

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

«*»

وزارة التعليم والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

«*»

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

«0»

DEPARTEMENT : ELECTROTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

S u j e t

« **LOAD FLOW** »

**ECOULEMENTS DE CHARGES DANS LE
RÉSEAU OUEST ALGERIEN**

Proposé par :

Mr D. MAHFOUDI

Master of Sciences

Etudié par :

SOUKKOU

LOUNIS

Dirigé par :

Mr D. MAHFOUDI

PROMOTION : JUIN 1987

21613101415

16 17 18 19 20

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

— «*» —

وزارة التعليم والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

— «*» —

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

— «0» —

DEPARTEMENT : ELECTROTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

S u j e t

« LOAD FLOW »

**ECOULEMENTS DE CHARGES DANS LE
RÉSEAU OUEST ALGERIEN**

Proposé par :

Mr D. MAHFOUDI

Master of Sciences

Etudié par :

SOUKKOU

LOUNIS

Dirigé par :

Mr D. MAHFOUDI

PROMOTION : JUIN 1987

"LA SCIENCE CONSISTE A FAIRE CE QU'ON FAIT
EN SACHANT ET EN DISANT QUE C'EST TOUT CE
QU'ON PEUT FAIRE EN ENONCANT LES LIMITES
DE LA VALIDITE DE CE QUE L'ON FAIT".

(Pierre BOURDIEU).

DEDICACES

- . A la mémoire de ma chère et regrettée Mère.
- . A mon père
- . A toute ma famille
- . A mes amis.


SOUKKOU

- . A ma mère
- . A mon amie Djemilia
- . A ma famille
- . A tous mes amis.


LOUNIS

- R E M E R C I E M E N T S -

Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements
à :

- . Monsieur DJ. MAHFOUDI, notre promoteur,
MASTER OF SCIENCES, chargé de cours à l'E.N.P,
pour nous avoir prodigué de précieux conseils
tout au long de notre travail.
- . Monsieur CHILOV, enseignant à l'E.N.P., pour
son aide en programmation.
- . Monsieur SABADACH, enseignant à l'U.S.T.H.B.,
pour ses illustres explications sur le réseau
électrique.
- . Madame N. TALEB, pour avoir effectué avec
soin tous nos travaux de dactylographie.

Que tous ceux qui ont contribué de près ou
de loin à la réalisation de ce projet et à notre for-
mation, trouvent ici l'expression de notre sincère
gratitude.

،،

- R E S U M E -

Notre travail consiste à évaluer les puissances de transit "LOAD FLOW" dans les lignes du réseau Ouest Algérien et de vérifier si celles-ci ne dépassent pas les puissances nominales des lignes.

. Dans le cas où une ou plusieurs lignes ne supporte (ent) pas la (es) puissance (s) transitée (s) on devra choisir ou combiner de manière optimale entre les différentes méthodes suivantes :

- . Monter en tension ;
- . Ramifier le réseau ;
- . Compenser le réseau.

S U M M A R Y

Our project deals with the calculations of power flows in the west Algerian's Electric power system and to check if they do not exceed the ratings of the lines.

In the case one or numerous lines can not be able to handle the calculated power flow, we have to choose or combine optimally the following methods :

- . Increasing the voltage
- . Adding other branches to the Electric power system
- . Compensate the Electric power system.

S O M M A I R E



	<u>PAGE</u>
<u>INTRODUCTION</u>	3
<u>A - GENERALITES</u>	
A-1-a/ - HISTORIQUE DU RESEAU.....	6
A-1-b/ - REPRESENTATION DU RESEAU.....	8
A-1-c/ - NATURE DU RESEAU DE TRANSPORT.....	9
<u>B - CONTROLE DE LA TENSION ET COMPESATION</u>	
B-1/ - CONTROLE DE LA TENSION ET DE LA PUISSANCE REACTIVE.....	14
B-2/ - REGLAGE DE LA TENSION.....	15
<u>CHAPITRE I</u>	
1/ - MODELISATION DES COMPOSANTS DU RESEAU	
1.a/ - LES COMPOSANTS D'UN RESEAU DE TRANS- PORT.....	19
1.b/ - MODELISATION DES COMPOSANTS.....	20
1.b.1/ - modélisation d'un ligne.	

1.b.1.1./ - Ligne courte.....	21
1.b.1.2./ - Ligne moyenne	
1.b.1.3./ - Ligne longue	
1.b.2./ - MODESLISATION DES TRANSFORMATEURS	
1.b.2.1./ - TRANSFORMATEUR A PRISES.....	25
1.b.3./ - MODELISATION DES ALTERNATEURS	
1.c./ - PER. UNIT.SYSTEM.....	28

CHAPITRE II

2/ - DEVELOPPEMENT DES EQUATIONS DU LOAD FLOW.....	31
2.1./ - EQUATIONS DU LOAD FLOW.....	32
2.1.1./ - CALCUL DU TRANSIT DE PUISSANCES ACTI- VES ET REACTIVE.....	38
2.1.1./ - CAPACITE DE TRANSIT.....	39
2.2./ - TRAITEMENT DES EQUATIONS	
2.2.1./ - METHODE DE GAUSS.....	40
2.2.2./ - METHODE DE GAUSS-SEIDEL.....	41

CHAPITRE III

SIMULATION ALGORYTHMIQUE

- ALGORYTHME DE RESOLUTION.....	43
- ORGANIGRAMME PRINCIPAL.....	45
- DONNEES DU PROBLEME.....	48
- ECRITURE DU PROGRAMME.....	57

CONCLUSION;

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

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

INTRODUCTION

Bien que le **KWh** soit peu élevé, le développement du réseau de transport et de distribution de l'énergie électrique met en évidence des masses financières très importantes.

Il suffit pour s'en convaincre de réaliser qu'un kilomètre de ligne double coûte deux millions de dinars et que beaucoup de pays en construisent des centaines de kilomètres par an, et bien davantage à des tensions inférieures, de plus la présence du réseau électrique sur le territoire est de plus en plus ressentie comme une gêne.

Autant de raisons qui font que l'on a vraiment intérêt à rechercher les meilleures méthodes d'études de développement qui permettent d'assurer la meilleure qualité de l'alimentation électrique avec une extension de ce dernier la plus faible possible.

Pari impossible, mais compromis possibles. La planification des réseaux consiste donc à rechercher les meilleurs compromis entre les avantages et les inconvénients du développement et de cette façon, à proposer les meilleurs choix.

Cette science existe depuis une vingtaine d'année mais a connue une extension considérable avec un développement plus récent de l'informatique.

Heureusement, devant la grande étendue du problème d'ensemble, les grands ordinateurs sont là, qui apportent une aide prodigieuses.

L'informatique a révolutionné la planification du réseau, ou plutôt elle lui a permis de naitre.

- G E N E R A L I T E S -

A. 1.a/ HISTORIQUE DU RESEAU

A l'origine l'électricité était produite par des générateurs à courant continu et n'était assurée que pour les charges spéciales telles que route, galeries, théâtre.

La centrale **HOLBORN VIADUCT** de Londres était inaugurée en janvier 1882 et de ce fait elle était l'une des premières centrales dans le monde, elle était composée d'un générateur à courant continu de 60 KW-110(V) entraînée par une machine à vapeur. En plus des charges spéciales citées ci-dessus, elle assurait la majorité de sa puissance aux consommateurs privés. Dans la même année, à New-York une centrale similaire était inaugurée.

La première importante centrale à courant alternatif en Angleterre était située à Belford.

Durant cette période, la dispute ou le conflit entre les avocats du courant continu et ceux du courant alternatif était à son point culminant. Durant cette même période des développements similaires apparaissent aux U.S.A. et dans le reste du monde.

J

A la suite de l'invention du transformateur, les avocats du courants alternatif l'emportaient sur ceux du courant continu et un développement continu des centrales locales se déclenche.

Chaque centrale assurait l'alimentation à sa propre ville.

En 1926, en Angleterre, un acte de parlement créa l'administration centrale de l'électricité, ayant pour objectif d'interconnecter les meilleurs des cinq cents centrales en opération par un réseau à haute tension appelé réseau de transport.

En 1948, l'industrie de production électrique était nationalisée et deux organisations prennent naissance.

