

UNIVERSITÉ D'ALGER
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT ÉLECTRICITÉ

13/74

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
المكتبة
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

2ea

PROJET DE FIN D'ETUDES

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
المكتبة
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

SIMULATION ET ETUDE D'UN REDRESSEUR PUISSANT TRIPHASE EN REGIMES NON SYMETRIQUES

PROPOSÉ PAR :
STRIAPAN V.

ETUDIÉ PAR :
S. OUERDANE et S.M. KHELIL

[-]

NOS

PARENTS

-o-

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

Nos remerciements s'adressent tout particulièrement à Mr. STRIAPAN V. Docteur-Ingénieur, Professeur à l'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, qui nous a guidés et suivis dans le présent travail.

Nous remercions également tous les enseignants qui ont contribué à notre formation à l'E.N.P.A.

Nous n'oublierons pas tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de cette étude par leur soutien moral.

S O M M A I R E

	Pages
<u>I-INTRODUCTION</u>	5
1.1.Le courant continu	5
1.2.Avantages du C.Continu /à l'alternatif	6
1.3.Inconvénients du transport en C.continu	6
1.4.Actualité du courant continu	7
1.4.1.Exemples de réalisations des lignes à courant continu	8
<u>II-GENERALITES SUR LE PONT TRIPHASE</u>	9
2.1.Redressement	9
2.2.Etude et fonctionnement du pont redresseur	9
2.3.Schéma et phénomène de commutation	10
2.4.Représentation des tensions par un système de vecteurs tournants	11
2.5.Etapes de commutation	12
2.5.1.Tableau généralisé	12
2.5.2.Diagramme des commutations	12
2.6.Fonctionnement du pont en commutation	13
2.6.1.Commutation et fonctionnement	13
2.6.2.Characteristique externe du pont	13
2.6.3.Phénomène de l'angle de retard	14
2.6.4.Evolution des états conductants	16
2.6.5.Characteristiques des courants de valves (Thyristors)	17
<u>III-INFLUENCE DE LA NON SYMETRIE SUR LE PONT</u>	18
<u>IV-ETUDE ET GENERALISATION DU REGIME NON SYMETRIQUE .</u>	21
4.1.Exemple et schéma general de système d'alimentation	21
4.1.1.Definition des paramètres de commu- tation	21
4.1.2.Dissymétrie au niveau des tensions	21
4.1.3.Dissymétrie au niveau des réactances	23
<u>V-DETERMINATION DES PARAMETRES DE COMMUTATION EN REGIME NON SYMETRIQUE.</u>	26
5.1.Determination des tensions de commutation	27

5.2.Determination des reactances de commutation Xmn	29
5.3.Determination des coefficients Kmn,Nm,	31
5.4.Changement de variables	33
5.5.Mode de couplage du transformateur	33
5.6.Exploitation des coefficients Kmn,Nmn, mn, en fonction du couplage du transfo;	34
Coefficients relatifs au court-circuit Biphase	35
Coefficients relatifs au C.C. Diphasé +terre	36
Coefficients relatifs au C.C. Monophasé	37
Organigramme des diagrammes des Coefficients	39
Diagrammes des coefficients (Planches)	40
à	48
<u>VI-SIMULATION DU PONT REDRESSEUR.</u>	49
6.1.Méthodes de simulation	49
6.2.Processus central	49
6.3.Choix d'une topologie générale	53
6.4.Mise en équation	53
6.5.Notation	54
6.6.Ecriture des équations	55
<u>VII-ORGANIGRAMME GENERAL DE CALCUL.</u>	63
7.1.Procédé du choix des tensions et impédances	63
7.2.Choix de l'état du convertisseur	64
7.3.Contrôle et fixation de l'angle retard	64
7.4.Résolution du système d'équations	64
7.5.Changement de régime	65
7.6.Rétablissement du régime normal	65
7.7.Détection de la fin du process	65
<u>VIII-EXEMPLE D'APPLICATION SCHEMA D'INSTALLATION ET GENERALISATION DES CALCULS.</u>	74
8.1.Schema de l'installation	74
8.2.Réactances des éléments du réseau et schema résultant	74
8.3.Détermination des réactances	76
8.4.Détermination des reactances homopolaires	77
8.5.Application numerique	79
<u>IX- ANALYSE DES RESULTATS</u>	81
Synthèse generale des resultats	90
<u>X- ANNEXES (programme de calcul)</u>	93

I. INTRODUCTION

1.1 Le courant continu

La production d'énergie électrique, son transport et sa distribution se font actuellement en grande partie en courant alternatif.

Dans de tels systèmes énergétiques le courant continu intervient au départ pour l'alimentation des excitations des alternateurs et à l'arrivée dans un nombre d'applications telles qu'en électrochimie (alimentation des cuves d'électrolyse), traction (commande des moteurs sous stations compoundées ou à récupération.), métallurgie (commande de moteurs à vitesse variable etc...) .

Au cours de cette dernière décennie d'importantes installations tant de transport que de distribution en courant continu sont entrées en service de manière satisfaisante et ce grâce aux progrès sensibles qui ont été réalisés dans la recherche, le perfectionnement et l'exploitation des semi-conducteurs. L'introduction rationnelle de ces éléments dans le domaine du redressement a permis au courant continu d'avoir à nouveau droit de cité, allant jusqu'à être compétitif avec le courant alternatif ; notamment dans le transport d'énergie sur de grandes distances et dans la distribution de fortes puissances dans les agglomérations urbaines où l'emploi des lignes aériennes est exclu, vu les dangers et les encombrements qui en résulteraient. A titre d'exemple nous citerons l'U.R.S.S où 25% de l'énergie est consommée en courant continu et le cas de l'ANGLETERRE où une puissance de 640 MW est transportée en plein centre de Londres par des câbles de 200 Kv continu sur une distance de 30 Kms environ .

Pour superviser l'exploitation de ces réseaux de transport et de distribution d'énergie en courant continu, il s'avère nécessaire d'adapter de nouvelles théories tenant compte de tous les régimes de fonctionnement . Toute avarie se produisant au sein d'un élément appartenant à l'ensemble du réseau "alternatif-continu" aura des

des répercussions sur l'état de fonctionnement du système en général. Aussi cette étude aura pour but d'une part d'identifier toutes les anomalies pouvant occasionner des dissymétries, et d'autre part d'en évaluer leurs effets.

1.2 Avantages du courant continu par rapport au courant alternatif.

Quoique tous les réseaux nationaux transportent de l'énergie électrique sous forme de courants alternatifs triphasés, on reconnaît de nombreux inconvénients à ce mode de transport et de distribution on outre :

- L'effet capacitif considérable dans les câbles souterrains
- L'isolation qui doit correspondre non à la tension efficace U , mais à l'amplitude de $U_m = \sqrt{2} U$ de 41% supérieure, ce qui implique des frais d'installation plus élevés.
- Nécessité d'améliorer le facteur de puissance, afin d'utiliser toute la capacité de transport des lignes et diminuer le prix de revient, ce qui nécessite des installations coûteuses (stations de compensateurs synchrones et des batteries de condensateurs).
- Mauvaise utilisation des sections des conducteurs du fait de l'effet pelliculaire.
- Les problèmes de synchronisation et de réglage pour interconnecter les différents réseaux sont compliqués.
- Apparition du phénomène parasite dans les réseaux téléphoniques implantés près des installations en courants alternatifs .

1.3 Inconvénients du transport en courant continu HT .

Le transport en courant continu évite tous les inconvénients cités précédemment, mais présente à son tour certaines difficultés dans son exploitation.

- Le courant continu ne se prête pas au changement de tension par simple couplage magnétique entre enroulements car le changement de tension exige pratiquement qu'on convertisse d'abord le courant continu en alternatif qu'on change la tension du dernier et qu'on repasse ensuite au continu .

-Le courant continu se coupe difficilement du moins au delà de quelques kilovolts.

Le courant continu ne se prête donc pas à assurer l'ensemble des fonctions de production et de distribution (sauf électrolyse, électrochimie, traction) au moyen d'un réseau à tension constante.

Donc le redressement triphasé haute tension n'aura pour fonction que le transport de l'énergie par courant continu .

1.4 Actualité du courant continu pour certains transports ou interconnexions .

Malgré tous les inconvénients énumérés ci-dessus pour le courant continu qu'alternatif, il n'en demeure pas moins, que certains avantages tout à fait relatifs doivent être signalés pour le transport par courant alternatif:

- commodité de coupure par des interrupteurs ou des fusibles
- l'extinction de l'arc et la facilité du changement de tension au moyen de transformateurs.
- production d'énergie moins coûteuse.

Malgré le coût élevé des stations de connexion de courant alternatif en continu, leur utilisation demeure justifiée par une contre partie suffisante. Cette contre partie est d'ordre économique: le coût kilométrique des lignes est moins élevé surtout pour les câbles à courant continu .

Elle peut être d'ordre technique: le courant continu évite ou rend moins ardu certains problèmes de stabilité, permet des liaisons entre réseaux asynchrones, réduit les puissances de court-circuit, se prête mieux à l'emploi de câbles.

Néanmoins le transport en courant continu n'est avantageux qu'au dessus d'une certaine distance. Pour des puissances transportées de 1000 à 2000 MW le transport en courant continu revient moins cher à partir d'environ 100 Kms pour un transport terrestre et de 30 à 80 Kms pour un transport sous marin par câbles immergés .

1.4.1 Exemples de réalisation des lignes de transport d'énergie en courant continu .(Bibliographie n°1)

-Liaison à courant continu entre la SUEDE continentale et l'île de GOTLAND :20Mw,100Kv,200A.

-Interconnexion en courant continu entre la FRANCE et l'ANGLETERRE par câble sous marin :160Mw 200Kv,800A,380mm².

-Liaison entre VOLGOGRAD et le bassin industriel DON par ligne aeriennne de 450 Kms,1400 Mw,800 KV.

-Liaison FRANCE ANGLETERRE réversible station ECHINGEN près de Boulogne et de LYDD au sud est de Londres Câbles+ 100 KV , 65 Km ; 200kv, 800 A,160MW

-Liaison sous marine SARDAIGNE-ITALIE entre Sassari et la Spezia en passant par la Corse 530Km 200Kv , 1000 A , 200 Mw .

-Liaison près de la centrale thermique de SAKUMA entre les réseaux (Japon) à 60Hz et 50 Hz 250 Kv , 1200 A, 300 MW ,(2 ponts de 125 KV par station).

-Liaison entre la centrale hydraulique de BENMORE (Nouvelle Zelande) dans l'île Sud et le poste HAYWARDS au nord (voisinage de la capitale) 500 KV, 1200 A , 600 MW , 540 Km .

-Liaison reversible CONTISKAN (continent SCANDI-NAVIE) entre GÖTEBORG (SUEDE) et JUTLAND 500kv, 1000 A , 500 MW .

Projets -Liaison entre les centrales électriques de la COLUMBIA RIVER et les centres de consommation de Californie 1000 à 3000 MW .

-Liaison entre le LABRADOR et la région NEW-YORKAISE 2000 MW.

-Liaison entre les grandes usines hydrauliques de la Sibirie Centrale et la Russie d'Europe .

II- GENERALITES SUR LE REDRESSEUR TRIPHASE

2.1 Redressement

Ayant vu toutes les performances du courant continu, il serait nécessaire d'explicitier son mode d'obtention, puisqu'à l'origine de tout système on ne dispose que de source à courant alternatif.

La nécessité de son redressement s'imposait pour des besoins industriels, pour cela on utilisait des tubes à gaz, à vapeur de mercure, des diodes et depuis leur apparition des thyristors. Ces derniers offrant des caractéristiques statiques et dynamiques meilleures et des avantages économiques indiscutables, ont contribué au développement du progrès technique dans le domaine de la conversion du courant.

Ayant gravi des échelons de puissance et de complexité fort appréciables, ces éléments redresseurs ont vu leurs caractéristiques : Tension inverse supportée et courant direct augmentés nettement.

2.2 Etude et fonctionnement du pont redresseur.

La configuration du pont de base, de notre étude, est connue sous le nom du pont de "GRAËTZ". Il est alimenté par un réseau à courant alternatif triphasé dont les enroulements, du transformateur d'alimentation, primaires comme secondaires sont couplés en étoile ou en triangle. Les six thyristors, composant le pont, peuvent être divisés en deux groupes :

1° Groupe ~~impair~~ impair (Th1, Th3, Th5) dans lequel les cathodes sont électriquement liées entre elles et leur sortie commune joue le rôle de pôle positif pour le circuit extérieur, les anodes étant reliées aux sorties des enroulements secondaires.

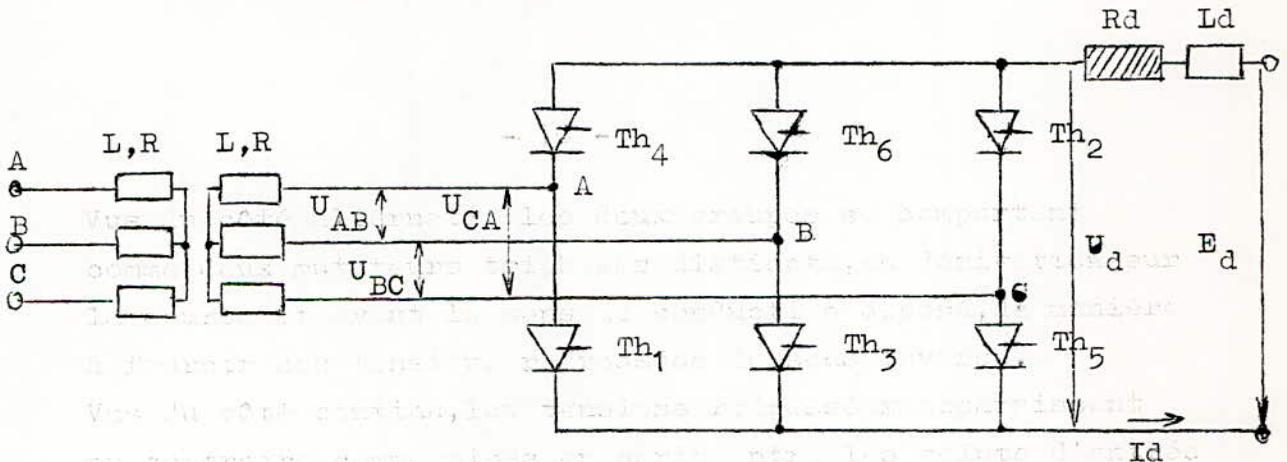
2° Groupe pair (Th2, Th4, Th6) dans lequel ce sont les anodes qui sont couplées électriquement entre elles. Le point de connexion forme le pôle négatif pour le circuit extérieur.

Vus du côté alternatif les deux groupes se comportent comme deux mutateurs triphasés distincts, en dérivation sur la source et ayant le sens de conduction opposé, de manière à fournir des tensions redressées de sens inverse.

Vus du côté continu, les tensions redressées apparaissent au contraire comme mises en série entre les points d'entrée et de retour du courant. Un des deux groupes fonctionnant sous les alternances positives, l'autre sous les alternances négatives.

Il est bien connu que la tension fournie par un redresseur entièrement commandé (pont à thyristors) peut varier entre deux limites, l'une positive, l'autre négative sensiblement égales en valeur absolue, le courant délivré demeurant évidemment de même sens.

2.3. Schéma et phénomène de commutation.



Dans le groupe, à tout instant deux phases et au moins deux thyristors ou valves en série débitent un courant redressé I_d et une tension redressée U_d .

