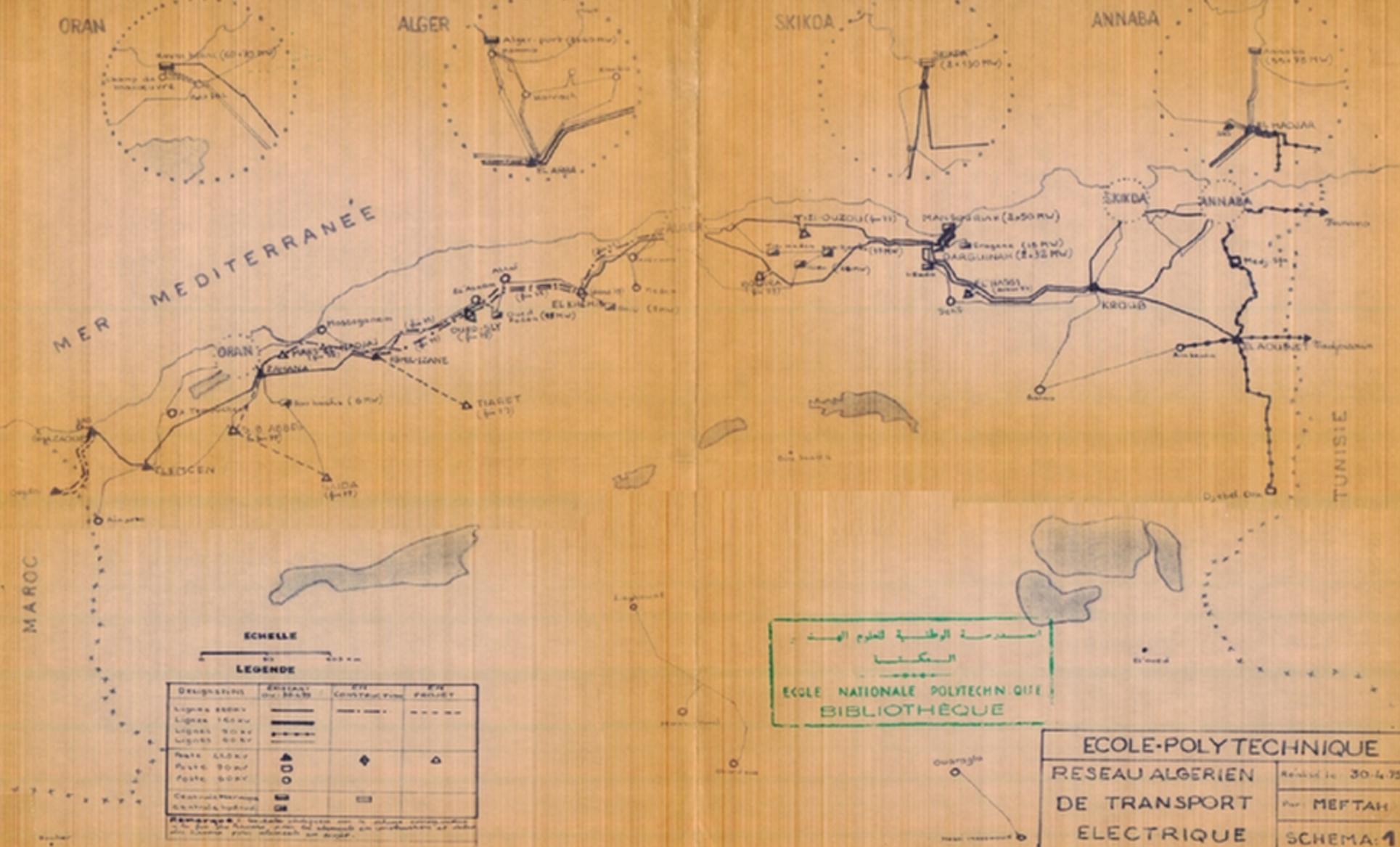
LEGENDE

Designations	EXISTANT ou RECONSTRUIT	EN CONSTRUCTION	EN PROJET
Lignes 600kv	—	—	---
Lignes 150kv	—	—	---
Lignes 90kv	—	—	---
Lignes 30kv	—	—	---
Poste 150kv	▲	◆	△
Poste 90kv	○	◇	△
Poste 30kv	○	◇	△
Centrale Hydroélectrique	■	■	■
Centrale thermique	■	■	■

Remarque: Les données relatives aux stations de transformation de 150 kv pour les réseaux de lignes de transmission et de distribution sont données pour référence et sujet.