Le service de distribution : s'occupant du réseau de distribution et de la consommation ;

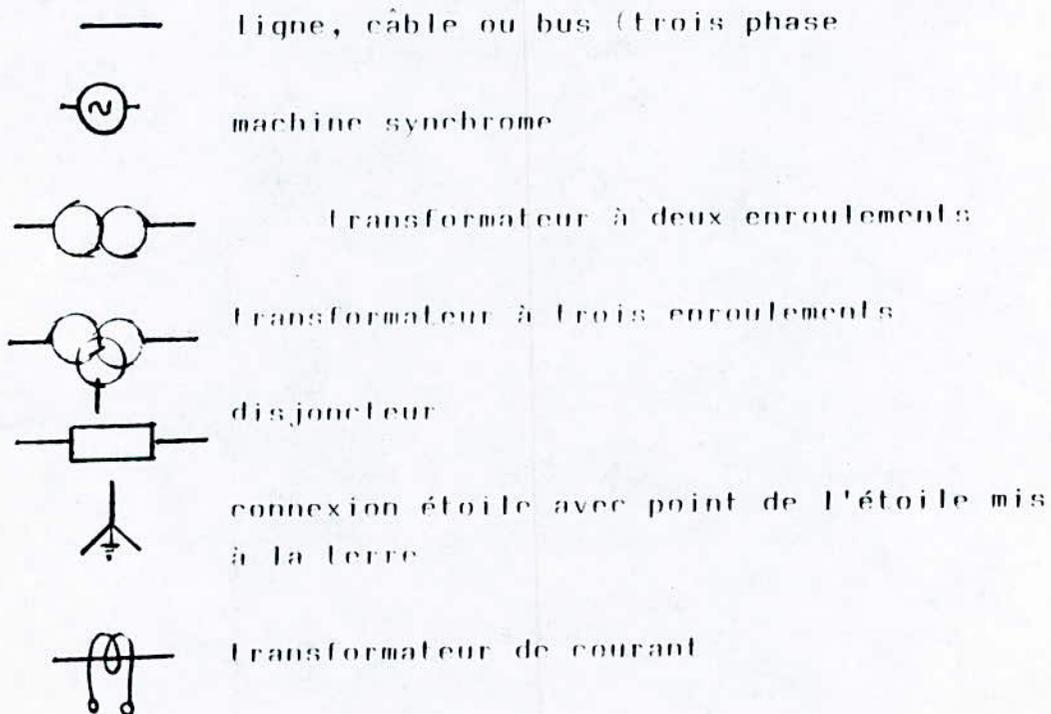
Le service de transport : s'occupant du réseau de transport et de la production.

),

A. 1.b/ REPRESENTATION DU RESEAU

La production d'électricité est assurée par des machines triphasées. La conception du réseau est telle que l'opération normale est proche du triphasé équilibré et souvent l'étude des conditions électriques par phase est suffisante pour donner une analyse complète. Egalité des charges dans les trois phases est assurée en branchant dans la mesure du possible la même charge.

Il est très utile de représenter graphiquement un réseau par un schéma unifilaire où chaque circuit triphasé est représenté par une seule ligne. Certaines conventions sont utilisées pour la représentation des composants d'un réseau.



A. 1.c/ NATURE DU RESEAU DE TRANSPORT

Transport, cela implique le transfert de la puissance par l'intermédiaire d'un circuit à haute tension entre les principaux centres de charges.

Les machines tournantes produisent toujours des tensions comprises entre 11 et 24 kv qui sont reliées au réseau de transport par des transformateurs élévateurs.

Aux postes par les connexions entre les différents éléments du réseau, tels que ligne, transformateurs et disjoncteurs sont réalisées. Une grande quantité de puissance est transmise à partir des centrales vers les postes des centres de charges à 400 KV et 275 KV (KV en Angleterre, 345 et 500 KV aux U.S.A et 220,60 en Algérie.

Le circuit fermé par ces lignes est appelé réseau de transport.

A. 2 / BUT DU LOAD FLOW

A chaque fois qu'on est confronté aux problèmes

énumérés ci-dessous, on fera appel à l'étude de
"LOAD FLOW" :

- 1./ - Ecoulement des MW et MVAR dans les lignes.
- 2./ - Tensions aux jeux de barres.
- 3./ - Effet d'ajouter ou de soustraire une ou plusieurs branches du réseau.
- 4./ - Effet d'une diminution temporaire de de la production et mise hors service de certains circuits du réseau.
- 5./ - Opération optimale des centrales et distribution de la charge.
- 6./ - Optimisation des pertes dans le réseau.
- 7./ - L'effet de changer la section des conducteurs et les tensions du réseau.
- 8./ - Choix optimal des capacités, des transformateurs et plage de variation des prises.

Dans notre projet, on se limitera à l'évaluation des puissances actives et réactives dans les branches du réseau et vérifier que les puissances apparentes de transit ne dépassent pas celles fixées par les constructeurs.

),

CONTROLE DE LA TENSION

ET

COMPENSATION

Pour satisfaire à la demande de consommation active de la clientèle, il est évidemment nécessaire de disposer à chaque instant, de la puissance active correspondante augmentée des pertes actives entraînées par son transport, de la source au point de livraison, mais ceci n'est pas suffisant, il faut également disposer de la puissance réactive en quantité suffisante, et aux emplacements appropriés, afin de pouvoir assurer le transport de la puissance demandée, dans ces conditions satisfaisantes :

Considérons une liaison A - B assimilable à une impédance $Z = R + jX$ qui transporte de A vers B une puissance apparente $P + jQ$.

Les pertes actives entraînées par ce transport sont de la forme : $p = R \frac{(P^2 + Q^2)}{U^2}$

Le transit de la puissance réactive accroît donc les pertes, phénomène bien connu.

La chute de tension entraînée par ce transport est : $\Delta U = \frac{RP + XQ}{U}$

(Cette formule approchée est acceptable si l'écart de phase entre les tensions aux deux extrémités n'est pas trop important).

Si R est faible devant X , ce qui est le cas pour le réseau de transport, la différence entre les modules des tensions aux deux extrémités qui se réduit sensiblement à ΔU est principalement due au transport de la puissance réactive de A vers B .

Pour réduire l'importance des pertes et des chutes de tensions, il faudra donc éviter de transporter de la puissance réactive, celle-ci doit être produite autant que possible à l'endroit où elle est consommée.

Tout transit diminuera la possibilité de transport de puissance réactive. Et, pour satisfaire à une même consommation active, il faudra augmenter le nombre des ouvrages à construire, ou modifier leur consistance, pour augmenter leur capacité, donc augmenter les investissements.

En résumé, on peut retenir pour :

Le transit de puissance réactive entraîne une

),

augmentation des pertes actives.

Pour maintenir les tensions d'un réseau donné, dans une plage déterminée, il faut éviter toute circulation importante de puissance réactive.

Pour une puissance active donnée à desservir, la circulation de puissance réactive dans un réseau entraîne des surinvestissements.

B.1./. Contrôle de la tension et de la puissance réactive.

Principe de réglage

Le réglage de la tension a pour but de maintenir le module de tension en tous les points du réseau à la meilleure valeur possible.

Le réglage de la tension met en évidence les moyens de réduire les chutes de tensions relatives.

D'après la formule :

$$\Delta U = \frac{RP + XQ}{U}$$

1^o/ - Augmenter la tension nominale **U** c'est-à-dire ce que l'on fait :

Lorsque l'on a à transiter de fortes charges ($P + JQ$) par des lignes longues dont de fortes impédances ($R + jX$), c'est-à-dire du réseau de transport, où l'on choisit, lors de la construction des lignes, les hautes tensions et même les très hautes tensions.

2°/ - Réduction de l'inductance X par condensateur série ; en effet un condensateur de capacité C placé dans une ligne d'inductance L , réduit l'impédance X , de sa valeur initiale $L\omega$ à $(L\omega - \frac{1}{C\omega})$; on peut donc ainsi annuler l'inductance X ; il s'agit là d'un véritable moyen de réglage puisqu'on peut ajuster la capacité des condensateurs aux besoins de réglage, il trouve son application aussi bien dans les réseaux de transport que dans les réseaux de distribution à moyenne tension.

B.2./ Réglage de la tension de transport

Le problème du réglage de la tension prend dans les réseaux de transport un aspect différent de celui qu'il a dans la distribution et ceci pour deux raisons fondamentales :

. La première est qu'aucune utilisation n'est alimentée directement sous la tension de transport (même les usages industriels raccordés aux réseaux

220 KV et 63 KV le sont à travers un transformateur qui laisse une possibilité de réglage).

. La seconde est que les transits de puissance ne se font pas toujours dans le même sens sur les lignes de transport.

Il en résulte que :

L'exploitation optimale est celle où la tension est la plus élevée possible, compte tenu des caractéristiques des isolements. Mais il faut tenir compte des surtensions internes qui apparaissent de façon transitoire lors d'incidents ou de manoeuvre sur le réseau.

On réglera la tension à une valeur élevée au départ des centrales, qui doivent donc effectuer un réglage de tension. On évitera les chutes de tensions dans le réseau et le meilleur moyen est d'agir sur le transit d'énergie réactive, puisque la résistance des lignes de transport est toujours assez petite pour que l'on utilise la formule approchée :

$$\Delta U = \frac{XQ}{U^2}$$

Enfin la production de la puissance réactive

),

nécessite certaines dépenses, il y a donc un optimum économique entre :

- . Les différentes sources d'énergie réactive
- . Le coût du transit de cette énergie dans le réseau.
- . La qualité de la tension de transport.