Les tensions entre phase, côté alternatif, sont respectivement U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} réparties sur une période (2π) en un système de tensions symétriques d'expression:

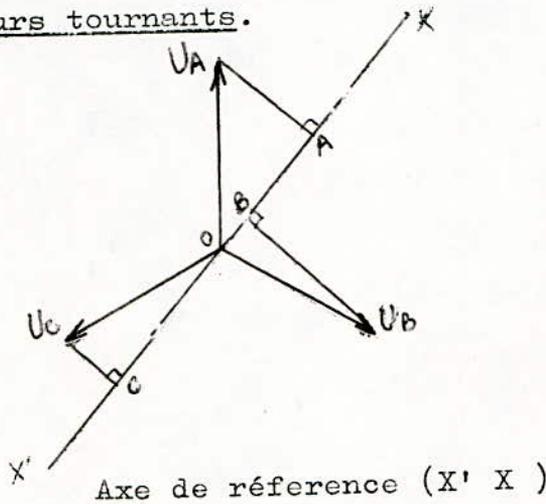
$$U_{AB} = U_S \cos \omega t \quad U_{BC} = U_S \cos(\omega t - 2\pi/3) \quad U_{CA} = U_S \cos(\omega t - 4\pi/3)$$

leur somme forme un vecteur nul tel que $\vec{U}_{AB} + \vec{U}_{BC} + \vec{U}_{CA} = \vec{0}$,

lorsque $U_{AB} > U_{BC} > U_{CA}$ (entre 0 et $\pi/3$) dont U_{AB} est positive U_{CA} négative et c'est entre les points A et C du montage qu'existe la plus grande tension. Puis entre $\pi/3$ et $2\pi/3$

ce sont les points B et C qui représentent la plus grande différence de potentiel, le courant parcourt la phase B, le thyristor Th3, la charge, le thyristor Th2 et la phase C il ya eu à $\pi/3$ commutation de Th1 à Th3 ; les valves Th1, Th3, Th5 constituent un groupe commutant triphasé; Th2, Th4, Th6 constituant un second groupe commutant dont les tensions d'alimentation sont en retard d'un angle $\pi/3$ sur celles du premier.

2.4. Représentation des tensions par un système de vecteurs tournants.



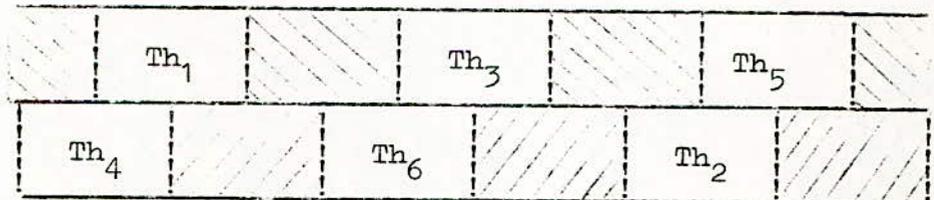
Les trois vecteurs U_A , U_B , U_C , tournent dans le sens trigonométrique. OA, OB, OC représentent les projections des 3 tensions simples. Le thyristor ayant la projection de la tension appliquée anode sur X'X la plus grande sera passant dans le sens "ALLER", celui dont la tension appliquée à sa cathode est plus négative sera passant dans le sens "RETOUR" Chaque changement de thyristor se fera avec une commutation .

2.5. Etapes de commutation.

2.5.1. Tableau généralisé.

Thyristor conductant	Thyristors commutants
Th ₁	Th ₆ et Th ₂
Th ₂	Th ₁ et Th ₃
Th ₃	Th ₂ et Th ₄
Th ₄	Th ₃ et Th ₅
Th ₅	Th ₄ et Th ₆
Th ₆	Th ₅ et Th ₁
Th _n	Th _{n-1} et Th _{n+1}

2.5.2. Diagramme des Commutations.



Les parties hachurées représentent les commutations .

2.6. Fonctionnement du pont en commutation et caractéristiques externes .

2.6.1. Commutation et fonctionnement .

Le régime de débit en commutation binaire des redresseurs couvre dans la plupart des cas le domaine des charges normales et des surcharges modérées. Il serait très intéressant d'étudier celui des charges élevées en particulier dans le cas des régimes non symétriques dus par exemple aux court-circuits dans le réseau d'alimentation .

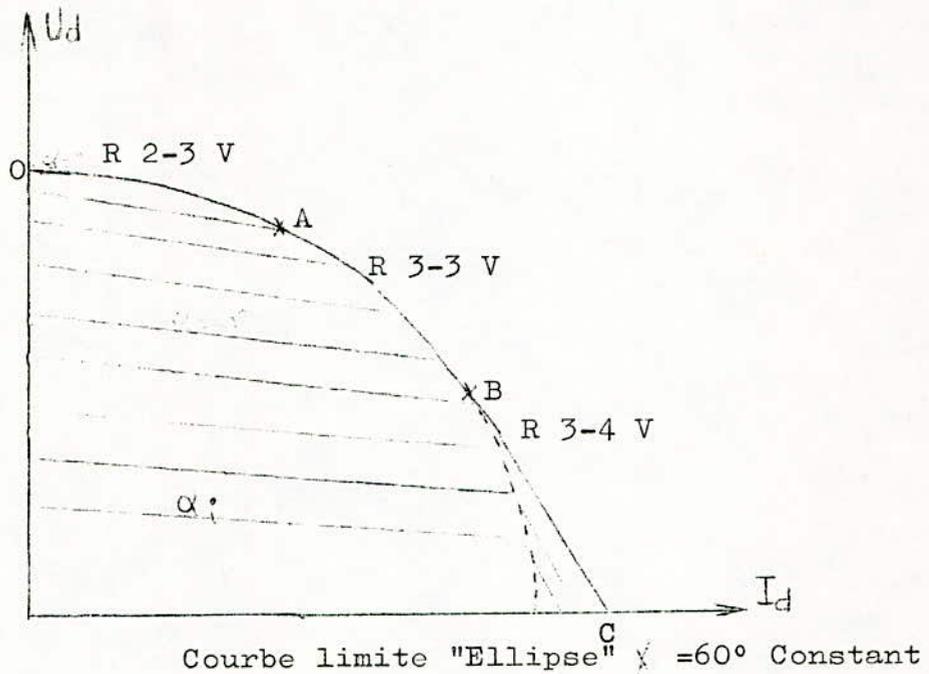
Dans le cas de la conduction ternaire et quaternaire le débit se fait alternativement et respectivement à travers 2 et 3 valves puis sur 3 et 4 Valves .

La caractéristique externe $U_d=f(I_d)$ met en relief les étapes des régimes de conduction .

L'introduction des inductances L dans les circuits des enroulements secondaires du transformateur fait que la commutation n'est plus instantanée, mais prend un temps bien déterminé appelé temps de commutation spécifié par son angle γ . Cette commutation a lieu entre les thyristors appartenant au même groupe .

Ainsi par exemple durant l'intervalle de temps limité par les instants t_1 et t_2 le courant passe par Th_1 à Th_3 appartenant tous les deux au groupe cathodique. Durant l'intervalle suivant la commutation qui a lieu au bout de 60° électriques (Régime 2 V), le courant passe de Th_2 à Th_4 et ainsi de suite . Quand le courant de commutation augmente et tend à devenir I_d , il indique que le convertisseur change d'état ce qui se traduit par $I_d=i$ et $d I_d/dt = d i/dt$.

2.6.2. Caractéristique externe du pont $U_d=f(I_d)$



La caractéristique en conduction quaternaire ,debit sur 3 et 4 valves est un segment de droite ,borné par une courbe limite qui est une ellipse .
Le point C correspondant au point de surcharge très élevé appelé point de court-circuit aux bornes du convertisseur ($U_d=0$) .

2.6.3. Phénomène de l'angle de retard .

@@@ Rappel : Conditions d'amorçage d'un thyris.

1. Existence d'une tension positive aux bornes (Anode-Cathode) de cet élément .
2. Envoi d'une impulsion de commande sur la gachette de la valve .

D'après la succession d'amoçage donnée dans le sous paragraphe 2.5.2; l'on constate que Th_2 s'amorcera après Th_6 Th_1 et quand l'a anode de Th_2 aura un potentiel plus positif que celui de l'anode de Th_6 .

Représentation schematique des tensions appliquées.

Le système triphasé alimentant le pont redresseur est identifié par les trois phases A,B,C dont les tensions sont U_A , U_B , U_C et par les tensions entre phases : U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} .

Ces tensions étant représentées par la figure ci-dessous par rapport à un axe arbitrairement choisi comme origine des temps .

$$U_{AB} = U_A - U_B$$

$$U_{BC} = U_B - U_C$$

$$U_{CA} = U_C - U_A$$

$$U_{AC} = E \sin \omega t$$

$$U_{CB} =$$

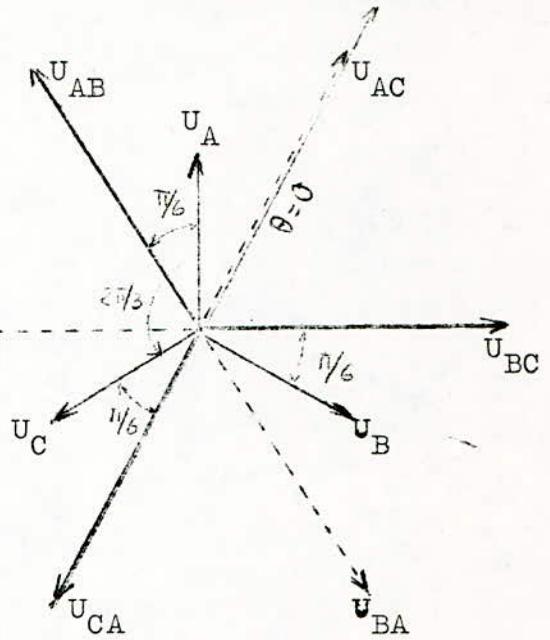
$$U_{AB} = E \sin(\omega t + \pi/3)$$

$$U_{BC} = E \sin(\omega t - \pi/3)$$

$$U_A = \frac{E}{\sqrt{3}} \sin(\omega t + \pi/6)$$

$$U_B = \frac{E}{\sqrt{3}} \sin(\omega t + 5\pi/6)$$

$$U_C = \frac{E}{\sqrt{3}} \sin(\omega t - \pi/2) = \frac{E}{\sqrt{3}} \sin(\omega t - 90)$$



Parmi les 6 thyristors composant le pont, considerant à titre d'exemple le Th_2 l'on sait que l'amorçage de ce dernier ne serait possible qu'à partir du moment où la tension appliquée entre ses bornes est positive . Aussi lors de la conduction de Th_6 et Th_1 la tension aux bornes de Th_2 se trouve être : U_{CB} .

$$(1) \quad \underline{U_{CB} = -U_{BC} = -E \sin(\omega t - 60) = E \sin(\omega t + 120^\circ)}$$

Cette tension passe par zero et devient positive quand $\omega t = -120^\circ$. Si l'on tient compte de l'angle de commande α et si $\alpha < 30^\circ$, le temps d'allumage de Th_2 vaudrait :

$$\underline{\omega t_{a1} = \alpha - 120^\circ}$$

Au temps $\omega t_{a1} = \omega t$ la tension aux bornes de Th_2 à ce moment serait

$$\underline{U_{2(6,1)} = U_{CB} = E \sin(\omega t_{a1} + 120^\circ) = E \sin \alpha}$$

Au moment de l'envoi de l'impulsion de commande pour amorcer Th_2 deux éventualités peuvent se présenter :

⊕⊕ Si la commutation entre Th_5 et Th_1 a déjà eu lieu donc ne restent en fonctionnement que Th_1 et Th_6 . Th_2 s'allumera au moment de l'arrivée de l'impulsion sur sa gachette .

⊕⊕ Si par contre la commutation précédente n'est pas terminée: conduction de Th_5, Th_6, Th_1 nous aurons un retard d'amorçage pour Th_2 et la tension à ses bornes donc serait :

$$(2) \quad U_{Th(5,6,1)} = \frac{U_A + U_C}{2} - U_B = -\frac{3}{2} \frac{E}{3} \sin(\omega t + 90^\circ)$$

A l'arrivée de l'impulsion sur Th_2 c'est à dire

$$\omega t = \omega t_{al} = \alpha - 120^\circ$$

$$U_{Th_2} \text{ devient } U_{Th_2(6,5,1)} = \frac{3}{2} E \sin(\alpha - 30^\circ)$$

Ainsi U_{Th_2} serait fonction de $\sin(\alpha - 30^\circ)$ donc de l'angle " α " dont on considère les cas :

⊕ Si $\alpha < 30^\circ$ il est évident que Th_2 ne peut pas s'allumer au moment de l'impulsion de commande parce que $U_2 < 0$. Pour amorcer Th_2 on ne dispose que de deux possibilités :

⊕⊕ Attendre la fin de la commutation précédente c'est à dire U_{Th_2} devenant positive juste au moment de la fin de la commutation entre Th_5 et Th_1

⊕⊕ Allumage avec $\alpha = 30^\circ = \alpha_{\text{retard limite}}$ (début du R 3-4v)
 $\alpha_{\text{retard limite}} = \text{Angle électrique observé qui est égal à la différence entre le temps d'allumage de } Th_2 \text{ et le temps d'arrivée de l'impulsion. cet angle est dû au cas d'anomalie caractérisé par la conduction de 3 valves } (Th_5, Th_6, Th_1) \text{ pendant une durée quelconque.}$

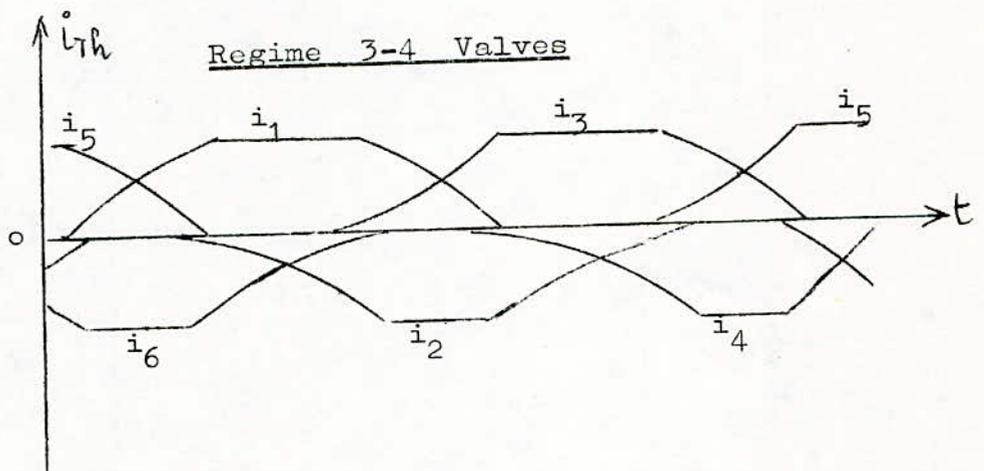
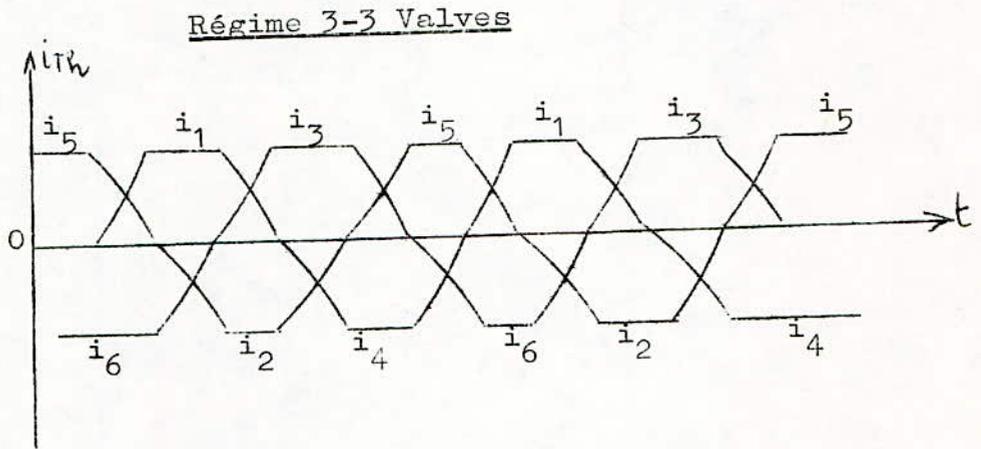
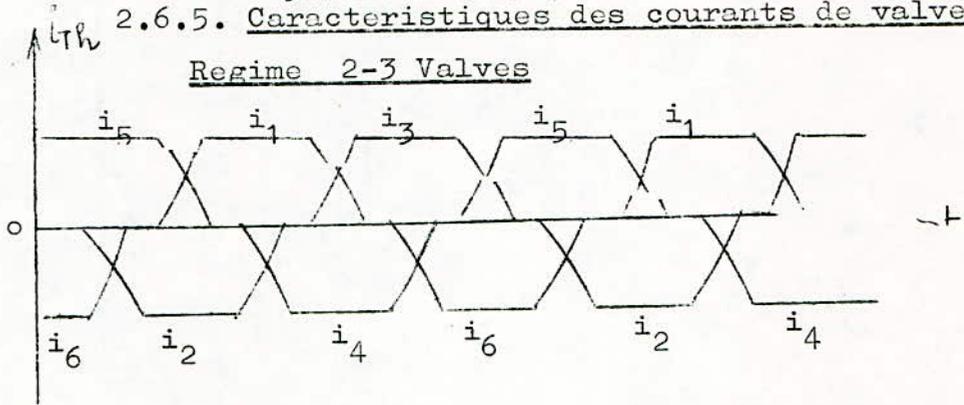
L'allumage des autres valves, généralisé par Th_2 , sera identique au phénomène décrit ci-dessus. Ce dernier est valable uniquement si $\alpha < 30^\circ$ dans le cas contraire $\alpha > 30^\circ$ le thyristor Th_2 s'allumera même pendant la commutation précédente ce qui donne la possibilité de fonctionnement en régime 4 valves.