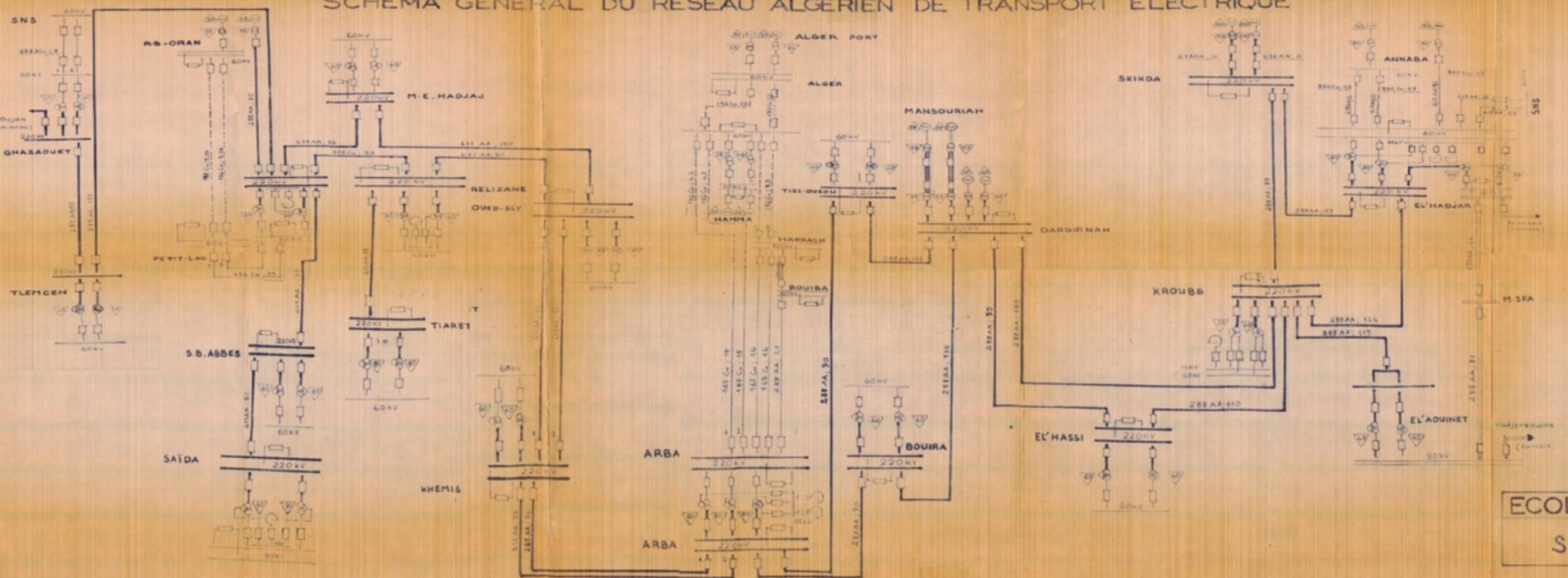
أكاديمية العلوم الهندسة  
المكنية  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHÈQUE

ECOLE-POLYTECHNIQUE  
RESEAU ALGERIEN  
DE TRANSPORT  
ELECTRIQUE  
Révisé le 30-6-75  
Par MEFTAH  
SCHEMA: 1



# SCHEMA GENERAL DU RESEAU ALGERIEN DE TRANSPORT ELECTRIQUE

مدرسة الوطنية للعلوم الهندسية  
 المكتبة  
 ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
 BIBLIOTHÈQUE  
**LEGENDE**  
**LEGENDE**



- : Groupe alternatif
- : Transformateur à 2 enroulements
- : Transformateur à 3 enroulements
- : Poste auxiliaire groupe
- : Poste auxiliaire transformateur
- : Barrage
- : Digérateur ou coupleur
- : Ligne 60kV
- : Ligne 90kV
- : Ligne 150kV
- : Ligne 220kV
- : AA
- : CA
- : MA
- : Section Nature
- : Longueur (km)

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE**  
 SCHEMA:2  
 20-4-75  
 MEFTAH