La recherche de cet optimum nécessite des calculs, elle conduit à élaborer un plan de tension, d'où l'on déduit l'énergie réactive à faire fournir ou absorber par les différents appareils dont on dispose pour cela.

Le principe est de réduire le plus possible les transits de puissances réactives, ce qui s'obtient en faisant appel :

aux alternateurs synchrones : capables de produire ou de consommer de l'énergie réactive suivant qu'ils sont sur ou sous-excités ;

aux inductances : dans certains postes où la mise hors tension d'une ligne à haute tension risquerait de créer des surtensions dangereuses ;

aux compensateurs synchrones : qui ont l'avantage de permettre un réglage continu de puissance réactive et surtout à volonté de produire ou consommer de l'énergie réactive ;

condensateur série : dans le cas des lignes très longues de transport, des moyens de réglage décrits ci-dessus, peuvent se trouver insuffisants, la seule ressource est alors la diminution de l'impédance de la ligne en y incluant un condensateur série.

- C H A P I R E _ I -

1. MODELISATION DES COMPOSANTS D'UN RESEAU DE TRANSPORT

1.a/ - Les composants d'un réseau de transport

Les groupes générateurs d'énergie sont, pour des raisons techniques et économiques rarement placés juste à côté des appareils utilisant l'énergie qu'ils produisent.

Pour réaliser la liaison nécessaire entre les uns et les autres, il faut donc construire des lignes, les tronçons des lignes sont raccordés entre eux à des installations appelées postes.

Les postes comprennent des appareils de mesure, de coupure, de contrôle, des transformateurs, des appareils de réglage et de commande. Tous ces appareils sont regroupés les uns dans des "cellules" reliées électriquement entre elles par des "jeux de barres" (bus), les autres dans des panneaux de mesure ou de contrôle, et dont le plus utile à la surveillance du poste sont regroupés sur un "tableau".

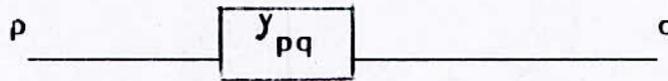
Les postes constituent "les noeuds" du réseau, les lignes en forment les "branches". Ces branches constituent des mailles (ou boucles).

1.b/ Modélisation des composants

1.b.1/ Modélisation d'une ligne

1.b.1.1/ Ligne courte

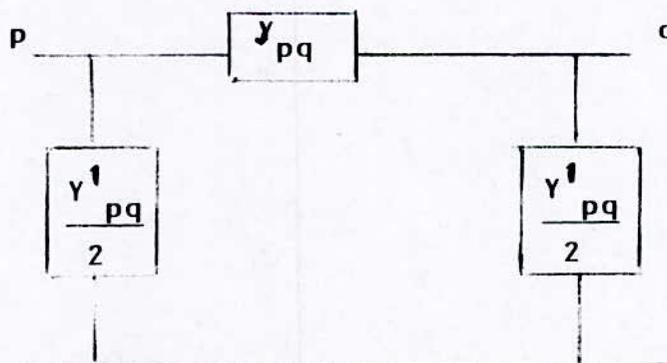
Sa longueur est inférieure ou égale à 80 km, le schéma équivalent de cette ligne est constitué d'une impédance série.



(Fig. 1)

1.b.1.2. Ligne moyenne

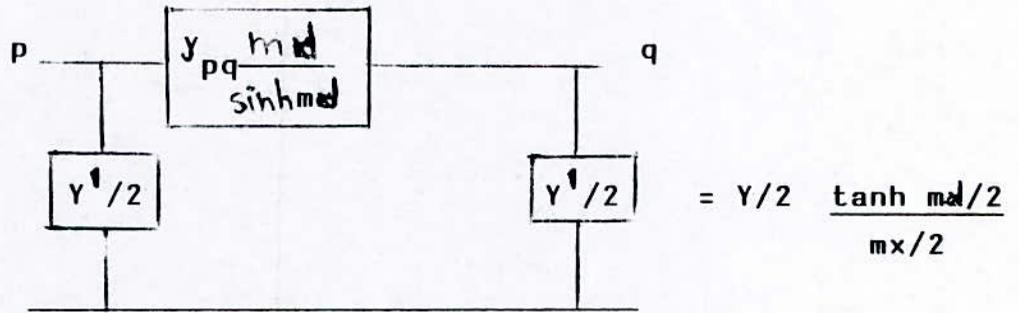
La longueur de cette ligne est comprise entre 80 et 160 km le schéma équivalent en π est constitué d'une admittance série :



(Fig.2)

1.b.1.3 / Ligne longue

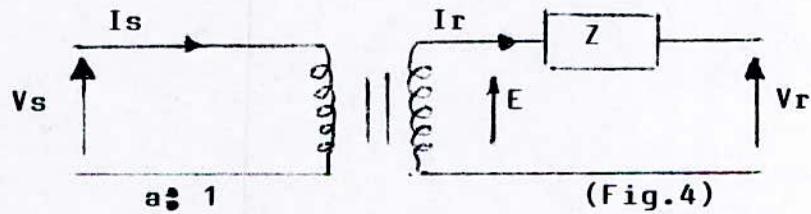
Si sa longueur dépasse les 160 km le schéma en π devient :



(fig.3)

1.b.2/ Modélisation des transformateurs :

Soit le schéma équivalent d'un transformateur :



Z : impédance du transformateur

Vs : aE

Vr : E - Z Ir

En éliminant E des deux équations on obtient :

$$I_r = \frac{1}{Z} \left[\frac{V_s}{a} - V_r \right]$$

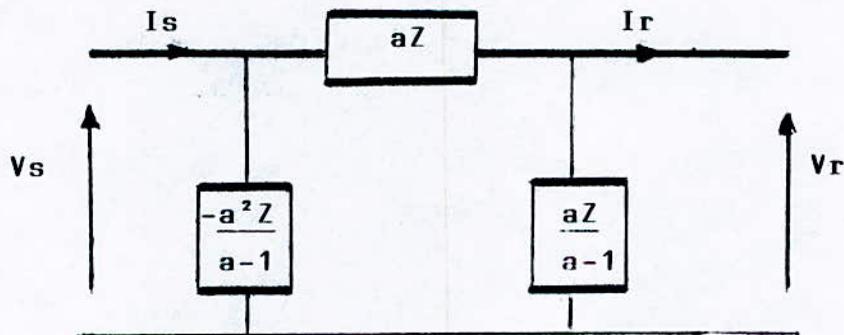
$$I_r = \frac{1}{Z} \left[\frac{V_s - V_r}{a} - \frac{(a-1)}{a} V_r \right]$$

$$I_s = I_r/a$$

$$I_s = \frac{1}{Z} \left[\frac{V_s}{a^2} - \frac{V_r}{a} \right]$$

$$= \frac{1}{Z} \left[\frac{V_s - V_r}{a} - \frac{V_s (a-1)}{a^2} \right]$$

On déduit le schéma équivalent en π :



(Fig. 5)

L'impédance de la ligne est additionnée avec l'impédance série du transformateur.

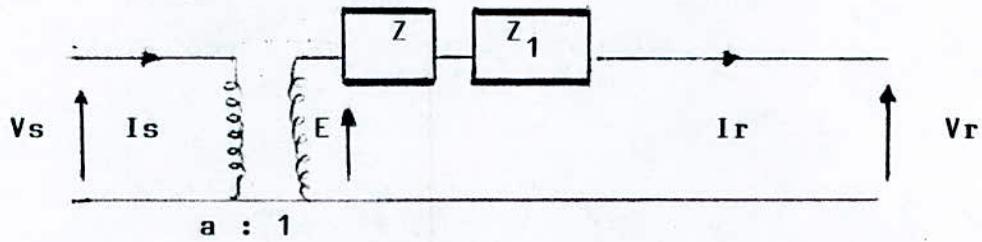
Si Z_1 est l'impédance de la ligne;

Les courants I_r et I_s deviennent :

$$I_r = \frac{1}{Z + Z_1} \left[\frac{V_s - V_r}{a} - \frac{V_r (a - 1)}{a} \right]$$

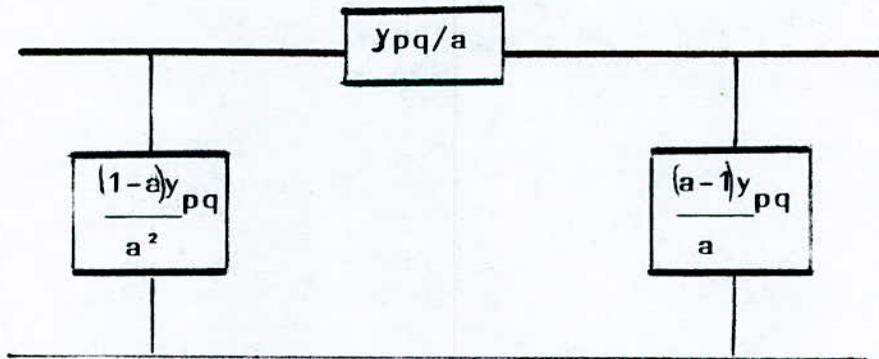
$$I_s = \frac{1}{Z + Z_1} \left[\frac{V_s - V_r}{a} - \frac{(a - 1) V_s}{a^2} \right]$$