2.6.4. Evolution des états conductants .

- En régime 2-3 V, dit régime normal la commutation a lieu au moment où un thyristor tend à se bloquer, le suivant commence à se débloquent.
- En régime 3-3 V, dit régime de surcharge la commutation a lieu avec un angle de retard, ce qui se traduit qu'au moment où le courant thyristor diminue, l'autre à un instant détermine et proche commence à conduire.
- En régime 3-4 V la commutation commence quand la commutation précédente n'est pas encore terminée.

- a) Régime 2-3 Th(123-23-234-34-456-56-561-61-612-12-123-)
- b) Régime 3-3 Th(123-234-345-456-561-612-123-)
- c) Régime 3-4 Th(123-1234-23462345-345-3456-456-4561-561-5612-612-6123-)

2.6.5. Caracteristiques des courants de valves.



III- INFLUENCE DE LA NON SYMETRIE SUR LE REGIME DU REDRES.

Le système de production et de transport d'énergie dont est issu le réseau d'alimentation du pont redresseur est comme tout autre système soumis à de nombreux impondérables, au cours de son exploitation .

Les avaries se produisant tout au niveau de la source que du réseau peuvent être de toute nature et avoir lieu en n'importe quel point du trajet séparant la source d'alimentation du transformateur placé en amont du pont. L'état de fonctionnement de ce dernier et de toute l'installation située en aval de celui-ci sera dépendant de la fiabilité du réseau d'alimentation; lequel réseau est défini par la source fournissant les tensions composées appliquées aux deux ensembles de thyristors, les réactances entre phases, les réactances de phases et par le bloc de transformation .

C'est ainsi que toute variation affectant l'un des éléments cités ci-dessus peut-être considérée comme anomalie perturbant le fonctionnement normal du convertisseur.

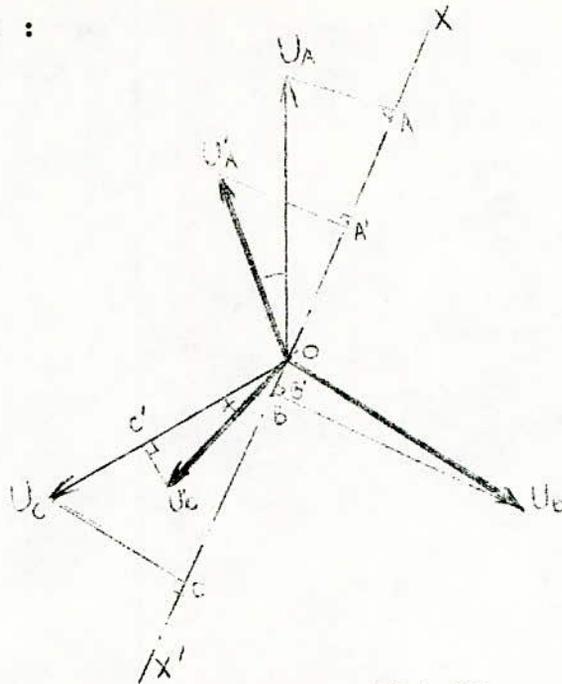
Le pont n'accomplissant pas la fonction requise dans des conditions appropriées, il s'en suit des perturbations au niveau de la tension et du courant redressés.

$$U_d = \frac{6}{\pi} U \sqrt{3} \sqrt{2} \sin \frac{\pi}{6} \cos \gamma$$
$$I_d = U_d / R_c$$

D'après ces deux expressions l'on constate que l'influence de la tension appliquée n'est pas des moindres, cela pour les résultats sachant que l'angle " γ " dépend de la réactance " X ", que la "Rc":résistance de charge demeure constante, on remarque que l'influence de U et X tension et réactance entre phases de réseau sur les valeurs de U_d et I_d n'est pas des moindres.

Il est de même en ce qui concerne le fonctionnement particulier de chaque thyristor. Si l'on se réfère à la représentation des tensions par un système de vecteurs

tournants, lequel système serait déséquilibré de la façon suivante :



- . En régime symétrique $\overline{OA} > \overline{OC}$
- . En régime dissymétrique $\overline{OA'} < \overline{OC}$

Aussi le thyristor passant dans le sens "aller" le serait dans ce dernier cas, dans le sens "retour" et vis-versa .

Pour connaître à tout moment les deux éléments que sont le courant et la tension redressées dont la production est la finalité de tout le système étudié il faudrait donc trouver des équations généralisées qui tiennent compte de tous les aléas de fonctionnement du pont.

L'expression de ces équations doit caractériser à tout moment l'état de symétrie donc le fonctionnement en régime normal et éventuellement tout autre état de dissymétrie. Cette nonsymétrie pouvant être due à de nombreux facteurs externes non prévisibles tels que le court-circuit monophasé, biphasé, biphasé avec terre ou simple coupure de phase .

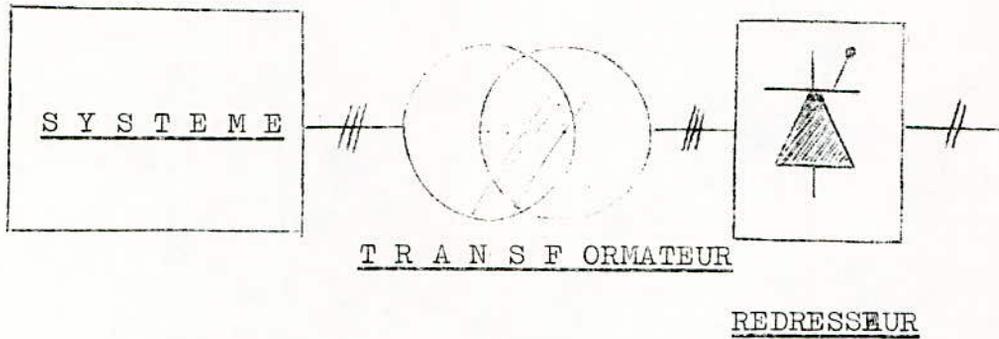
La préoccupation majeure de tout exploitant est de pouvoir évaluer les effets d'un tel déséquilibre , en estimant les variations occasionnées au niveau des

tensions : amplitude et déphasage, et les réactances du circuit tout en tenant compte du modèle de transformateur utilisé (trois monophasés, triphasé) et du mode de couplage des enroulements.

La conséquence immédiate de cette évaluation rendue possible serait de permettre à cet exploitant de prendre ses précautions afin de parer complètement ou à défaut de limiter les méfaits de toute avarie .

IV- ETUDE ET GENERALISATION DU REGIME NON SYMETRIQUE

4.1. Exemple de schéma général de système d'alimentation.



Le problème posé par cette étude est celui de la simulation du réseau général d'alimentation (ci-dessus représenté). Cette simulation doit avoir pour effet de généraliser l'état de fonctionnement quel qu'en soit la complexité du circuit considéré.

Le réseau alimentant le pont peut-être simple comme il peut être imbriqué et derivant sur de nombreuses autres installations.

4.1.1. Définition des paramètres de commutation.

On appelle paramètres de commutation du convertisseur : les trois tensions U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} et les réactances X_{AB} , X_{BC} , X_{CA} .
Les trois premières citées formant le système de tensions composées appliquées entre phases et dont le déphasage régulier en régime symétrique est de $2\pi/3$.
Les trois dernières sont les réactances entre phases dont dépendent les réactances par phase X_A, X_B, X_C .
-réactance du transfo X_T
-réactance de la source X_{cs}

4.1.2. Dissymetrie au niveau des tensions.

Comme défini précédemment ,le système de tensions en régime de fonctionnement normal est schématisé de la façon suivante :

$$U_{AB} = E_s \sin \omega t$$

$$U_{BC} = E_s \sin(\omega t - 2\pi/3)$$

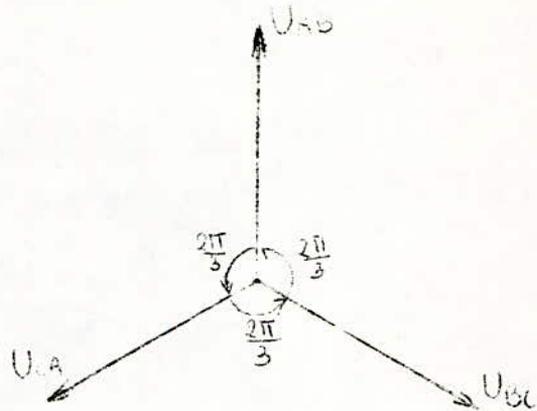
$$U_{CA} = E_s \sin(\omega t + 2\pi/3)$$

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_{BC} = \bar{U}_{CA} = \bar{U}_S$$

$$\vec{U}_{AB} = \vec{U}_S$$

$$\vec{U}_{BC} = a^2 \vec{U}_S$$

$$\vec{U}_{CA} = a \vec{U}_S$$



$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CA} = (1 + a^2 + a) U_S = 0$$

avec a : opérateur de rotation

$$a = e^{i \frac{2\pi}{3}} \quad a^2 = e^{i \frac{4\pi}{3}}$$

En cas d'avarie quelconque dans le circuit d'alimentation le système triphasé équilibré ci-dessus deviendrait un système de trois vecteurs quelconque, pouvant être représenté par la figure ci-dessous.

Le problème posé par cette dissymétrie se situe au niveau de l'évaluation de $U'_{AB}, U'_{BC}, U'_{CA}$ par rapport à U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} ; en tenant compte des déphasages supplémentaires résultants: $\psi_{AB}, \psi_{BC}, \psi_{CA}$.

Aussi l'on pourrait poser :

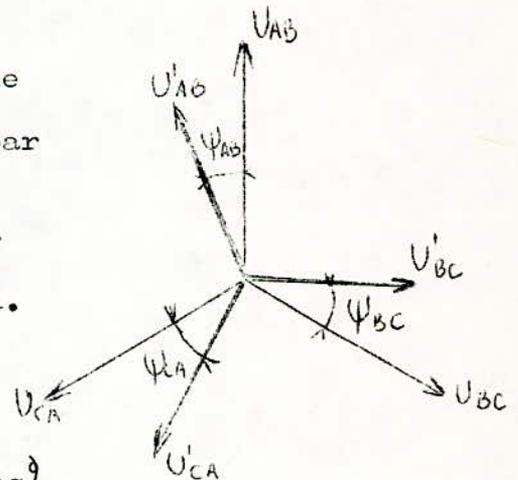
$$U'_{AB} = K_{AB} U_{AB} = K_{AB} E_s \sin(\omega t + \psi_{AB})$$

$$U'_{BC} = K_{BC} U_{BC} = K_{BC} E_s \sin(\omega t - \frac{2}{3} + \psi_{BC})$$

$$U'_{CA} = K_{CA} U_{CA} = K_{CA} E_s \sin(\omega t + \frac{2}{3} + \psi_{CA})$$

Mais comme $U'_{AB}, U'_{BC}, U'_{CA}$ ne sont que les transformées de U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} lorsque K_{AB}, K_{BC}, K_{CA} sont différents de 1 et $\psi_{AB}, \psi_{BC}, \psi_{CA}$ sont différents de zéro et l'on pourrait écrire :

$$U_{AB} = K_{AB} E_s \sin(\omega t + \psi_{AB})$$



$$U_{BC} = K_{BC} E_S \sin\left(\omega t - \frac{2}{3} + \psi_{BC}\right)$$

$$U_{CA} = K_{CA} E_S \sin\left(\omega t + \frac{2}{3} + \psi_{CA}\right)$$

Formules généralisées exprimant les composantes de tension et évaluant les effets de tout déséquilibre par l'intermédiaire des coefficients K_{AB} , K_{BC} , K_{CA} et

ψ_{AB} , ψ_{BC} , ψ_{CA} .

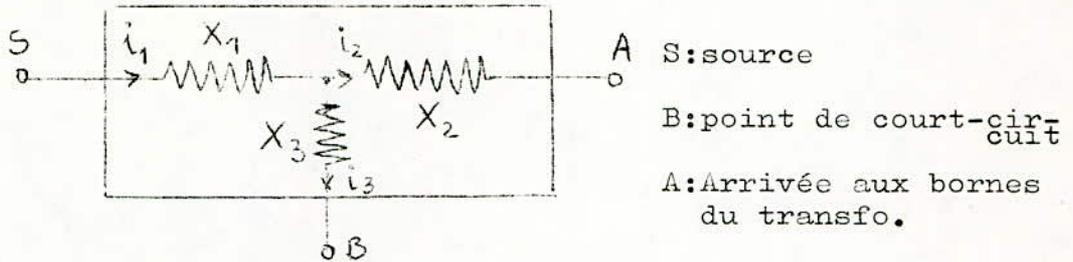
4.1.3. Dissymétrie au niveau des réactances.

La considération systématique des réactances au lieu des impédances en général résulte du fait que les résistances de la centrale, de la ligne ou du transformateur demeurent négligeables.

Par définition la réactance de commutation est déterminée à partir de la tension et de l'intensité par application du théorème de Thevenin : $X_{AB} = \frac{U_{AB}}{j I_{AB}}$ aussi toute variation de l'un des éléments "U" et "I" se ~~représenterait~~ représenterait sur celle de "X" d'où la nécessité de pouvoir estimer les éventuelles fluctuations de cette dernière .

Dans un réseau tout circuit constitué par des impédances (résistances) montées dans un ordre quelconque peut être transfiguré en un circuit monté en Etoile ou Triangle, ce sont les schémas en $\overline{\Pi}$ ou T caractérisés par les admittances ou les impédances .

Partant de cette transfiguration possible, il serait possible de représenter le système allant de la source au transformateur par une figure en " T " .



Aussi l'ensemble du réseau est vu de trois points A, B, S et par définition on identifie les impédances en rapport avec les courants.

L'impédance commune X_{AB} vue de deux points est égale à la somme des impédances traversées par la somme des courants arrivant en ces points considérés.

$$X_{AB} = X_1 \quad (\text{parcourue par } i_1 = i_2 + i_3)$$

L'impédance vue d'un point (A, B, ou S) est égale à la somme des impédances traversées par le courant arrivant en un point considéré.

$$X_A = X_1 + X_2$$

$$X_B = X_1 + X_3$$

X_1, X_2, X_3 sont fonctions de nombreux facteurs tels que ceux qui sont déjà cités raison pour laquelle comme pour les tensions l'introduction de coefficients simulant toute variation est nécessaire.

Coefficients relatifs aux réactances de phase:

$$\begin{aligned} X_A = X_B = X_C = X_S & \text{ en régime symétrique} \\ X_A = N_A X_S &) \\ X_B = N_B X_S &) \text{ en régime dissymétrique} \\ X_C = N_C X_S &) \end{aligned}$$

Lors du fonctionnement du pont donc de la conduction des thyristors: le courant traversant X_A est soit égal à celui parcourant X_A ou X_C

$$\begin{aligned} X_{AB} = X_A + X_B &) \\ X_{BC} = X_B + X_C &) \\ X_{CA} = X_C + X_A &) \end{aligned} \quad \left. \begin{aligned} X_{AB} &= (X_A + X_B) N_{AB} = 2X_S N_{AB} \\ X_{BC} &= (X_B + X_C) N_{BC} = 2X_S N_{BC} \\ X_{CA} &= (X_C + X_A) N_{CA} = 2X_S N_{CA} \end{aligned} \right\}$$

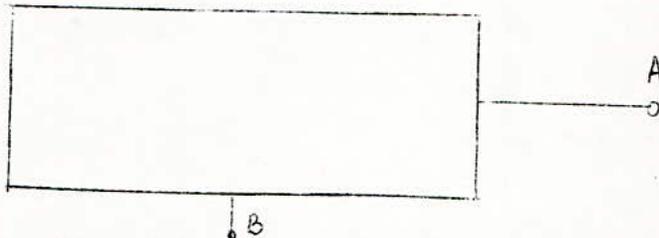
En régime Symétrique En régime non symétrique

Les coefficients N_A , N_B , N_C , relatifs aux réac-
tances de phases étant liés aux coefficients N_{AB} , N_{BC} ,
 N_{CA} , ces derniers ~~sont rattachés~~ ^{se rapportant} aux paramètres de commuta-
tion , ne sont pas déterminés explicitement à partir de la
tension et du courant ; mais à partir des relations les
liant à N_{AB} , N_{BC} , N_{CA} .