Ce schéma équivalent ~~en~~ devient :



(Fig. 6)

Si le transformateur est connecté entre deux J.D.B. p et q, le schéma devient :

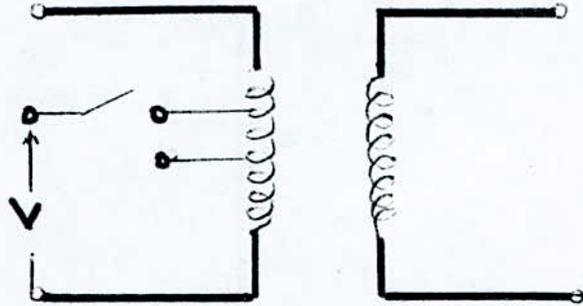


(fig. 7)

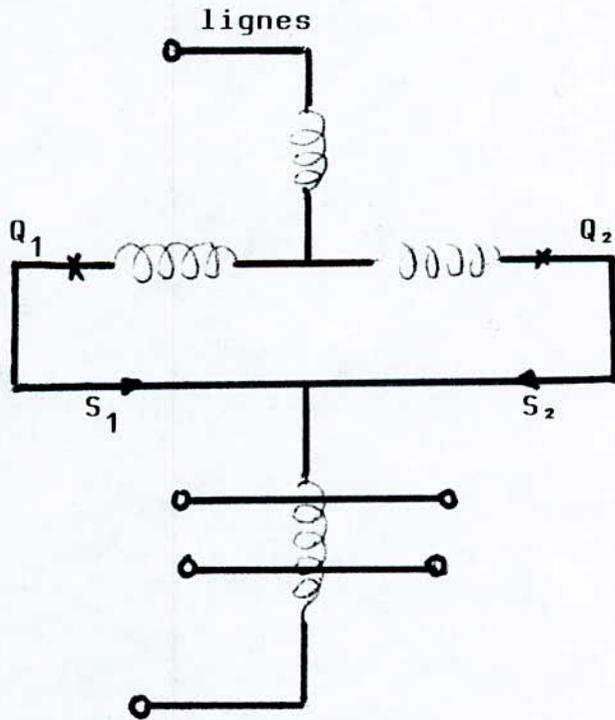
1.b.2.1/ - Transformateurs à prise

Aujourd'hui les transformateurs avec le réglage en charge sont très répandus, surtout dans les réseaux de transport. Les régleurs en charge permettent la compensation des chutes de tension par l'introduction d'une tension additionnelle (au départ) sans aucune interruption de services. Les prises sont manoeuvrables automatiquement les régulateurs de tension ou manuellement.

MODELISATION D'UN TRANSFORMATEUR A PRISES



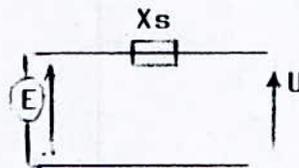
(fig. 8) (Hors charge)



(fig. 9) (en charge)

1.b3 / - Modélisation des alternateurs

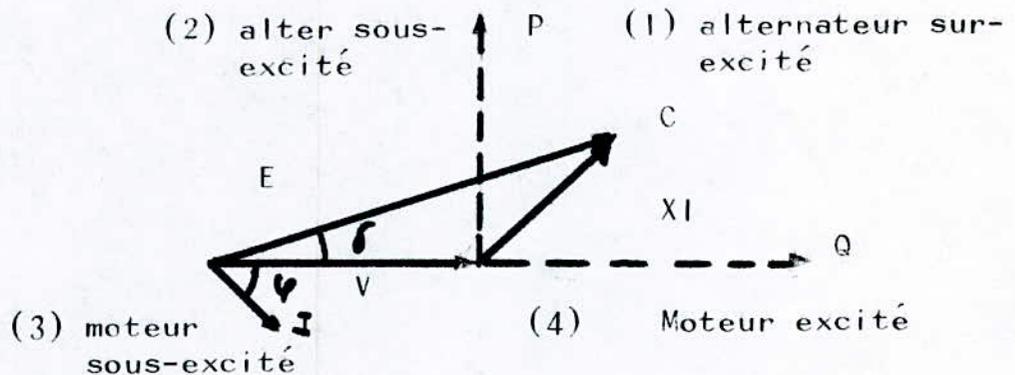
La production de l'énergie électrique est assurée par des machines triphasées (génératrices synchrones ou asynchrone).



L'équation simplifiée d'une machine synchrone s'écrit :

$$E = U + JX_s I$$

Le diagramme ci-dessous nous donne suivant la position du vecteur I, les différents modes de fonctionnement de la machine



1.c/ Per. Unit. System

Dans les calculs du Load Flow la puissance apparente a été prise comme référence égale à 100 MVA

$$S_{base} = 100 \text{ MVA}$$

Donc en monophasé

$$S_{base} = P_{base} = Q_{base} = V_{base} I_{base}$$

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{V_{base}}$$

De même :

$$Z_{base} = X_{base} = R_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}}$$

$$Y_{base} = \frac{I_{base}}{V_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} = \frac{V_{base}}{S_{base}/V_{base}} = \frac{(V_{base})^2}{S_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{(kV_{base})^2}{\text{MVA base}}$$

$$\text{Valeur en p.u} = \frac{\text{Valeur actuelle}}{\text{Valeur de base.}}$$

$$Z(\text{p.u}) = \frac{Z_{act.}}{Z_{base}} \quad I(\text{p.u}) = \frac{I_{actuel}}{I_{base}}$$

$$Z(\text{p.u}) = \frac{Z_{act.}}{(kV_{base})^2} \times \text{MVA base}$$

En triphasé :

$$S_{base} = P_{base} = Q_{base} = \sqrt{3} V_{base} I_{base}$$

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} V_{base}}$$

$$Z_{base} = X_{base} = R_{base} = \frac{V_{base}}{\sqrt{3} I_{base}} \quad (\Omega \text{ par phase})$$

$$Y_{base} = \frac{\sqrt{3} I_{base}}{V_{base}}$$

De même :

$$Z_{base} = \frac{(k V_{base})^2}{(MVA)_{base}}$$

$$Z \text{ (p.u)} = \frac{Z_{act.} \times MVA_{base}}{(KV)^2_{base}}$$

- CHAPITRE II -

11

2/- DEVELOPPEMENT DES EQUATIONS DU LOAD FLOW

Normalement trois types de bus (jeu de barres) sont identifiés dans un réseau :

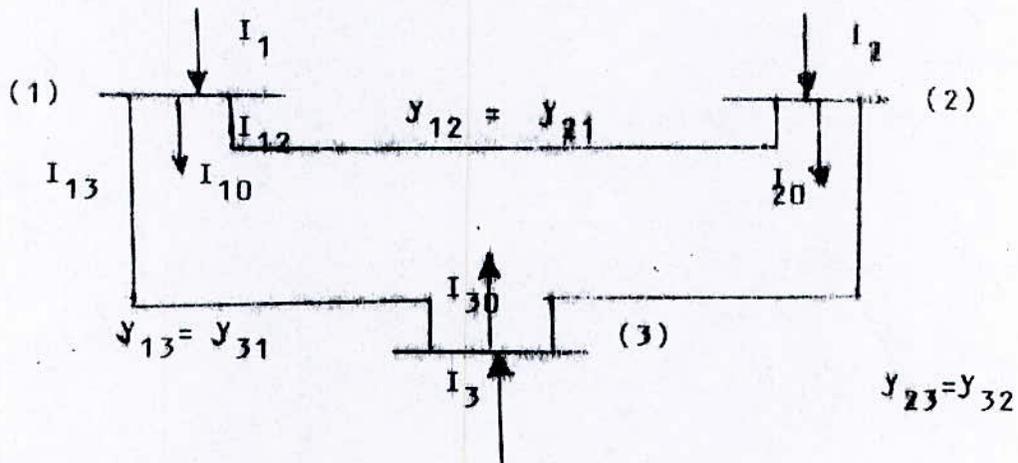
- 1/ - Swing ou slack bus générateur où le module $|V|$ de la tension et l'argument δ_v sont spécifiés ;
- 2/ - bus générateur ou $|V|$ et P sont spécifiés ;
- 3/ - bus de charge ou P et Q sont spécifiés.

Dans chaque noeud cité, quatre variables sont présentes : P , Q , $|V|$ et δ_v , dans chaque cas deux variables sont connues et deux autres sont inconnues.

On ne peut pas spécifier trois variables dans un bus car cela placerait une restriction sur le réseau. Mais cela ne nous empêche pas par exemple dans un bus générateur ou $|V|$ et P sont donnés peut demander que Q doit être bornée. Le problème de "LOAD FLOW" peut être résolu sans borner l'énergie réactive dans un bus générateur, sa valeur est alors donnée par la solution du LOAD FLOW. Si Q est au-delà de l'intervalle désiré, alors quelque chose devra être changé, pour que Q soit dans l'intervalle désiré on additionne une batterie de condensateurs.

2-1/ - EQUATIONS DU LOAD FLOW D'UN RESEAU A TROIS NOEUDS

Soit un réseau à trois noeuds :



$$I_1 = I_{10} + I_{12} + I_{13}$$

$$= V_1 y_{10} + (V_1 - V_2) y_{12} + (V_1 - V_3) y_{13}$$

$$= V_1 (y_{10} + y_{12} + y_{13}) + V_2 y_{12} - V_3 y_{13}$$

$$I_1 = V_1 Y_{11} + V_2 Y_{12} + V_3 Y_{13}$$

On en déduit :

$$Y_{11} = y_{10} + y_{12} + y_{13}$$

$$Y_{12} = - Y_{12}$$

$$Y_{13} = - Y_{13}$$

De même pour les autres bus :

$$I_2 = Y_{12} V_1 + Y_{22} V_2 + Y_{23} V_3$$

$$I_3 = Y_{13} V_1 + Y_{32} V_2 + Y_{33} V_3$$

Sous la forme matricielle

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix}$$

Sous forme compacte :

$$I_p = \sum_{q=1}^3 Y_{pq} V_q \quad p = 1, 2, 3, \quad (1)$$

Pour un réseau à n bus :

$$I_p = \sum_{q=1}^n Y_{pq} V_q \quad p = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

de (2) on obtient :

$$I_p = Y_{pp} V_p + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n Y_{pq} V_q \quad p = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

De l'expression (3) :

$$V_p = \frac{I_p}{Y_{pp}} - \frac{1}{Y_{pp}} \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n Y_{pq} V_q \quad (4)$$

$p = 1, 2, \dots, n$
 $p \neq s$ (slack)

On sait par ailleurs que :

La puissance apparente S

$$S_p = V_p I_p^* = P_p + JQ_p$$

d'où

$$I_p = \frac{P_p - JQ_p}{V_p^*} \quad (5)$$

(5) dans (4)

$$V_p = \frac{1}{Y_{pp}} \left[\frac{P_p - JQ_p}{V_p^*} - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n Y_{pq} V_q \right] \quad (6)$$

$p = 1, 2, \dots, n$
 $p \neq s$

pour un bus générateur, P_p , et $\{V_p\}$ sont connues
mais Q_p est inconnue.

Dans ce cas la valeur de Q_p a inclure dans (6)

est calculée comme suit :
de l'expression (2) :

$$I_p = \sum_{q=1}^n Y_{pq} V_q$$

est de :

$$P_p - jQ_p = V_p^* I_p = V_p^* \sum_{q=1}^n Y_{pq} V_q$$

On déduit :

$$Q_p = - \Im \left[V_p^* \sum_{q=1}^n Y_{pq} V_q \right] \quad (7)$$

Si l'ordinateur ne peut pas calculer l'imaginaire de cette expression (on procède comme suit) :

On sait que :

$$P_p - jQ_p = V_p^* \sum_{q=1}^n Y_{pq} V_q$$

$$\text{et } V_p = (e_p + jf_p)$$

$$V_q = (e_q + jf_q)$$

$$Y_{pq} = (G_{pq} - jB_{pq})$$

Donc :

$$P_p - jQ_p = (e_p + jf_p) * \sum_{q=1}^n (G_{pq} - jB_{pq}) (e_q + jf_q)$$

$$P_p = \sum_{q=1}^n e_p (e_q G_{pq} + f_q B_{pq}) \times f_p (f_q G_{pq} - e_q B_{pq})$$

Et

$$Q_p = \sum_{q=1}^n f_p (e_p G_{pq} + f_q B_{pq}) - e_p (f_q G_{pq} - e_q B_{pq}) \quad (8)$$

Une fois Q_p calculée, on doit vérifier si cette valeur n'est pas inférieure à une valeur minimale que peut débiter la génératrice (problème de stabilité) et n'est pas supérieure à une valeur maximale (problème d'échauffement du rotor) si $Q_p < Q_p \text{ min}$, la valeur Q_p à substituer pour cette itération devra être $Q_p \text{ min}$, si $Q_p > Q_p \text{ max}$, la valeur $Q_p \text{ max}$ et si $Q_p \text{ min} < Q_p < Q_p \text{ max}$, la valeur à substituer pour cette itération devra être Q_p .

La violation de la puissance réactive limite est due à la tension assumée à ce bus générateur pouvant être soit petite ou soit grande. Puisque $|V_p| G_p$ peut être obtenue seulement en contrôlant la puissance réactive, donc

il est possible qu'on a ~~assumé~~ $|V_p|$ au-delà de la capacité de la puissance réactive que la génératrice peut produire. Si Q_p pour un bus p générateur est calculé après avoir pris $|V_p|_{sp}$ ou δv correspondant à cette itération et si Q_p obtenue viole la limite, la valeur de la tension qu'on devra prendre correspondra à la tension de cette itération et non $|V_p|_{sp}$;

Il est possible d'obtenir une diminution du temps de réponse de l'ordinateur si toutes les opérations arithmétiques sont calculées en avance quand ils ne changent pas devant la procédure de l'itération, posons :

$$A_p = \frac{P_p - JQ_p}{Y_{pp}} \quad \begin{array}{l} q = p = 1, 2, \dots, n \\ p \neq s \end{array} \quad (9)$$

et

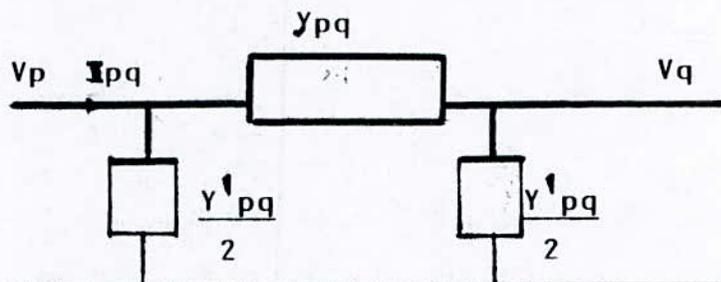
$$B_{pq} = \frac{Y_{pq}}{Y_{pp}} \quad \begin{array}{l} p = 1, 2, \dots, n \\ p \neq s \\ q = 1, 2, \dots, n \\ q \neq p \end{array} \quad (10)$$

2.1.1./ - CALCUL DU TRANSIT DES PUISSANCES ACTIVES ET REACTIVES -
chaque ligne

Une fois que les tensions des bus sont obtenues

L'écoulement de la puissance active et réactive peut-être obtenue :

Soit un modèle d'une ^{ligne} de transport :



$$I_{pq} = (V_p - V_q) y_{pq} + V_p \frac{Y'_{pq}}{2}$$

$$P_{pq} - JQ_{pq} = V_p^* I_{pq}$$

$$= \left[V_p^* \left[(V_p - V_q) y_{pq} + V_p \frac{Y'_{pq}}{2} \right] \right]$$

$$P_{pq} - JQ_{pq} = V_p^* (V_p - V_q) y_{pq} + V_p^* V_p \frac{Y'_{pq}}{2}$$

P_{pq} est l'écoulement de la puissance active du bus p vers le bus q et Q_{pq} est l'écoulement de la puissance réactive du bus p au bus q ;

De même on obtient :

$$P_{qp} - JQ_{qp} = V_q^* (V_q - V_p) y_{pq} + V_q^* V_q \frac{Y'_{pq}}{2}$$

Les pertes actives et réactives

$$P_{pertes} - JQ_{pertes} = (P_{pq} + P_{qp}) - J(Q_{pq} + Q_{qp})$$

$$P_{pertes} = P_{pq} + P_{qp} \text{ (actives)}$$

$$Q_{pertes} = Q_{pq} + Q_{qp} \text{ (réactives)}$$

2.1.2./ -CAPACITE DE TRANSIT

(Dûe à l'effet thermique)

Considérons une liaison pq assimilable à une impédance $Z = R + jX$ qui transporte de p vers q une puissance apparente $P + jQ$.

Les pertes actives entraînées par ce transport sont de la forme : $p = R \frac{(P^2 + Q^2)}{U^2}$

de même, la quantité de chaleur dégagée dûe à l'échauffement thermique de la ligne est donnée par : $p = 3CA (\Delta t)$

C : Coefficient de refroidissement

A / Surface d'échange

Δt : différence de température (t_1, t_2)

t_1 : température conductrice

t_2 : température ambiante.