La généralisation du régime non symétrique passe par
la détermination de ces coefficients (K_{AB} , K_{BC} , K_{CA} ;
 Ψ_{AB} , Ψ_{BC} , Ψ_{CA} ; N_{AB} , N_{BC} , N_{CA}) dont l'importance
n'a d'équivalent que l'influence qu'ils ont dans le
changement des valeurs des paramètres de commutation .

V- DETERMINATION DES PARAMETRES DE COMMUTATION EN REGIME NON SYMETRIQUE.

Le système d'alimentation comprenant le réseau d'alimentation dont la figuration permet de ne distinguer que les deux points principaux A : arrivée au transfo et B: point de court-circuit est représenté par la figure ci-dessous :



Ce schema peut être décrit par le système d'équations suivantes :

$$\dot{U}'_{Ad} = \dot{U}_{Ad} + jX_{Ad} \dot{I}_{Ad} + jX_{ABd} \dot{I}_{Bd} \quad (1)$$

$$0 = \dot{U}_{Ai} + jX_{Ai} \dot{I}_{Ai} + jX_{ABi} \dot{I}_{Bi} \quad (2)$$

$$0 = \dot{U}_{Ah} + jX_{Ah} \dot{I}_{Ah} + jX_{ABh} \dot{I}_{Bh} \quad (3)$$

$$\dot{U}'_{Bd} = \dot{U}_{Bd} + jX_{Bd} \dot{I}_{Bd} + jX_{ABd} \dot{I}_{Ad} \quad (4)$$

$$0 = \dot{U}_{Bi} + jX_{Bi} \dot{I}_{Bi} + jX_{ABd} \dot{I}_{Ai} \quad (5)$$

$$0 = \dot{U}_{Bh} + jX_{Bh} \dot{I}_{Bh} + jX_{ABh} \dot{I}_{Ah} \quad (6)$$

où \dot{U}'_{Ad} et \dot{U}'_{Bd} sont les composantes de tension directes aux points "A" et "B" du système , en régime normal avant l'avarie.

\dot{U}_{Ad} , \dot{U}_{Bd} ; \dot{U}_{Ai} , \dot{U}_{Bi} ; \dot{U}_{Ah} , \dot{U}_{Bh} : composantes directes inverses et homopolaires de tension en A et B en cas de court-circuit en " B " .

I_{Ad} , I_{Bd} ; I_{Ai} , I_{Bi} ; I_{Ah} , I_{Bh} ; composantes directes inverses et homopolaires de courant en A et B en cas de court-circuit en " B " .

Le convertisseur étant branché après le transformateur c'est à dire à la suite de " A " , pour étudier

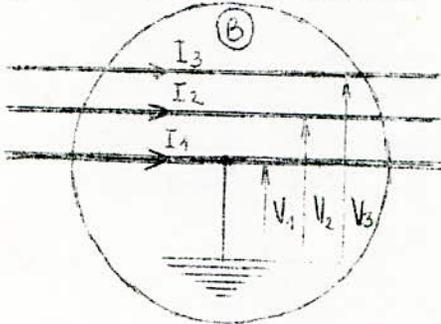
son comportement en cas de court-circuit en " B" la détermination des paramètres de commutation s'avère nécessaire soit :

- ⊕ Les tensions entre phases appliquées au convertisseur fonctionnant à vide .
- ⊕ Les réactances (Impédances) de commutation entre toutes les paires de phases .

5.1. Détermination des tensions de commutation " U_{mn}"

Pour trouver les expressions de U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} tensions entre phases aux bornes du transformateur en régime de fonctionnement anormal, on a recourt à l'équation (1) à laquelle on ajoute les équations supplémentaires qui sont fonction, du genre de court-circuit (monophasé, biphasé, biphasé avec terre) se produisant en B.

Par exemple si on envisage un court-circuit monophasé en B et marche à vide en A on disposera des équations supplémentaires suivants:



En B

$I_2 = I_3 = 0$ si le réseau est simple

$I_2 = I_3 \neq 0$ si le réseau alimente plusieurs consommateurs mais

I_2 et I_3 négligeables devant I_{1cc}

$$\forall 1 = V_d + V_i + V_h = U_{Bd} + U_{Bi} + U_{Bh} = 0$$

$$\begin{cases} I_2 = I_{Bh} + a^2 I_{Bd} + a I_{Bi} \\ I_3 = I_{Bh} + a I_{Bd} + a^2 I_{Bi} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_2 - I_3 = (a^2 - a) I_{Bd} + (a - a^2) I_{Bi} = 0 \\ \text{avec } I_{Bd} = I_{Bi} \end{cases}$$

En remplaçant I_{Bi} par I_{Bd} dans l'équation de I_2 On trouve finalement :

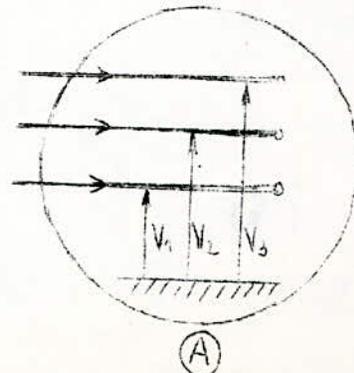
$$I_{Bd} = I_{Bi} = I_{Bh}$$

En A ~~le~~ circuit ouvert donc les courants sont nuls:

$$I_{Ad} = I_{Ai} = I_{Ah} = 0$$

Ainsi déduit'on les équations

$I_{Ad} = I_{Ai} = I_{Ah} = 0$	(7)
$I_{Bd} = I_{Bi} = I_{Bh}$	(8)
$\dot{U}_{Bd} + \dot{U}_{Bi} + \dot{U}_{Bh} = 0$	(9)



La somme des équations (4) (5) et (6) en tenant compte de (8) et (9) qui caractérisent le court-circuit en B permet de déterminer les tensions \dot{U}_{Ad} , \dot{U}_{Ai} , \dot{U}_{Ah}

$$(4)+(5)+(6) = \dot{U}'_{Bd} = \dot{U}'_{Bd} + \dot{U}'_{Bi} + \dot{U}'_{Bh} + j(X_{Bd} I_{Bd} + X_{Bi} I_{Bi} + X_{Bh} I_{Bh}) + j(X_{Ad} I_{Ad} + X_{Ai} I_{Ai} + X_{Ah} I_{Ah}) = \dot{U}'_{Bd} = j(X_{Bd} + X_{Bi} + X_{Bh}) I_{Bd} \implies$$

$$I_{Bh} = I_{Bd} = \frac{\dot{U}'_{Bd}}{j(X_{Bd} + X_{Bi} + X_{Bh})} \quad (10)$$

L'équation (7) et l'équation (10) introduites dans les équations (1), (2) et (3) donnent U_{Ad} , U_{Ai} , U_{Ah}

$$I_{Ad} = 0 : (1) \implies \dot{U}_{Ad} = \dot{U}'_{Ad} - \dot{U}'_{Bd} \frac{X_{ABd}}{X_{Bd} + X_{Bi} + X_{Bh}}$$

$$I_{Ai} = 0 : (2) \implies \dot{U}_{Ai} = - \dot{U}'_{Bd} \frac{X_{ABi}}{X_{Bd} + X_{Bi} + X_{Bh}}$$

$$I_{Ah} = 0 : (3) \implies \dot{U}_{Ah} = - \dot{U}'_{Bd} \frac{X_{ABh}}{X_{Bd} + X_{Bi} + X_{Bh}}$$

A partir de ces vecteurs de tensions obtenu, on compose les tensions composées au point A : U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} .

$U_{AB} = U_A - U_B$ Avec U_A, U_B, U_C système de tensions relatif aux trois phases du réseau
 $U_{BC} = U_B - U_C$ Ce système quelconque peut être décomposé en trois systèmes symétriques direct, inverse, et homopolaire :
 $U_{CA} = U_C - U_A$

$$U_A = U_{Ah} + U_{Ad} + U_{Ai}$$

$$U_B = U_{Ah} + a^2 U_{Ad} + a U_{Ai}$$

$$U_C = U_{Ah} + a U_{Ad} + a^2 U_{Ai}$$

Aussi : $\dot{U}_{AB} = U_A - U_B = (1 - a^2) U_{Ad} + (1 - a) \dot{U}_{Ai}$ remplaçant \dot{U}_{Ad} et \dot{U}_{Ai} par leurs expressions en fonction de \dot{U}'_{Bd} on tire :

$$\dot{U}_{AB} = (1-a^2) \left[\dot{U}'_{Ad} - \dot{U}'_{Bd} \frac{X_{ABd}}{X_{Bd} + X_{Bi} + X_{Bh}} \right] + (1-a) \left[\dot{U}'_{Bd} \frac{X_{ABi}}{X_{Bd} + X_{Bi} + X_{Bh}} \right]$$

$$\Rightarrow \dot{U}_{AB} = (1-a^2) \dot{U}'_{Ad} - \frac{\dot{U}'_{Bd} (1-a^2) X_{ABd} + (1-a) X_{ABi}}{X_{Bd} + X_{Bi} + X_{Bh}} \quad (11)$$

L'équation (11) explicite l'expression de la tension \dot{U}_{AB} pour le cas de dissymétrie considéré: court-circuit monophasé en B et marche à vide en A.

5.2. Détermination des réactances de commutation "X_{mn}"

Une valeur de réactance de commutation entre phase " exemple A et B " peut être calculée selon la formule :

$$X_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{j I_{AB}} \quad (12)$$

tels que: \dot{U}_{AB} tension composée entre A et B en régime envisagé

I_{AB} Courant de court-circuit biphasé au point "A" entre phase A et B

U_{AB} étant déterminé par (11) , pour déterminer

I_{AB} il faut compléter le système des équations (1) à (6) par les équations (8) et (9) relatives au court-circuit monophasé au point " B " et pour celles résultantes du court-circuit biphasé se produisant en A (Exemple: Convertisseur en commutation entre A et B)

En B :

$$\begin{cases} I_{Bd} = I_{Bi} = I_{Bh} & (8) \\ U_{Bd} + U_{Bi} + U_{Bh} = 0 & (9) \end{cases}$$

En A :

$$\begin{cases} I_C = 0 \\ I_A = -I_B \\ U_A = U_B \end{cases}$$

$$(13) \Rightarrow \begin{cases} I_C = I_{Ah} + a I_{Ad} + a^2 I_{Ai} = 0 \\ I_{Ah} = 0 \\ I_{Ad} = -a I_{Ai} \end{cases}$$

$$U_A = U_B = U_{Ah} + U_{Ad} + U_{Ai} = U_{Ah} + a^2 U_{Ad} + U_{Ai} a$$

$$\implies (1-a^2)U_{Ad} = (a-1)U_{Ai} \implies -a^2 U_{Ad} = -U_{Ai} \implies U_{Ad} = a U_{Ai}$$

$$(14) \begin{cases} I_{Ah} = 0 \\ I_{Ad} = -a I_{Ai} \\ I_{Ad} = a U_{Ai} \end{cases}$$

La somme de (4)+(5)+(6) en tenant compte de (8),(9) et (14) donne :

$$U'_{Bd} = \dot{U}_{Bd} + \dot{U}_{Bi} + \dot{U}_{Bh} + j I_{Bd} (X_{Bd} + X_{Bi} + X_{Bh}) + j I_{Ad} (X_{ABd} - a^2 X_{ABi})$$

$$a^2 = 1/a$$

$$\implies (15) \quad I_{Bd} = \frac{\dot{U}'_{Bd} - j I_{Ad} (X_{ABd} - a^2 X_{ABi})}{j (X_{Bd} + X_{Bi} + X_{Bh})}$$

En multipliant (2) par (-a) et en sommant (1) et (2) on obtient :

$$\dot{U}'_{Ad} = j I_{Ad} (X_{Ad} + X_{Ai}) + j I_{Bd} (X_{ABd} - a X_{ABi})$$

$$\text{ou bien } I_{Ad} = \frac{U'_{Ad} - j (X_{ABd} - a X_{ABi}) I_{Bd}}{j (X_{Ad} + X_{Ai})}$$

en remplaçant I_{Bd} par son expression donnée (15) on déduit :

$$I_{Ad} = \frac{U'_{Ad} - \frac{X_{ABd} - a X_{ABi}}{X_{Bd} + X_{Bi} + X_{Bh}} U'_{Bd}}{j \left[X_{Ad} + X_{Ai} - \frac{X_{ABd}^2 + X_{ABd} X_{ABi} + X_{ABi}^2}{X_{Bd} + X_{Bi} + X_{Bh}} \right]}$$

La valeur de I_{AB} courant de court-circuit entre les phases A et B peut être déterminée à partir des composantes directes et inverses de courant au point A

$$I_{AB} = I_A = -I_B = I_{Ad} + I_{Ai} = (1-a^2) I_{Ad}$$

en utilisant (16) cela donne

$$I_{AB} = \frac{(1-a^2) \dot{U}'_{Ad} - \dot{U}'_{Bd} \frac{(1-a^2) X_{ABd} + (1-a) X_{ABi}}{X_{Bd} + X_{Bi} + X_{Bh}}}{j \left[X_{Ad} + X_{Ai} - \frac{X_{ABd}^2 + X_{ABd} X_{ABi} + X_{ABi}^2}{X_{Bd} + X_{Bi} + X_{Bh}} \right]}$$

- Selon l'expression (12), U_{AB}, I_{AB} on trouve pour X_{AB}

$$(17) \quad X_{AB} = X_{Ad} + X_{Ai} - \frac{X_{ABd}^2 + X_{AB} X_{ABi} + X_{ABi}^2}{X_{Bd} + X_{Bi} + X_{Bh}}$$

Les formules (11) et (17) permettent de déterminer les paramètres de commutation U_{AB}, X_{AB} en cas de court-circuit monophasé au point B. En utilisant le même processus de calcul on détermine les autres paramètres $U_{BC}, U_{CA}, X_{BC}, X_{CA}$ relatifs au même genre de court-circuit.

Lorsqu'on suppose qu'au point B, il se produit un court-circuit biphasé ou biphasé avec terre, la théorie générale relative aux composantes symétriques et la même méthode de calcul que celle vue précédemment demeurent valables et requises pour pouvoir trouver les expressions des paramètres de commutation.

5.3. Détermination des coefficients $K_{mn}, \psi_{mn}, N_{mn}$

En général les impédances directes, inverses et homopolaires n'ont pas systématiquement les mêmes valeurs cela tient au fait qu'il s'agit d'impédances cycliques tenant compte de la mutuelle impédance entre phases et dépendant, par suite, des relations entre courants qui parcourent les conducteurs.