D'où l'égalité :

$$R \frac{(P^2 + Q^2)}{U^2} = 3CA (t_1 - t_2)$$

$$\frac{RS^2}{U^2} = 3CA (t_1 - t_2)$$

$$S = U \sqrt{\frac{3CA (t_1 \text{ Max.} - t_2)}{R}}$$

2.2./ TRAITEMENT DES EQUATIONS

2.2.1./ Méthode de GAUSS :

La procédure consiste à assumer des valeurs initiales pour chacune des variables indépendantes ($v_1^{(0)}, v_2^{(0)}, \dots, v_n^{(0)}$) ou l'indice (0) indique une approximation initiale.

Les valeurs initiales sont souvent ($1 + J_0$) pour tous les bus et ($a + J_0$) pour le slack bus.

Les valeurs ($v_1^{(1)}, v_2^{(1)}, v_3^{(1)}, \dots, v_n^{(1)}$) sont substituées dans la prochaine itération, en général pour l'itération k on obtient :

$$v_p^{k+1} = \frac{A_p}{(v_p^k)^*} - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p \\ p=1, 2, \dots, n}}^n B_{pq} v_q^k \quad p \neq s$$

Les problèmes de réseaux sont bien conditionnés et doivent en général converger, généralement cette convergence est assurée si les coefficients a_{ii} de diagonale sont supérieurs aux coefficients a_{ij} avec $i \neq j$.

2.3.2. Méthode de GAUSS-SEIDEL

Cette méthode est une approximation de la technique de GAUSS. Cette modification réduira peut-être le nombre d'itération pour aboutir à :

$$v_p^k = v_p^{k-1}$$

pour toutes les valeurs de p . la déviation de la technique de GAUSS est comme suit :

Au lieu de substituer les approximations $k-1$ dans toutes les équations dans k itération, les approximations k sont aussitôt utilisées une fois calculées.

En général on obtient de (6)

$$v_p^{k+1} = \frac{1}{Y_{pp}} \left[\frac{P_p - JQ_p}{(v_p^k)^*} - \sum_{q=1}^{p-1} Y_{pq}^{k+1} v_q - \sum_{q=p+1}^n Y_{pq} v_q^k \right]$$

$p = 1, 2, \dots, n$ $p \neq s$

$$= \frac{A_p}{(v_p^k)^*} - \sum_{q=1}^{p-1} B_{pq} v_q^{k+1} - \sum_{q=p+1}^n B_{pq} v_q^k$$

$p \neq s$
 $p = 1, 2, \dots, n$

- CHAPITRE III -

ALGORythME DE RESOLUTION

* Lecture des données

$y(p,q)$, $y1(p,q)$, $y_p(p,q)$, $V_{sp}(P)$, $PC(P)$, $Qc(P)$
 $PG(P)$, EPS , $Q21\ MIN$, $Q22\ MIN$, $Q21\ MAX$, $Q22\ MAX$.

* Appel au sou-programme (ETE) :

Calcul de l'expression $A(P)$ et $B(p,q)$
avec $A(P) = (Pc(p))$, $- Qc(p) / Y(p,p)$
et $B(p, p) = Y(p,p) / Y(p,p)$

* Tester le slack bus

* Tester le bus générateur

* Appel au sous programme (hiver) :

- calcul de l'énergie réactive $QG(p)$ des
générateurs

* Tester l'énergie réactive $QG(p)$

* appel au sous programme HOUSE

Calcul de $A(p)$ des générateurs avec :
 $A(p) = (PG(p))$, $- QG(p) / Y(p,p)$

* Appel au sous programme (MERE)

résolution de l'équation de la tension par l'une des méthodes (GAUSS ou GAUSS-SEIDEL).