Mais pour les éléments ne comportant pas de parties tournantes c'est à dire les réseaux passifs (ce qui est le cas du réseau considéré excepté la centrale) on fait les hypothèses suivantes : $Z_d = Z_i \implies X_d = X_i$

$$\begin{cases} X_{Ad} = X_{Ai} \\ X_{Bd} = X_{Bi} \\ X_{ABd} = X_{ABi} \end{cases}$$

De même pour les tensions si l'on néglige les chutes de tension entre A et B on fait l'hypothèse supplémentaire suivante : $\dot{U}'_{Ad} = \dot{U}'_{Bd}$

Application de ces deux hypothèses aux équations de U_{AB} et X_{AB} :

$$\dot{U}_{AB} = (1-a^2) U'_{Ad} - U'_{Bd} \frac{(1-a^2) X_{ABd} + (1-a) X_{ABi}}{X_{Bd} + X_{Bi} + X_{Bh}}$$

- on pose $X_{Bd} + X_{Bi} + X_{Bh} = 2 X_{Bd} + X_{Bh} = X_{B\epsilon}$

$$\dot{U}_{AB} = (1-a^2) U'_{Ad} \left[1 - \frac{X_{ABd}}{X_{B\epsilon}} - \frac{1}{(1+a)} \frac{X_{ABd}}{X_{B\epsilon}} \right]$$

$$\dot{U}_{AB} = (1-a^2) U'_{Ad} \left[1 - \frac{X_{ABd}}{X_{B\epsilon}} - e^{-j\pi/3} \frac{X_{ABd}}{X_{B\epsilon}} \right]$$

$$\dot{U}_{AB} = (1-a^2) U'_{Ad} \left[1 - \frac{X_{ABd}}{X_{B\epsilon}} - \frac{1}{2} \frac{X_{ABd} + j}{X_{B\epsilon}} - \frac{3}{2} \frac{X_{ABd}}{X_{B\epsilon}} \right]$$

$$\dot{U}_{AB} = (1-a^2) U'_{Ad} K_{AB} e^{j\psi_{AB}}$$

avec

$$K_{AB} = \sqrt{1 - \frac{3 X_{ABd}}{X_{B\epsilon}} + \frac{3 X_{ABd}^2}{X_{B\epsilon}^2}}$$

$$\psi_{AB} = \text{ARC Tg} + \frac{\sqrt{3} X_{AB}}{2 X_{B\epsilon} - 3 X_{ABd}}$$

L'on sait qu'en régime normal $X_{AB} = 1$ $\psi_{AB} = 0$ donc

$$\dot{U}'_{AB} = (1-a^2) \dot{U}'_{Ad} = \dot{U}_{AB} \quad \text{aussi on pourrait écrire que}$$

$$\dot{U}_{AB} = K_{AB} \dot{U}'_{AB} e^{j\psi_{AB}}$$

Application de la première hypothèse à l'expression (17)

$$X_{AB} = X_{Ad} + X_{Ai} - \frac{X_{ABd}^2 + X_{ABd} X_{ABi} + X_{ABC}^2}{X_{Bd} + X_{Bi} + X_{Bh}}$$

avec $X_{ABd} = X_{ABi}$

$$X_{AB} = 2X_{Ad} - \frac{3 X_{ABd}^2}{X_{B\epsilon}} = 2 X_{Ad} \left(1 - \frac{3 X_{ABd}^2}{2 X_{Ad} X_{B\epsilon}} \right)$$

$$X_{AB} = 2 X_S N_{AB}$$

d' où

$$N_{AB} = 1 - \frac{3 X_{ABd}^2}{2 X_{Ad} X_{Bd}}$$

5.4. Changement de variables .

On fait un changement de variables de la façon suivante pour simplifier les formules donnant les divers coefficients :

$$\rho = \frac{X_{ABd}}{X_{Ad}} \quad \psi = \frac{X_{ABd}}{X_{Bd}} \quad \varepsilon = \frac{X_{Bd}}{X_{Ad}}$$

d'où les expressions des coefficients calculés ci-dessus:

$$K_{AB} = \sqrt{1 - \frac{3\rho}{2+\varepsilon} + \frac{3\rho^2}{(2+\varepsilon)^2}}$$

$$\psi_{AB} = \text{Arctg} \frac{\sqrt{3} \rho}{2(2+\varepsilon) - 3\rho}$$

$$N_{AB} = 1 - \frac{3\rho\psi}{2(2+\varepsilon)}$$

♦ ♦ ♦ ♦ A remarquer que pour n'importe quel système donné les valeurs de ρ, ψ, ε , sont bornées

$$0 \leq \rho \leq 1$$

$$0 \leq \psi \leq 1$$

$$0.1 \leq \varepsilon \leq 5$$

Limite de variation admissible .

5.5. Mode de couplage du transformateur .

Dans tous les calculs et les hypothèses faits dans le chapitre se rapportant à la détermination des coefficients K_{mn} , N_{mn} et le déphasage ψ_{mn} , il n'a été en aucun cas fait allusion à la manière dont sont connectés les enroulements du transformateur tout au niveau du primaire que du secondaire. C'est omission voulue parceque l'introduction de cet autre facteur nécessite des considérations fort complexes faisant appel à la différentiation entre composantes directes, inverses de tensions et

de courants.

En ne considérant que les variations apportées au sein des paramètres de commutation par les divers couplages, certains auteurs dont les articles sont cités dans la bibliographie (n°2) sont arrivés à scinder l'ensemble des couplages en deux catégories.

La démonstration qui a permis cette répartition en deux modes Etoile/Etoile (Δ/Δ) et Etoile-Triangle (Δ/Δ) a été rendue possible grâce à l'introduction de " N " facteur de couplage dans l'expression de \dot{U}_{AB} rencontrée plus haut :

$$\dot{U}_{AB} = (1-a^2) \dot{U}_{Ad} \left[1 - \frac{X_{ABd}}{X_{BE}} + e^{-j N\pi/3} \frac{X_{ABd}}{X_{BE}} \right]$$

Lorsqu'on tire de cette formule K_{AB} , N_{AB} et ψ_{AB} en donnant à "N" soit la valeur impaire " 1 " ou paire " 2 " valeurs qui caractérisent le mode de couplage on aboutit à la répartition ~~aux~~ deux catégories déjà citées .

5.6. Exploitation des coefficients K_{mn} , ψ_{mn} , N_{mn} en fonction du mode de couplage du transfo.

L'exploitation pratique de tous les coefficients obtenus qui définissent toutes les variations des paramètres de commutation tant en fonction des genres de court-circuits non symétriques que relativement au mode de couplage du transformateur Δ/Δ ou Δ/Δ est faite en introduisant deux paramètres supplémentaires A et B

Ces paramètres A et B qui ne peuvent avoir pour valeurs que 1 ou 0 figurent dans les expressions des coefficients K_{mn} , ψ_{mn} , N_{mn} pour identifier le mode de couplage du transformateur. Chaque expression ne contenant dans son corps que A ou B et non les deux à la fois. Ainsi la combinaison $A=1$, $B=0$ correspond au couplage Δ/Δ et $A=0$, $B=1$ correspond au couplage Δ/Δ , ce qui permet de réduire l'ensemble des formules de moitié d'où les formules suivantes (pages 35, 36 et 37) .

COEFFICIENTS RELATIFS AU COURT-CIRCUIT DIPHASE

A=0 } Couplage Transfo : λ/Δ
 B=1 }

A=1 } Couplage transfo: λ/λ
 B=0 }

$$K_{AB} = \sqrt{1 - \frac{3}{2}\rho + A\rho + \frac{3}{4}\rho^2 - \frac{1}{2}A\rho^2}$$

$$K_{BC} = \sqrt{(1-\rho)(1-\rho) + \frac{1}{2}B\rho - \frac{1}{4}B\rho^2}$$

$$K_{CA} = \sqrt{1 - \frac{A}{2}\rho + \frac{A}{4}\rho^2}$$

$$N_{AB} = 1 - \frac{3}{4}\rho + \frac{1}{2}A\rho$$

$$N_{BC} = 1 - \rho + \frac{1}{4}B\rho$$

$$N_{CA} = 1 - \frac{1}{4}A\rho$$

$$\psi_{AB} = - \operatorname{Arctg} \frac{\sqrt{3}\rho}{4-3\rho+2A\rho}$$

$$\psi_{BC} = + \operatorname{Arctg} \frac{\sqrt{3}B\rho}{4-3\rho}$$

$$\psi_{CA} = + \operatorname{Arctg} \frac{\sqrt{3}A\rho}{4-\rho}$$

COEFFICIENTS RELATIFS AU COURT-CIRCUIT DIPHASE+TERRE

A=0 } Couplage transfo: Δ/Δ
 B=1

A=1 } Couplage Transfo: Δ/Δ
 B=0

$$K_{AB} = \sqrt{1 - \frac{(2+3\varepsilon - 2A\varepsilon)\rho}{1+2\varepsilon} + \frac{(1+3\varepsilon - 2A\varepsilon + 3\varepsilon^2 - 2A\varepsilon^2)\rho^2}{(1+2\varepsilon)^2}}$$

$$K_{BC} = \sqrt{(1-\rho)(1-\rho) + \frac{B\rho\varepsilon}{1+2\varepsilon} - \frac{B\rho^2(\varepsilon+\varepsilon^2)}{(1+2\varepsilon)^2}}$$

$$K_{CA} = \sqrt{\left(1 - \frac{\rho}{1+2\varepsilon}\right)\left(1 - \frac{\rho}{1+2\varepsilon}\right) - \frac{A\varepsilon\rho}{1+2\varepsilon} + \frac{A\varepsilon^2(\varepsilon+\varepsilon^2)}{(1+2\varepsilon)^2}}$$

$$N_{AB} = 1 - \frac{2+3\varepsilon - 2A\varepsilon}{2(1+2\varepsilon)} \rho$$

$$N_{BC} = 1 - \rho + \frac{B\varepsilon\rho}{2(1+2\varepsilon)}$$

$$N_{CA} = 1 - \frac{\rho}{1+2\varepsilon} - \frac{A\varepsilon\rho}{2(1+2\varepsilon)}$$

$$\varphi_{AB} = - \operatorname{Arctg} \frac{\sqrt{3} \rho}{2\left(\frac{1+2\varepsilon}{\varepsilon}\right) - \frac{(2+3\varepsilon - 2A\varepsilon)\rho}{\varepsilon}}$$

$$\varphi_{BC} = + \operatorname{Arctg} \frac{\sqrt{3} B \rho}{2\left(\frac{1+2\varepsilon}{\varepsilon}\right) - \frac{(2+3\varepsilon)\rho}{\varepsilon}}$$

$$\varphi_{CA} = + \operatorname{Arctg} \frac{\sqrt{3} A \rho}{2\left(\frac{1+2\varepsilon}{\varepsilon}\right) - \frac{(2+\varepsilon)\rho}{\varepsilon}}$$

COEFFICIENTS RELATIFS AU COURT-CIRCUIT MONOPHASE

$\left. \begin{matrix} A=0 \\ B=1 \end{matrix} \right\} \text{Couplage transfo: } \Delta$

$\left. \begin{matrix} A=1 \\ B=0 \end{matrix} \right\} \text{Coup. transfo: } Y$

$$K_{AB} = \sqrt{1 - \frac{\rho}{2+\epsilon} - \frac{2A\rho}{2+\epsilon} + \frac{\rho^2}{(2+\epsilon)^2} + \frac{2A\rho^2}{(2+\epsilon)^2}}$$

$$K_{BC} = \sqrt{1 - \frac{B\rho}{2+\epsilon} + \frac{B\rho^2}{(2+\epsilon)^2}}$$

$$K_{CA} = \sqrt{\left(1 - \frac{2\rho}{2+\epsilon}\right)\left(1 - \frac{2\rho}{2+\epsilon}\right) + \frac{A\rho}{2+\epsilon} - \frac{A\rho^2}{(2+\epsilon)^2}}$$

$$N_{AB} = 1 - \frac{1}{2} \frac{\rho\sqrt{3}}{2+\epsilon} - \frac{A\rho\sqrt{3}}{2+\epsilon}$$

$$N_{BC} = 1 - \frac{1}{2} \frac{B\rho\sqrt{3}}{2+\epsilon}$$

$$N_{CA} = 1 - \frac{2\rho\sqrt{3}}{2+\epsilon} + \frac{1}{2} \frac{A\rho\sqrt{3}}{2+\epsilon}$$

$$\psi_{AB} = + \text{Arctg} \frac{\sqrt{3} \rho}{2(2+\epsilon) - 2A\rho - \rho}$$

$$\psi_{BC} = - \text{Arctg} \frac{\sqrt{3} B\rho}{2(2+\epsilon) - \rho}$$

$$\psi_{CA} = - \text{Arctg} \frac{\sqrt{3} A\rho}{2(2+\epsilon) - 3\rho}$$

Il a été vu que finalement tous les coefficients définis ne dépendent que de ε , ν , ρ dont la marge de variation est faible et des deux combinaisons de A et B, aussi pour rendre plus pratiques les résultats obtenus on fait l'hypothèse assez conforme à la réalité que $\varepsilon = 3$ et on fait varier ρ et ν de 0 à 1 avec respectivement comme pas 0,1 pour ρ et 0,2 pour ν (-c.f organigramme).

Les résultats obtenus sont repris sous forme de diagrammes pouvant être utilisés dans tout système d'exploitation pour une détermination rapide de ces dits coefficients donc une évaluation appropriée des paramètres de commutation. (voir pages 40,41,42,43,44,45,46,47,48)
L'organigramme des diagrammes des coefficients K_{mn}, N_{mn} , et ψ_{mn} est introduit dans l'organigramme général de calcul de la simulation du pont.