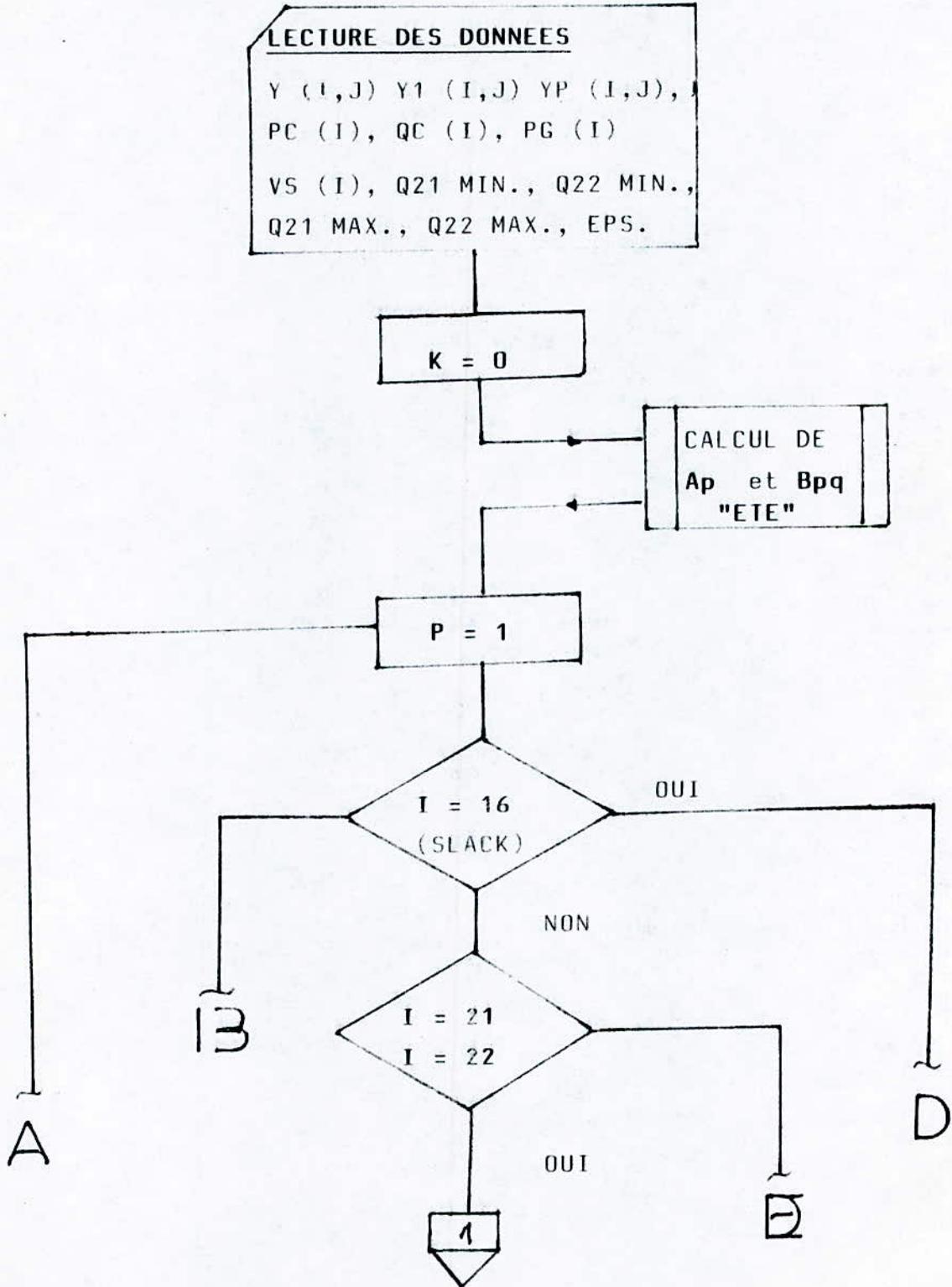
* Tester tous les bus

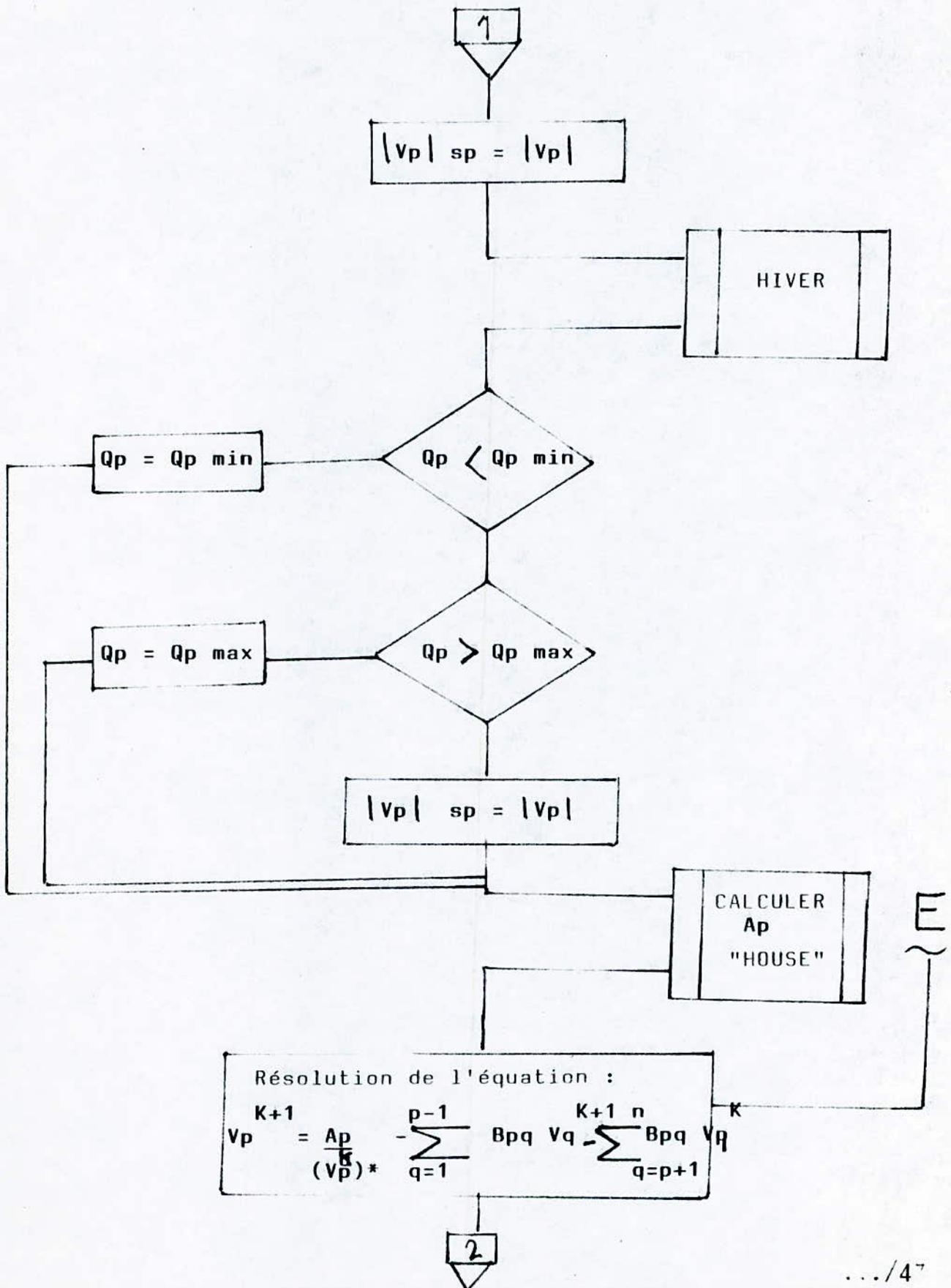
* Tester la convergence (ΔV_{MAX}). LT. EPS

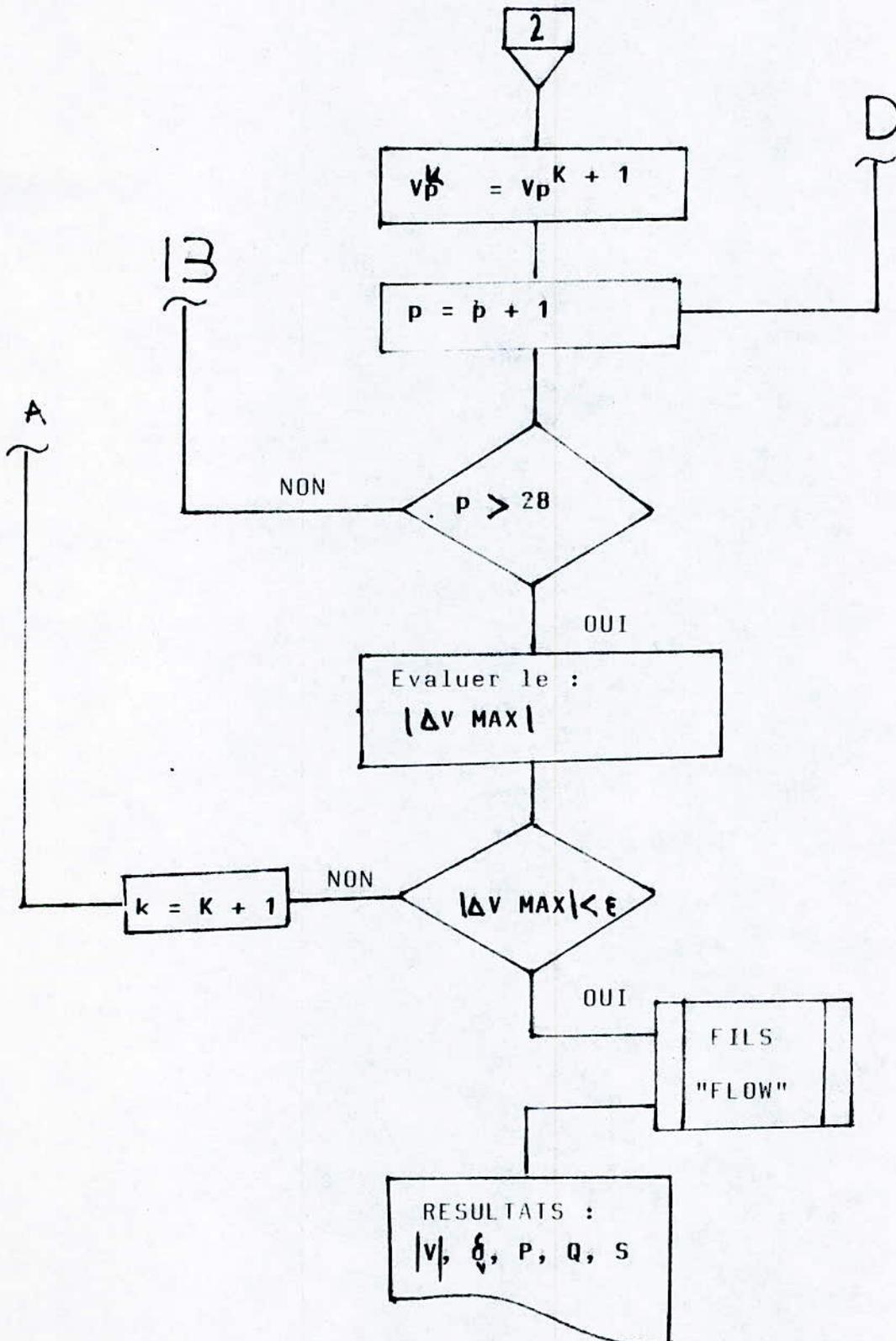
* Appel au sous programme FILS

Calcul du FLOW des puissances;

Organigramme Principal:







- D O N N E E S _ D U _ P R O B L E M E -

N° DU J.D.B.	TENSION ASSUMEE (P.U)	GENERATION		CHARGES		Y' pq/2 (P.U)
		P (P.U)	Q (P.U)	P (P.U)	Q (P.U)	
1 (SEK)	1.0 + J0.0	0.0	0.0	0.20	0.10	(0.0 + J0.0001)
2 (ORS)	1.0 + J0.0	0.0	0.0	0.65	0.31	(0.0 + J0.0047)
3 (GHA)	1.0 + J0.0	0.0	0.0	0.47	0.29	(0.0 + J0.073)
4 (ZBA)	1.0 + J0.0	0.0	0.0	0.13	0.06	(0.0 + J0.0028)
5 (RAB)	1.0 + J0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	(0.0 + J0.0161)
6 (CDM)	1.0 + J0.0	0.0	0.0	0.20	0.10	(0.0 + J0.0072)
7 (ATE)	1.0 + J0.0	0.0	0.0	0.25	0.12	(0.0 + J0.0071)
8 (BES)	1.0 + J0.0	0.0	0.0	0.34	0.23	(0.0 + J0.115)
9 (TLE)	1.0 + J0/0	0.0	0.0	0.42	0.20	(0.0 + J0.1751)
10 (ZAH)	1.0 + J0.0	0.0	0.0	0.49	0.29	(0.0 + J0.1427)
11 (PEL)	1.0 + J0.0	0.0	0.0	0.35	0.17	(0.0 + J0.0155)
12 (HAA)	1.0 + J0.0	0.0	0.0	0.22	0.11	(0.0 + J0.0053)