• • NOTATION UTILISEE POUR LE LANGAGE FORTRAN IV

RO = ρ

HU = ν

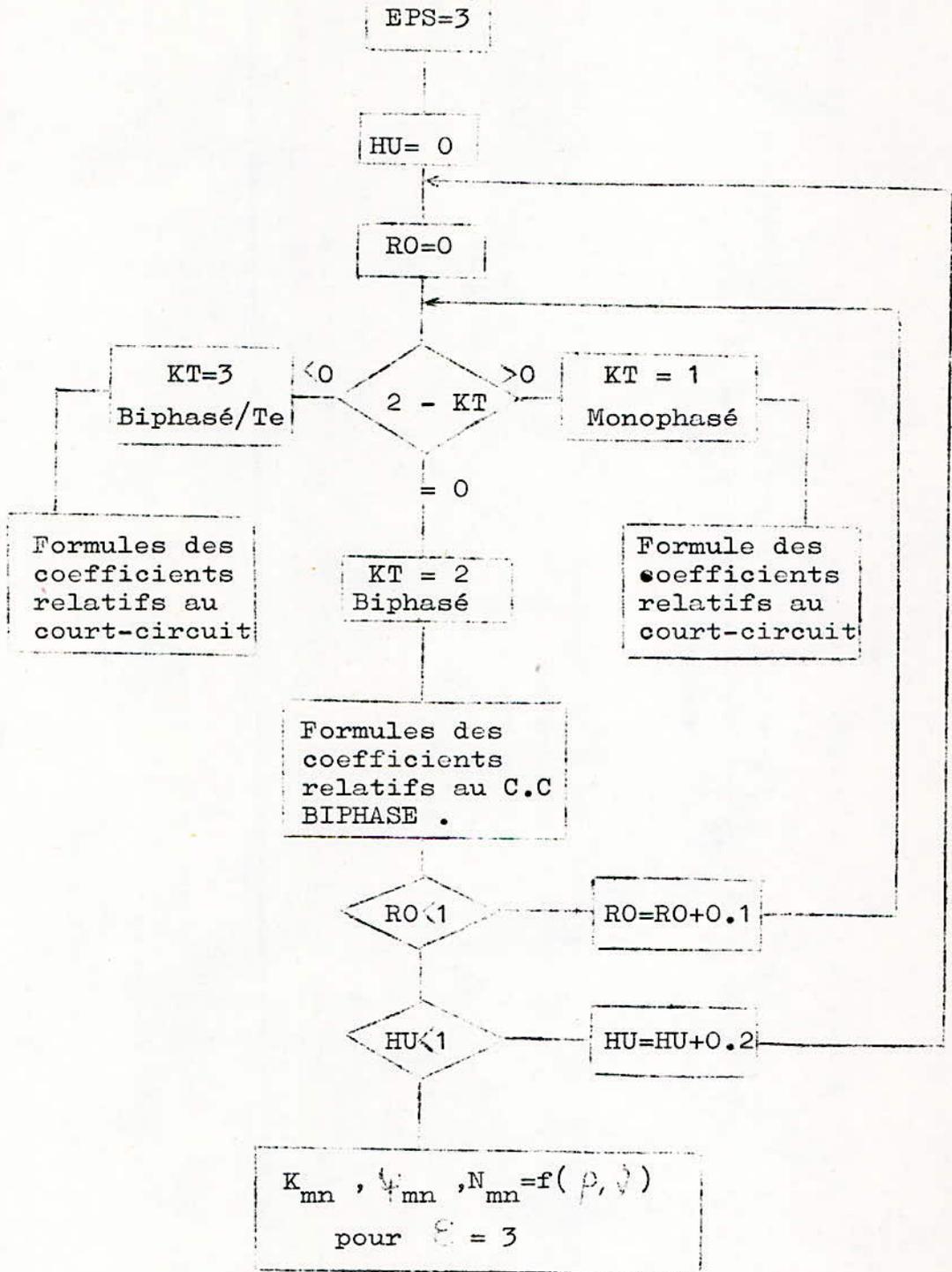
EPS = ε

Cartes de données A=1 } λ/λ KT=1 ~~ou~~ KT=2 ou KT=3
 B=0 }

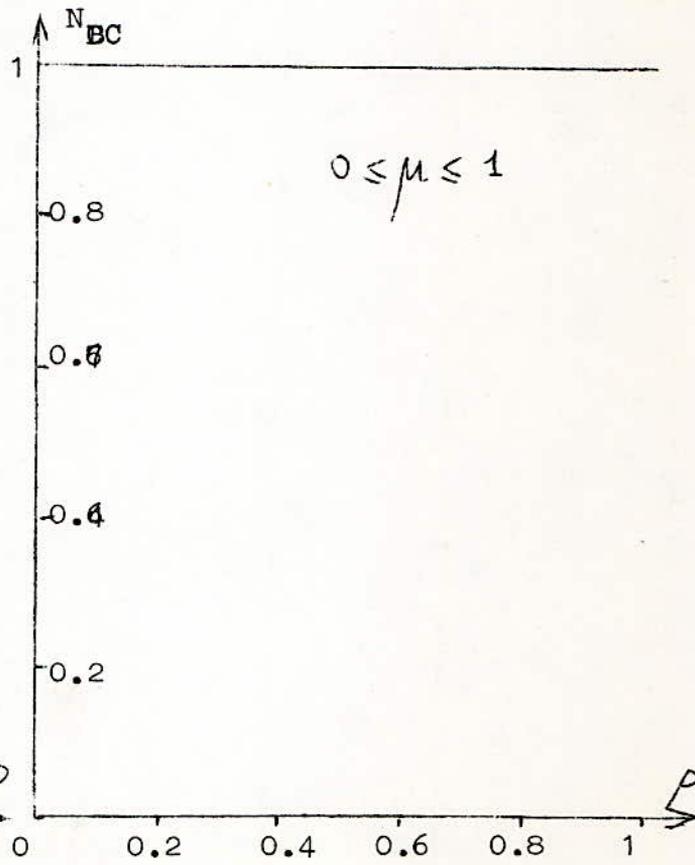
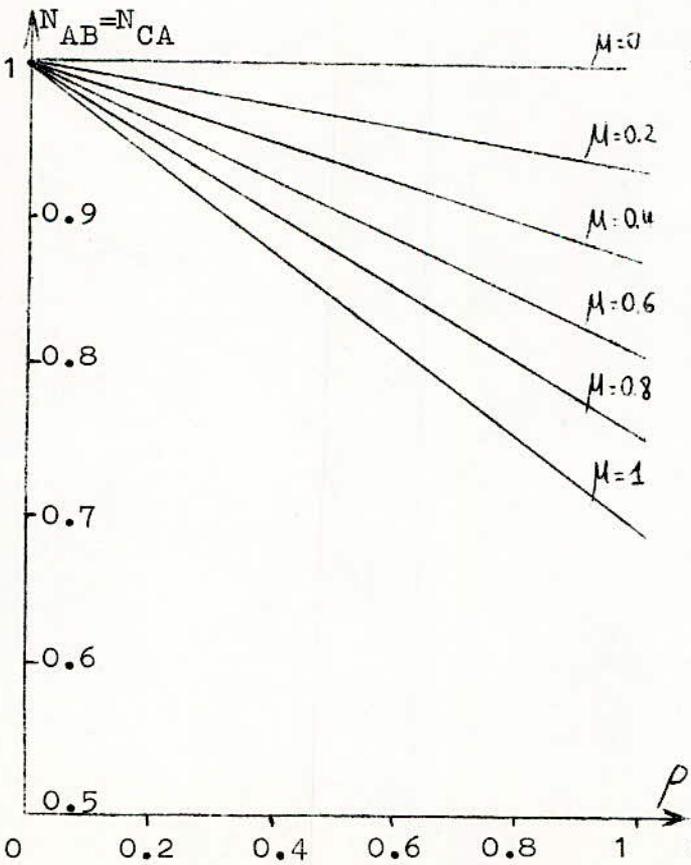
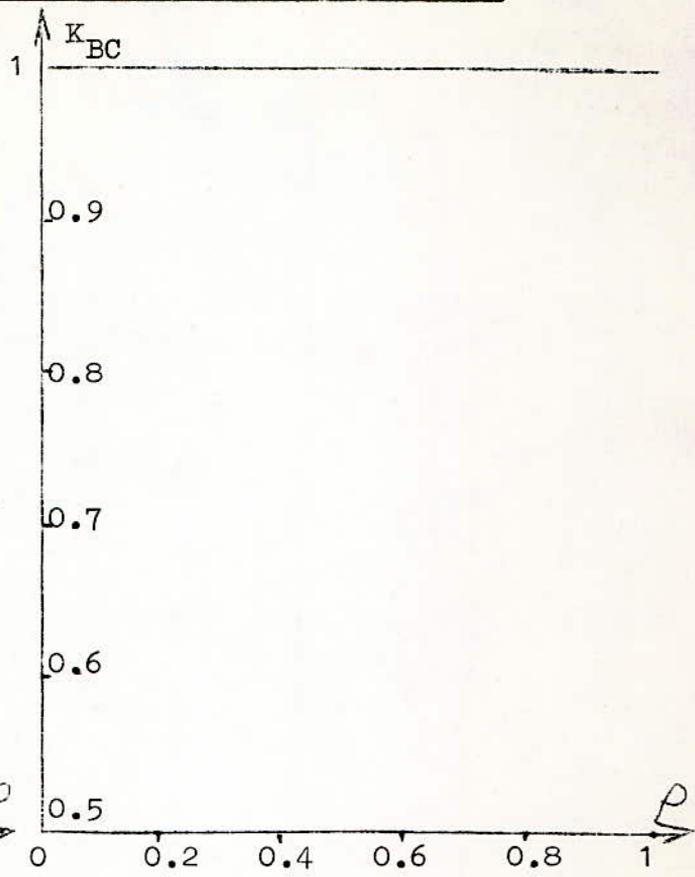
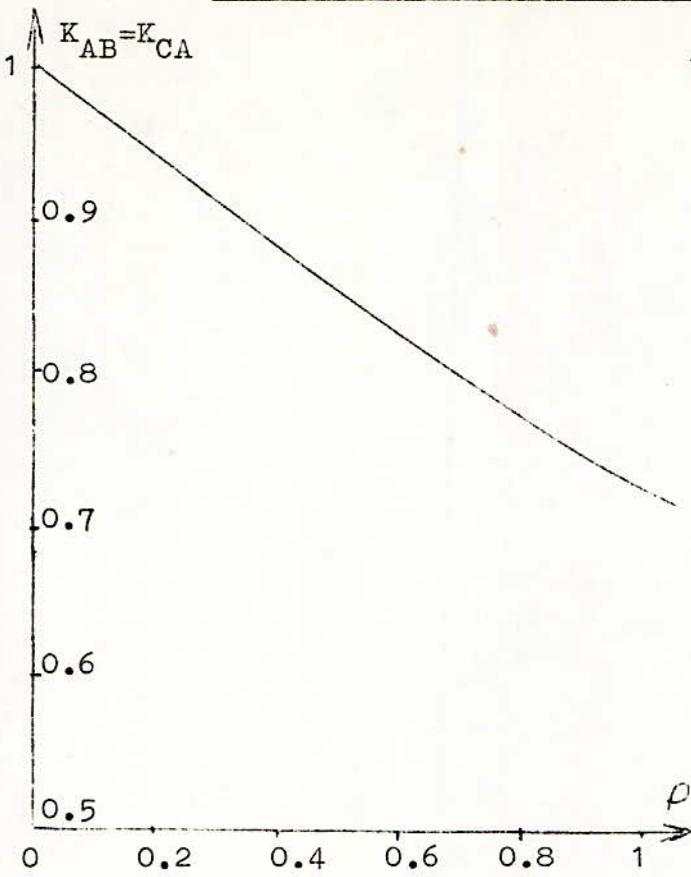
 A=0 } λ/Δ KT=1 ~~ou~~ KT=2 ou KT=3
 B=1 }

ORGANIGRAMME DES DIAGRAMMES DES COEFFICIENTS

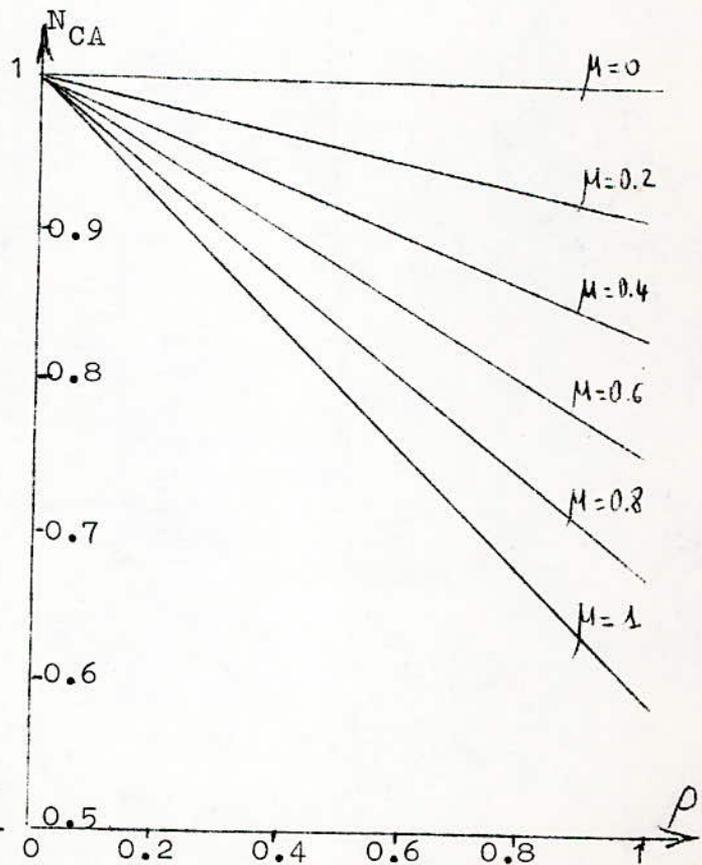
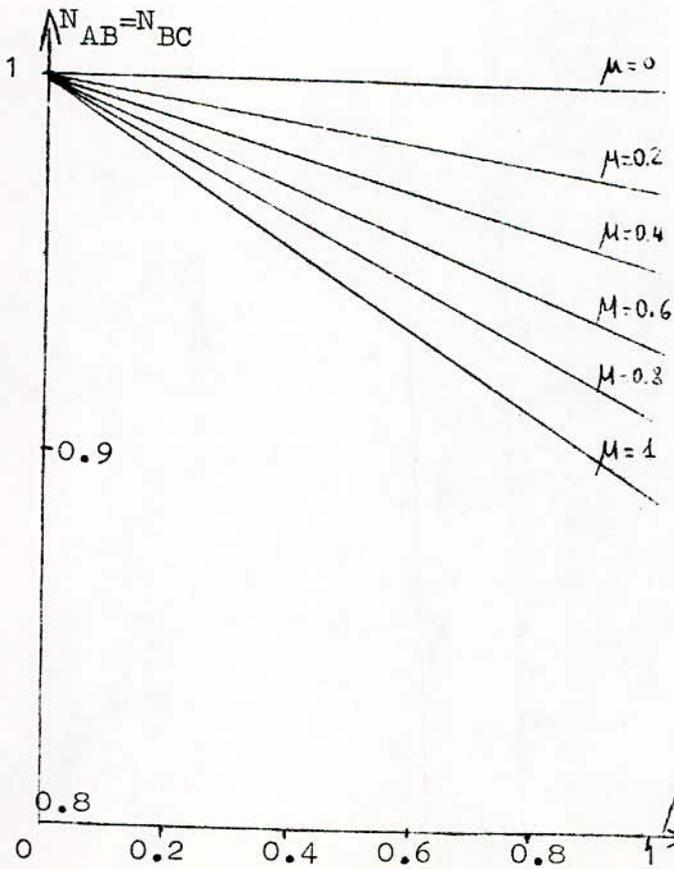
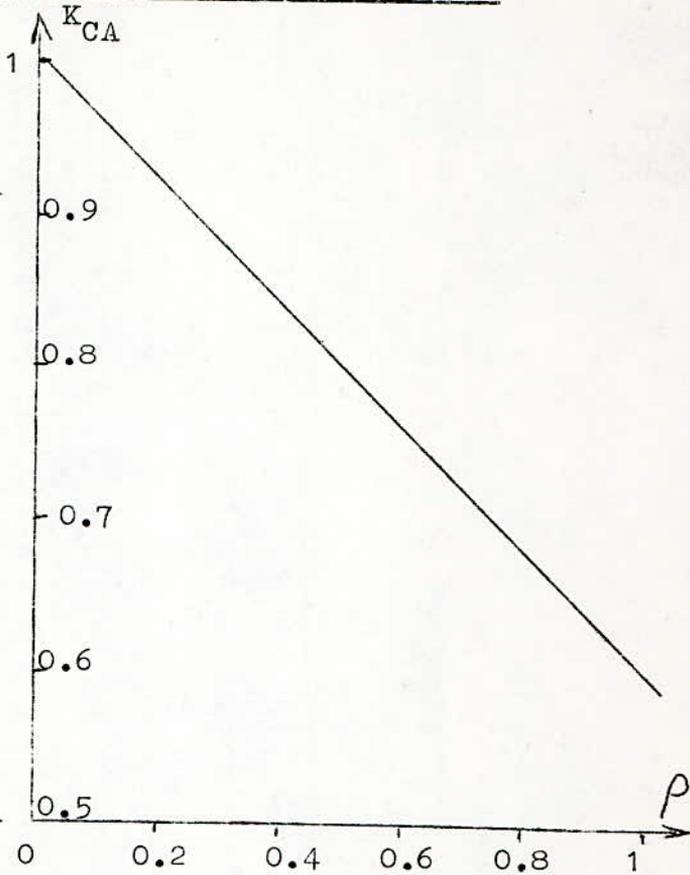
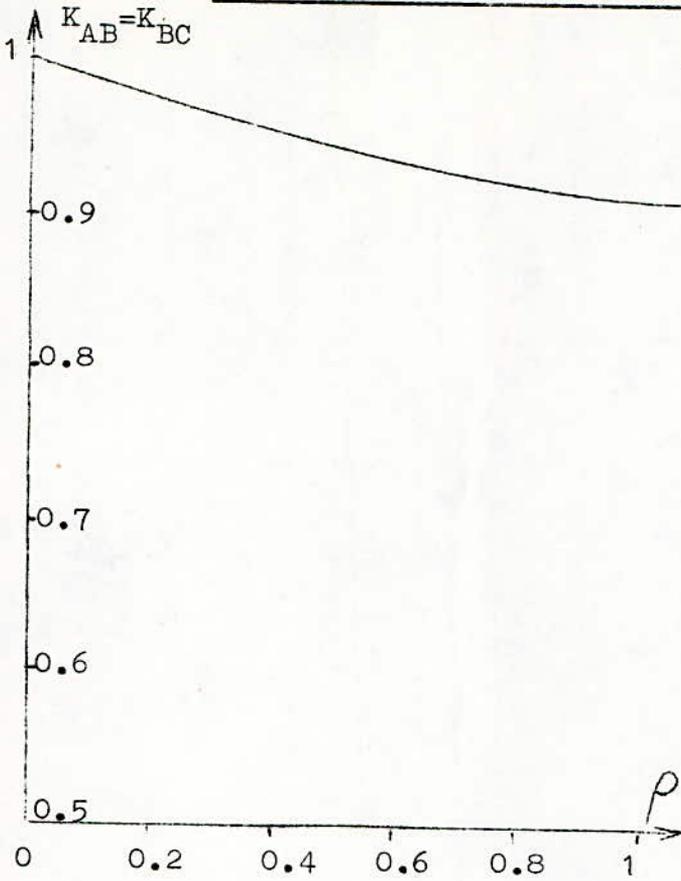
K_{mn} , N_{mn} , ψ_{mn}



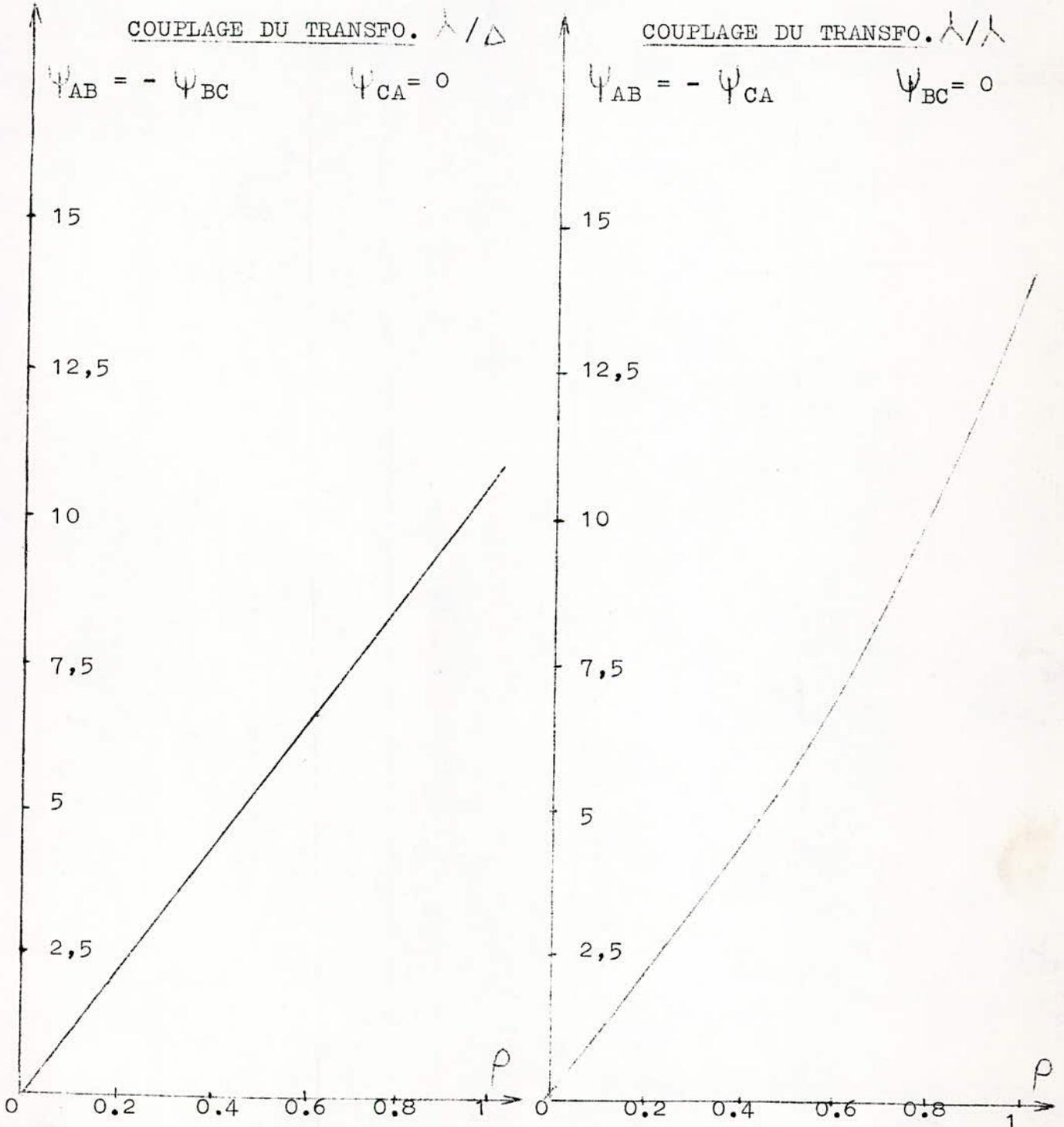
COURT-CIRCUIT MONOPHASE COUPLAGE TRANSFO. $\lambda/\lambda \xi = 3$

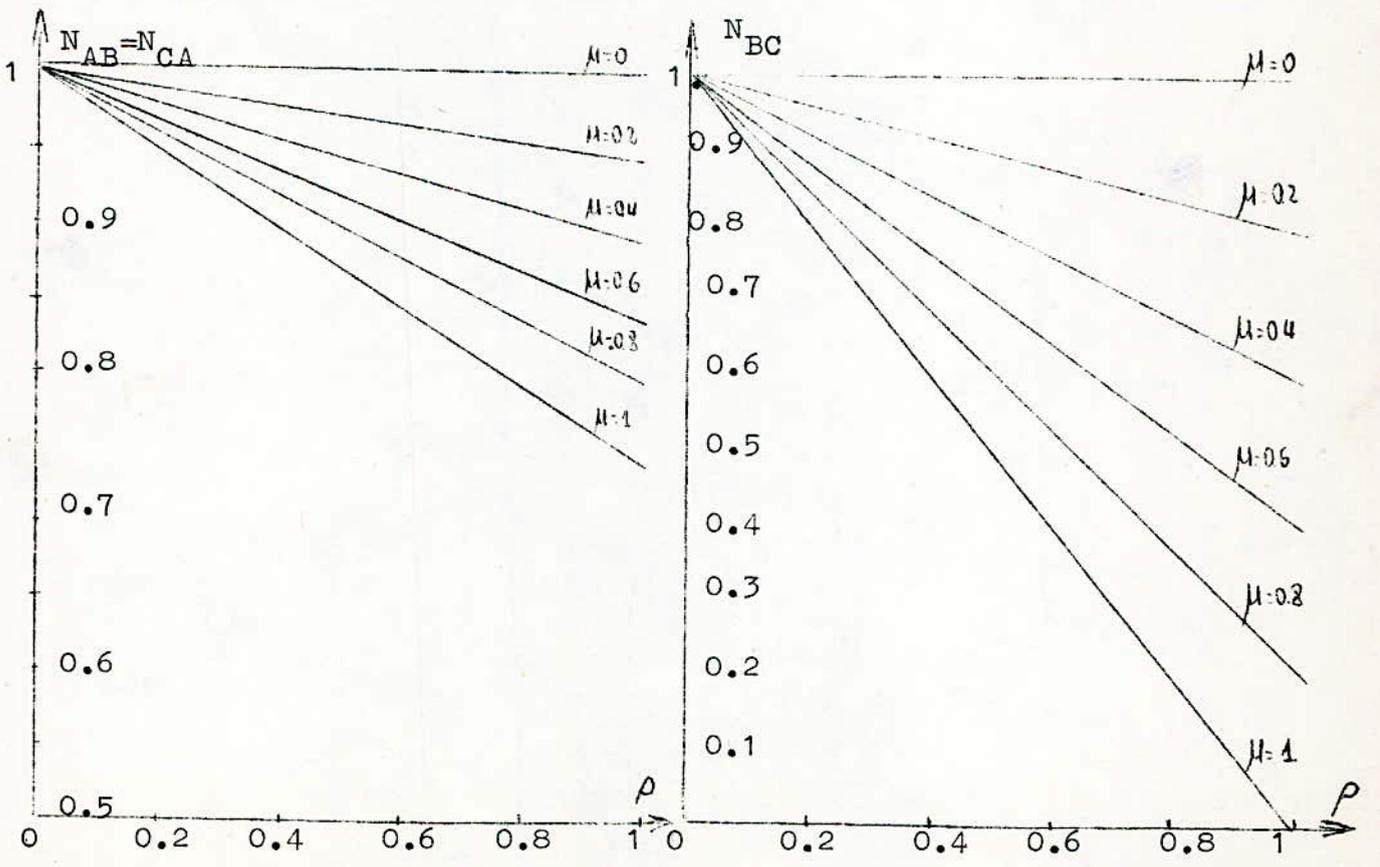
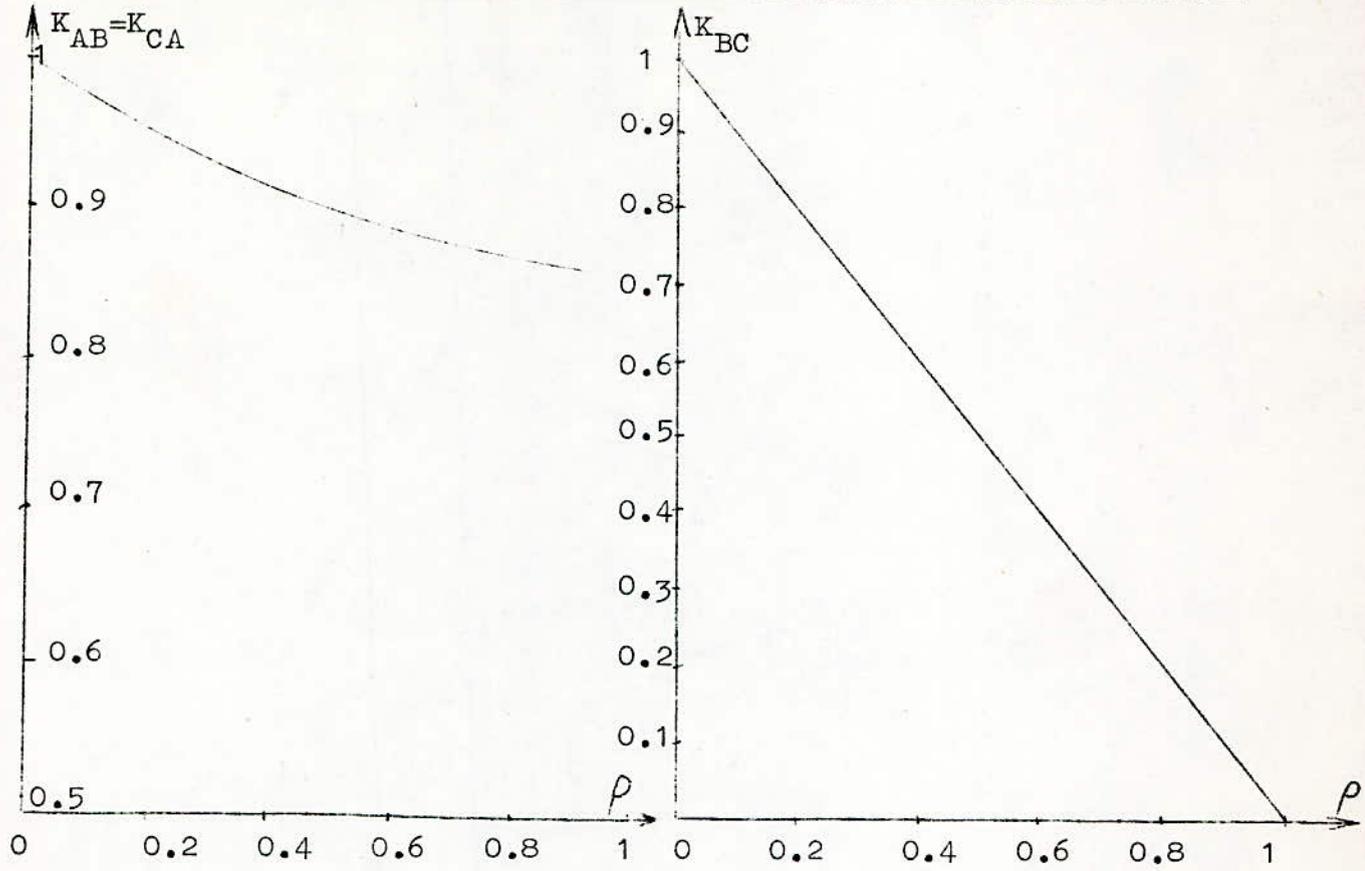


COURT-CIRCUIT MONOPHASE COUPLAGE TRANSFO. $\lambda/\Delta \epsilon = 3$

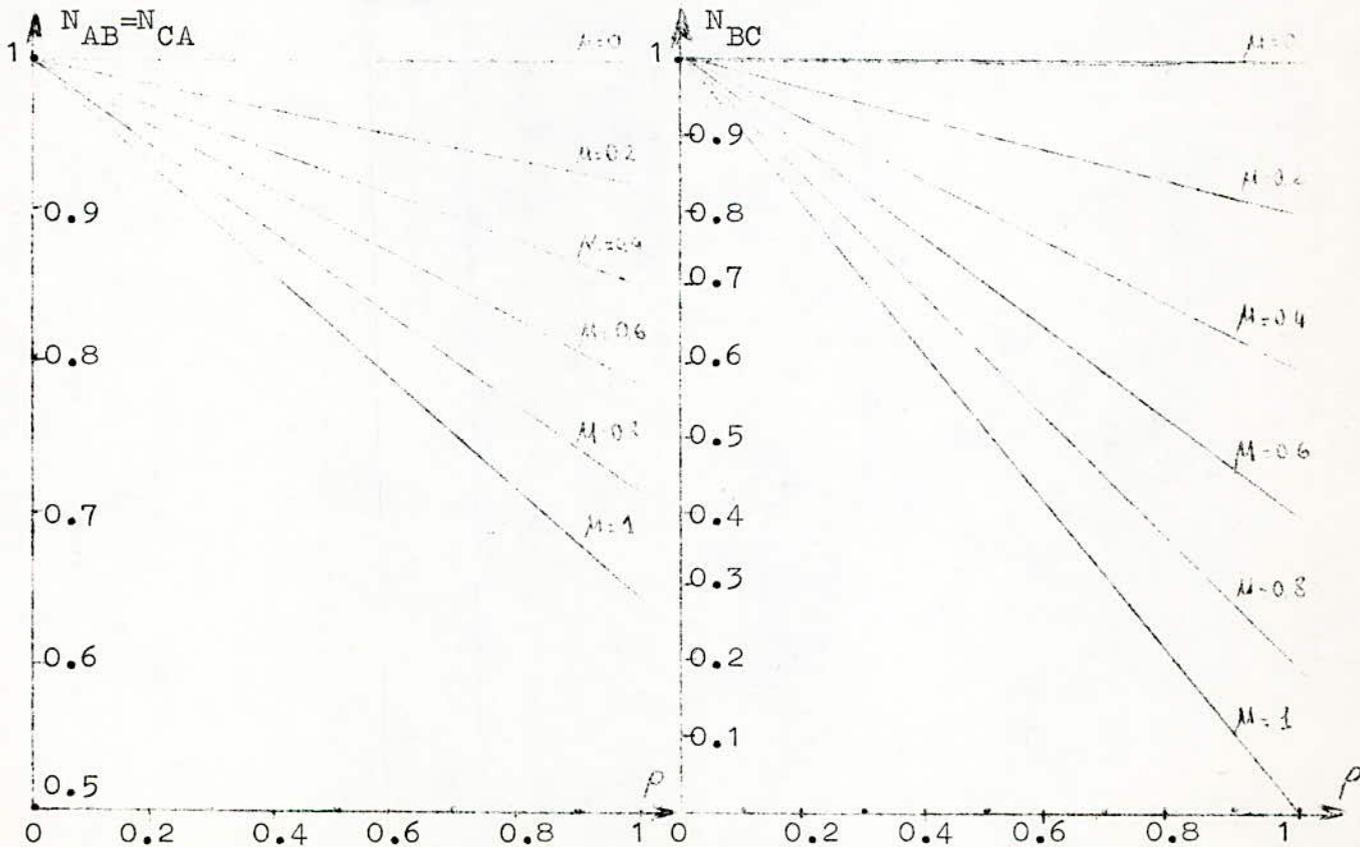
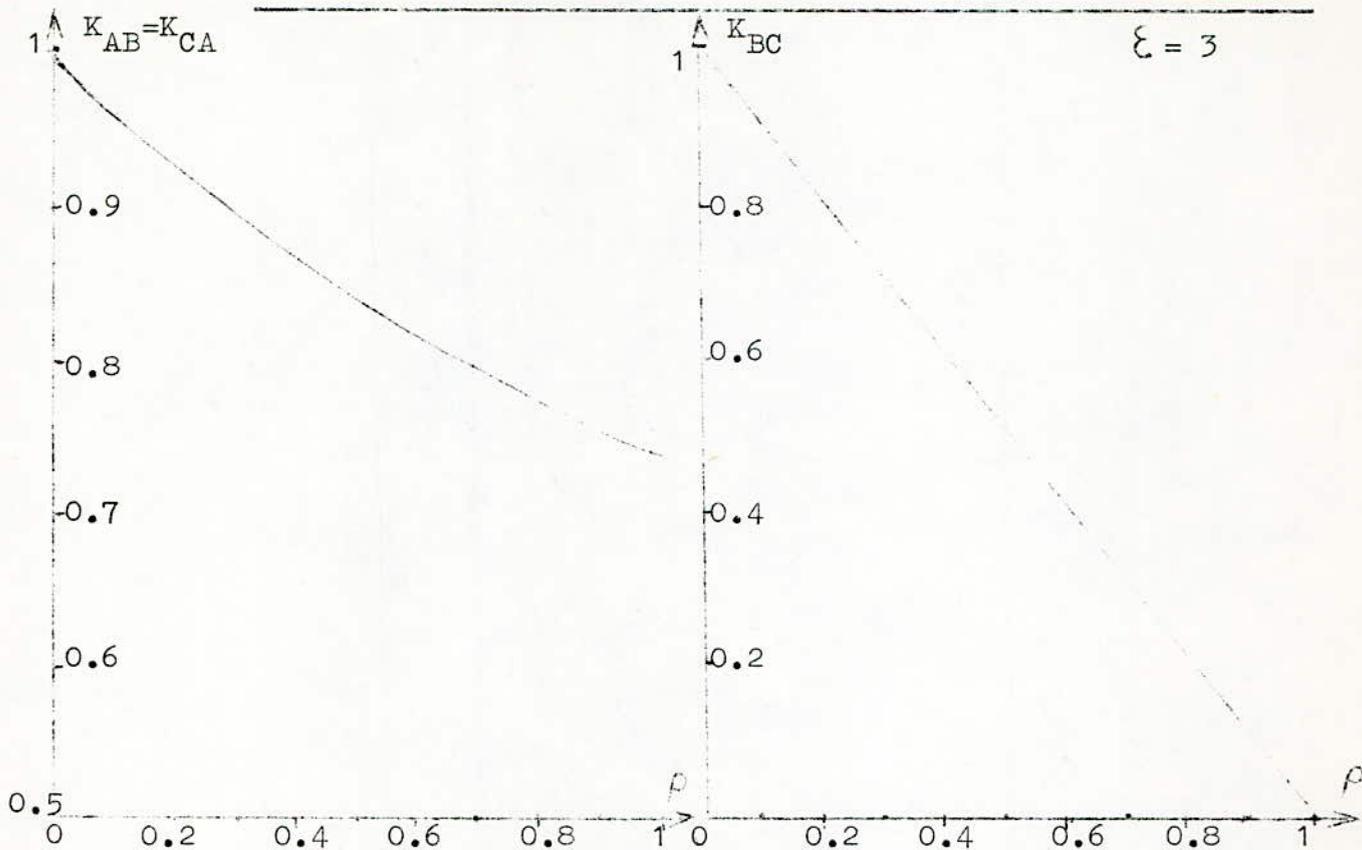