13	(ARZ)	1.0 + 30.0	0.0.	0.0	1.06	0.70	(0.0 + 30.0047)
14	(SBA)	1.0 + 30.0	0.0	0.0	0.37	0.18	(0.0 + 30.1476)
15	(BOH)	1.0 + 30.0	0.0	0.0	0.14	0.07	(0.0 + 30.0055)
16	(MHP)	1.1 + 30.0	-	-	0.00	0.00	(0.0 + 30.4213)
17	(MHC)	1.0 + 30.0	0.0	0.0	0.00	0.00	(0.0 + 30.0043)
18	(ABP)	1.0 + 30.0	0.0	0.0	0.33	0.16	(0.0 + 30.0034)
19	(REL)	1.0 + 30.0	0.0	0.0	0.32	0.15	(0.0 + 30.0598)
20	(BHE)	1.0 + 30.0	0.0	0.0	0.33	0.16	(0.0 + 30.0057)
21	(TIP)	1.0 + 30.0	1.5	-	0.00	0.00	(0.0 + 30.1466)
22	(TIC)	1.0 + 30.0	1.0	-	0.00	0.00	(0.0 + 30.0113)
23	(OUS)	1.0 + 30.0	0.0	0.0	0.33	0.16	(0.0 + 30.1391)
24	(SAI)	1.0 + 30.0	0.0	0.0	0.00	0.00	(0.0 + 30.1391)
25	(EC)	1.0 + 30.0	0.0	0.0	0.14	0.07	(0.0 + 30.0040)

CO	DU J.D.B.	ADMITTANCE Y (I, J) (P.W)	CODE DU J.D.B	ADMITTANCE Y (I, J) (P.W)
	1 - 1	(28.01 - J89.27)	8 - 8	0.96 - J2.92
	1 - 5	(-28.01 + J82.28)	9 - 9	19.98 - J68.26
	2 - 2	(5.65 - J17.17)	9 - 10	-2.60 - J9.47
	2 - 7	(-0.5 + J0.92)	9 - 14	-2.85 + J13.64
	2 - 11	(-3.95 + J12.47)	9 - 28	(-7.17 + J22.66)
	2 - 12	(-1.20 + J3.79)	10 - 10	14.15 - J56.08
	3 - 3	(5.64 - J19.79)	10 - 11	-1.07 + J2.97
	3 - 9	(-5.64 + J19.80)	10 - 12	-1.08 + J3.41
	4 - 4	(1.07 - J1.85)	10 - 14	-0.56 + J1.56
	4 - 9	(-1.07 + J1.86)	10 - 15	-0.73 + J1.35
	5 - 5	(89.94 - J1.689)	10 - 16	-7.12 + J34.63
	5 - 11	-4.18 + J2.82	10 - 20	-0.99 + J2.83
	6 - 6	29.59 - J78.36	11 - 11	60.55 - J85.05
	6 - 11	-26.32 + J34.56	12 12	4.25 - J16.18
	7 - 7	(2.11 - J5.14)	12 - 13	-0.73 + J4.82
	7 - 8	-0.96 + J3.04	12 - 18	-1.24 + J4.17
	7 - 9	-0.65 + J1.19	13 - 13	1.45 - J9.58

		13 - 16	-0.72 + J4.77
14 - 14	9.3 - J38.81	22 - 22	(0.34 - J7.73
14 - 24	- 2.94 + J14.44	23 - 23	4.25 - J20.64
15 - 15	1.48 - J2.51	24 - 24	6.22 - J40.23
15 - 24	- 0.24 + J1.17	24 - 25	-0.33 + J0.92
16 - 16	14.43 - J80.81	24 - 26	-0.28 + J6.17
16 - 17	- 0.1 + J8.28 x 3	25 - 25	0.33 - J0.91
16 - 18	(-1.3 + J8.6)	26 - 26	0.28 - J6.15
16 - 19	- 3.44 + J16.58	27 - 27	2.94 - J14.13
16 - 23	- 1.75 + J8.45	28 - 28	7.17 - J22.65
17 - 17	(0.1 - J8.27)		
18 - 18	2.54 - J12.76		
19 - 19	4.19 - J18.18		
19 - 20	- 0.35 + J0.97		
20 - 20	1.34 - J3.79		
21 - 21	5.16 - J38.80		
21 - 22	- 0.34 + J7.85		
21 - 23	- 2.5 + J12.44		

CODE DU J.D.B. p - q	ADMITTANCE Y (p, q) (P.V)	CHARGE DE LA LIGNE $Y_{pq}^1/2$ (P.V)	TENSION NOMINALE (Kv)	CAPACITE DE TRANSIT (P.V)
1 - 5	(28.01 - J89.28)	(0.0 + J0.0001	60.0	0.60
2 - 7	0.5 - J0.92	0.0 + J0.0032	60.0	0.25
2 - 11	3.92 - J12.47	0.0 + J0.0004	60.0	0.60
2 - 12	1.2 - J3.79	0.0 + J0.0011	60.0	0.50
3 - 9	5.64 - J19.8	0.0 + J0.0360	220.0	2.13
4 - 9	1.07 - J1.86	0.0 + J0.0017	60.0	0.26
5 - 6	32.7 - J43.72	0.0 + J0.0032	60.0	0.50
5 - 11	4.18 - J2.82	0.0 + J0.0003	60.0	1.54
5 - 11	25.05 - J33.16	0.0 + J0.0041	60.0	0.50
6 - 11	26.32 - J34.65	0.0 + J0.0052	60.0	0.60
7 - 8	0.96 - J3.04	0.0 + J0.0014	60.0	0.50
7 - g	0.65 - J1.19	0.0 + J0.0025	60.0	0.18

9 - 10	(2.60 - J9.47)	(0.0 + J0.0752)	220.0	1.54
9 - 14	(2.85 - J13.64)	(0.0 + J0.0578)	220.0	2.24
9 - 28	(7.17 - J22.66)	(0.0 + J0.0002)	60.0	0.60
10 - 11	1.07 - J2.97	(0.0 + J0.0171)	60.0	1.54
10 - 12	1.08 - J3.42	(0.0 + J0.0013)	60.0	0.60
10 - 14	0.56 - J1.56	(0.0 + J0.0002)	60.0	0.25
10 - 15	0.73 - J1.35	(0.0 + J0.0022)	60.0	0.20
10 - 16	7.12 - J34.63	(0.0 + J01.0226)	220.0	2.60
10.-20	0.90 - J2.83	(0.0 + J0.0003)	60.0	0.55
12 - 13	0.73 - J4.82	(0.0 + 0.0016)	60.0	1.00
12 - 18	1.24 - J4.17	(0.0 + J0.0010)	60.0	0.60
13 - 16	0.72 - J4.77	(0.0 + J0.0016)	60.0	1.00
14 - 24	2.94 - J14.44	(0.0 + J0.0553)	220.0	2.38

15 - 24	(0.75 - J1.17)	(0.0 - J0.017)	60.0	0.20
16 - 17	(0.10 - J8.28) x 3	(0.0 - J0.001)	60.0	1.20
16 - 18	(1.30 - J8.60)	(0.0 - J0.0009)	60.0	1.00
16 - 19	(3.44 - J16.58)	(0.0 - J0.0471)	220.0	1.90
16 - 23	(1.75 - J8.45)	(0.0 - J0.0307)	220.0	2.60
19 - 20	(0.35 - J0.97)	(0.0 - J0.0036)	60.0	0.55
19 - 21	(0.40 - J0.69)	(0.0 - J0.0045)	60.	0.40
21 - 22	(0.34 - J7.85)	(0.0 - J0.0001)	60.0	0.80
21 - 23	(2.50 - J12.44)	(0.0 - J0.0628)	220.0	2.60
21 - 24	(1.92 - J17.97)	(0.0 - J0.0838)	220.0	1.59
24 - 25	(0.33 - J0.92)	(0.0 0.0040)		0.16
24 - 26	(0.28 - J0.17)	(0.0 0.001)		0.60

- C O N C L U S I O N -

Le "LOAD FLOW", sert à l'analyse et l'exploitation des réseaux électriques.

Cette technique est d'une importance capitale pour la planification des réseaux de transport.

De nos jours le "LOAD FLOW" est d'une application courante grâce à son efficacité et sa précision de calcul.

Malgré qu'il nous ait été difficile d'arriver jusqu'au bout du projet, vu les difficultés rencontrées dans la programmation, ceci ne nous empêche pas de prédire les problèmes auxquels nous devrions nous attendre et les solutions à adopter.

Nous souhaitons que cette étude servira de base pour orienter ceux qui aimeraient concevoir l'analyse des réseaux de transport électriques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1/ - M. BOUMAH RAT, A. GOURDIN - **Méthodes Numériques Appliquées** - 1983.
- 2/ - A.H. EL ABIAD, G.W. STAGE -**Computer Methods in Power Systems Analysis** - 1970.
- 3/ - R. PELISSIER - **Les réseaux d'Energie Electrique - Tome 1** - 1971.
- 4/ - H. PERGOZ, J.C. LEMOINE, P. SAPET, G. SANTUCCI - **La Planification des Réseaux Electriques** - 1984.
- 5/ - WILLIAM D. STEVENSEN Jr. - **Eléments of Power System Analysis** - Mc. GRAW - HILL.
- 6/ - C.L. WADHWA - **Electrical Power Systems** - .
- 7/ - B.M. WEEDY - **Electric Power Systems** - .