C O U R T - C I R C U I T M O N O P H A S E $\mathcal{E} = 3$





COURT-CIRCUIT BIPHASE AVEC TERRE Couplage transfo. λ/λ



C O U R T - C I R C U I T B I P H A S E

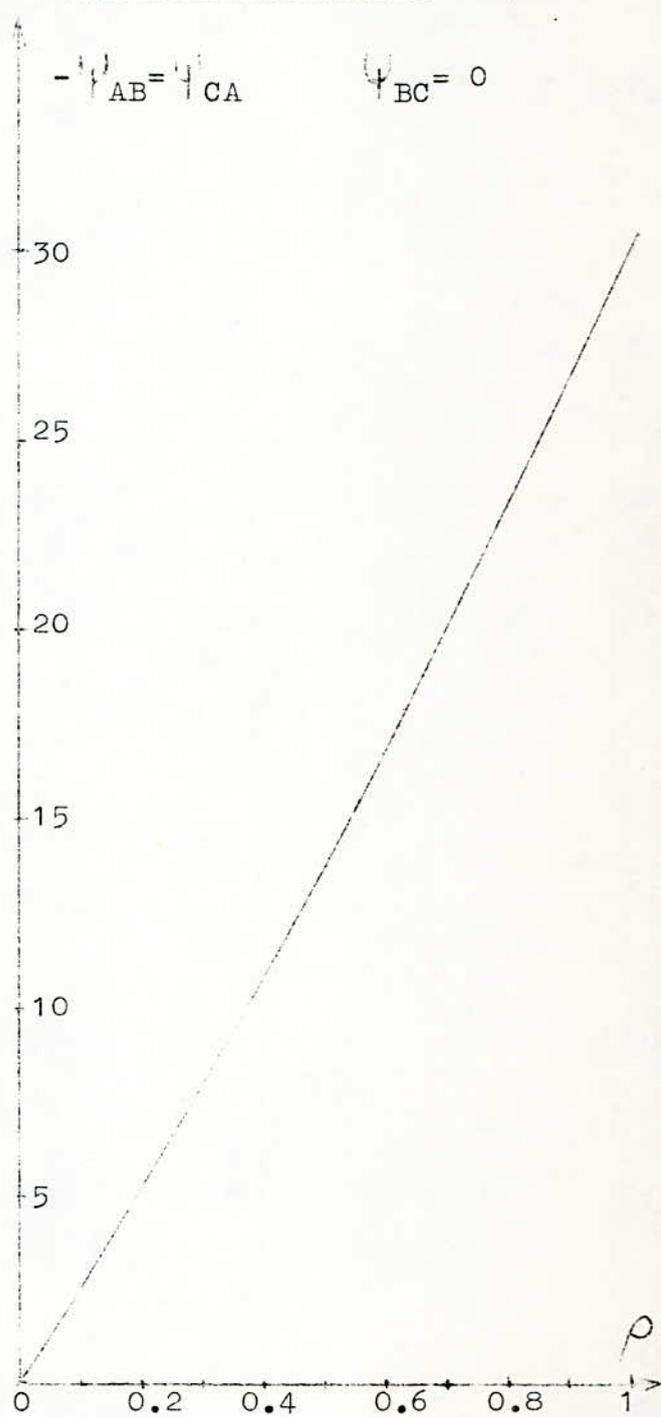
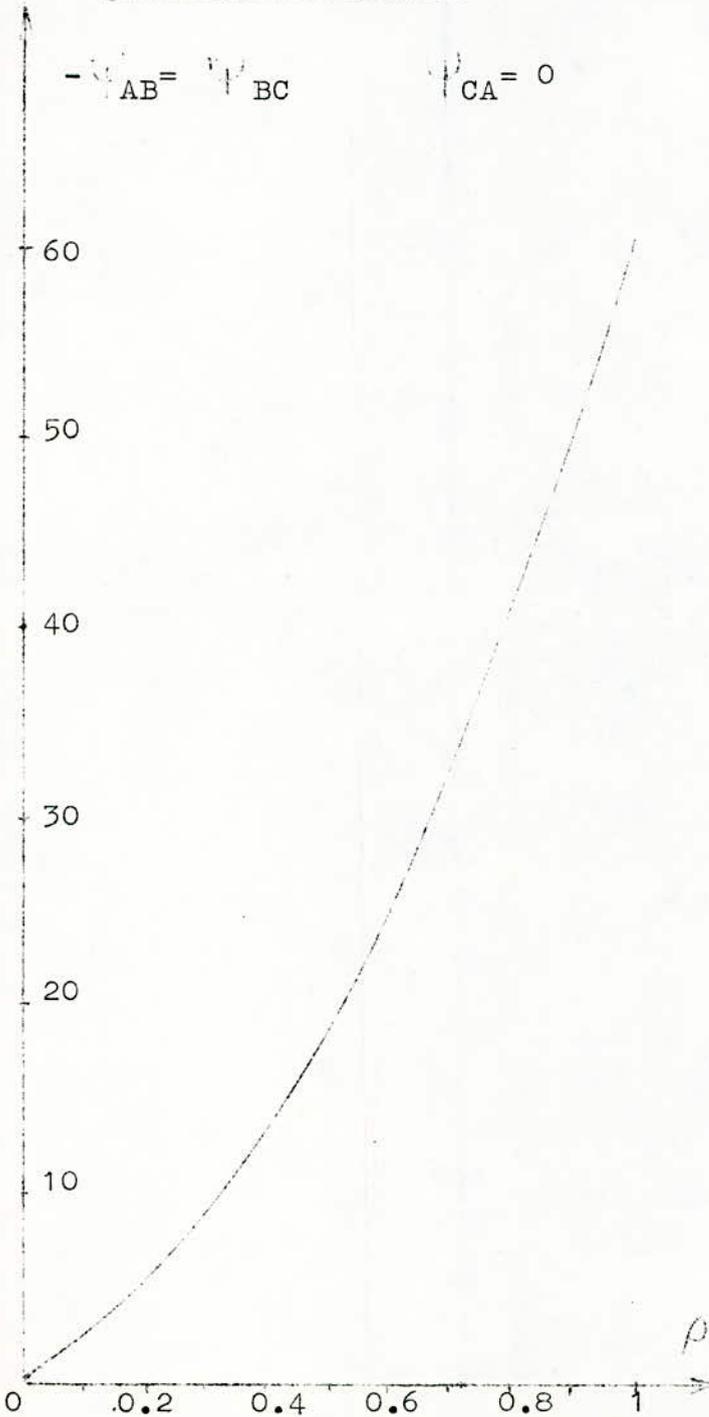
$\xi = 3$

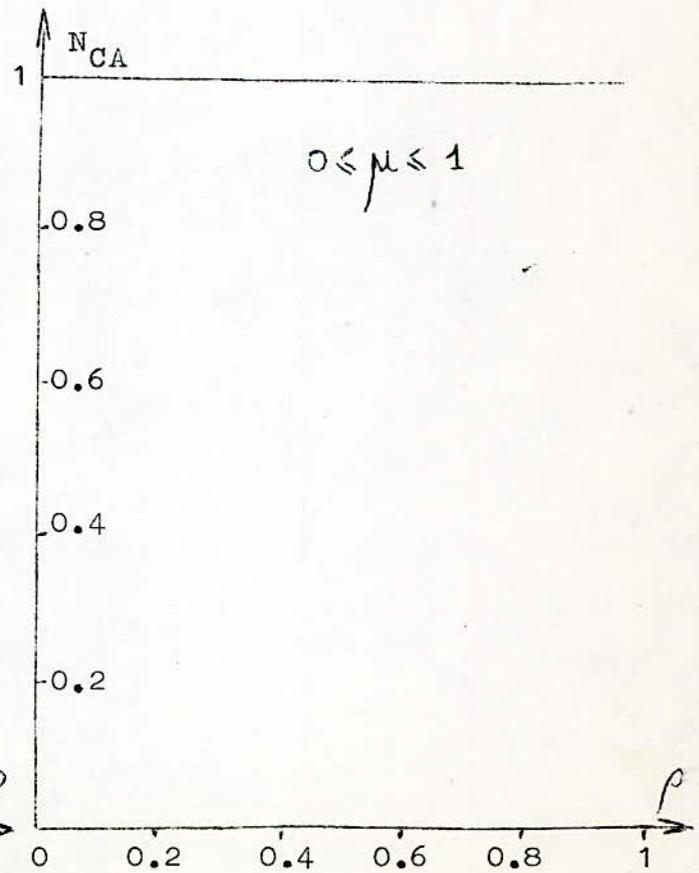
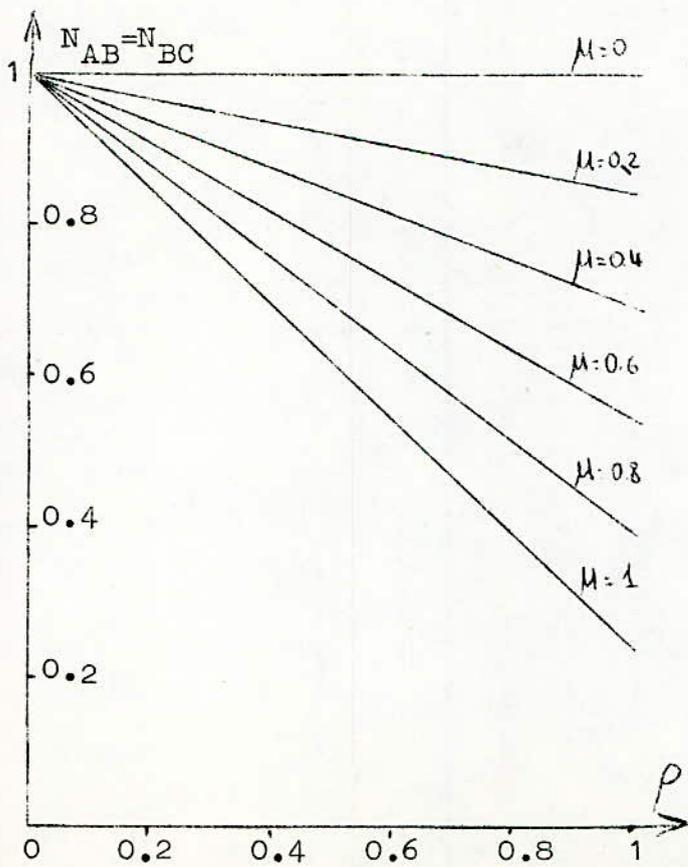
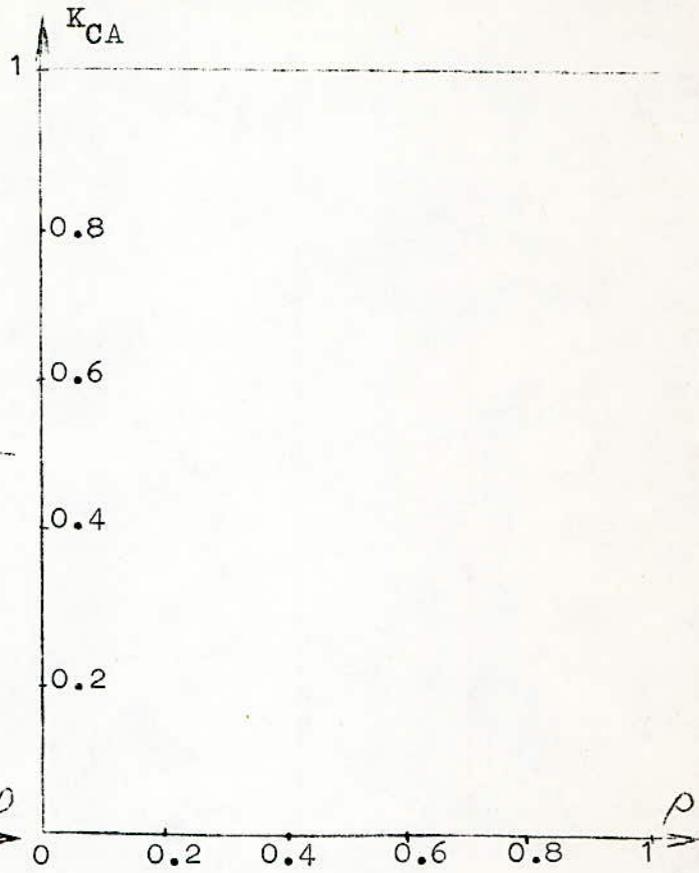
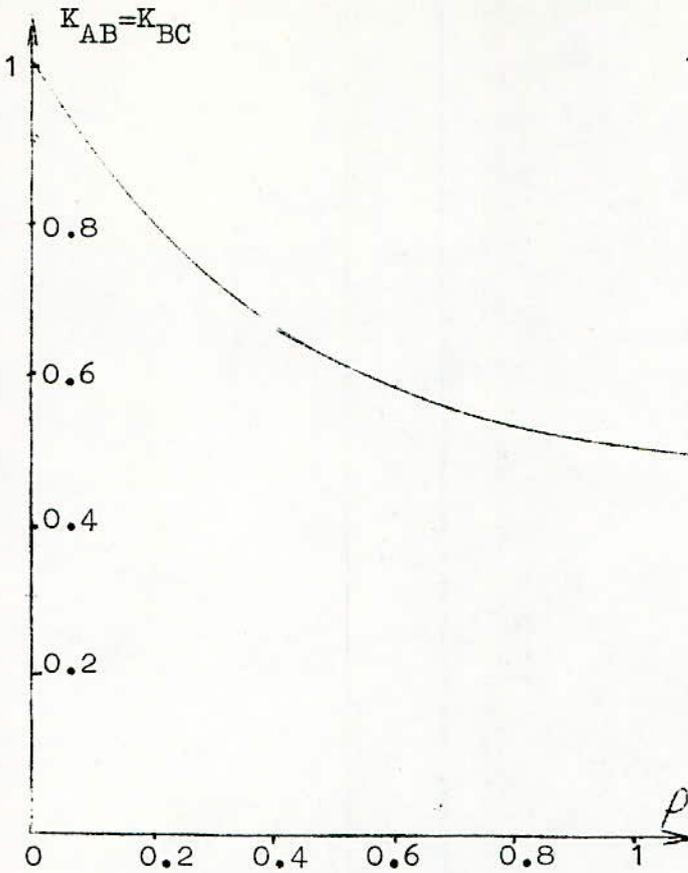
Couplage du transfo. Δ/Δ

Couplage du transfo. Δ/Δ

$-\psi_{AB} = \psi_{BC} \quad \psi_{CA} = 0$

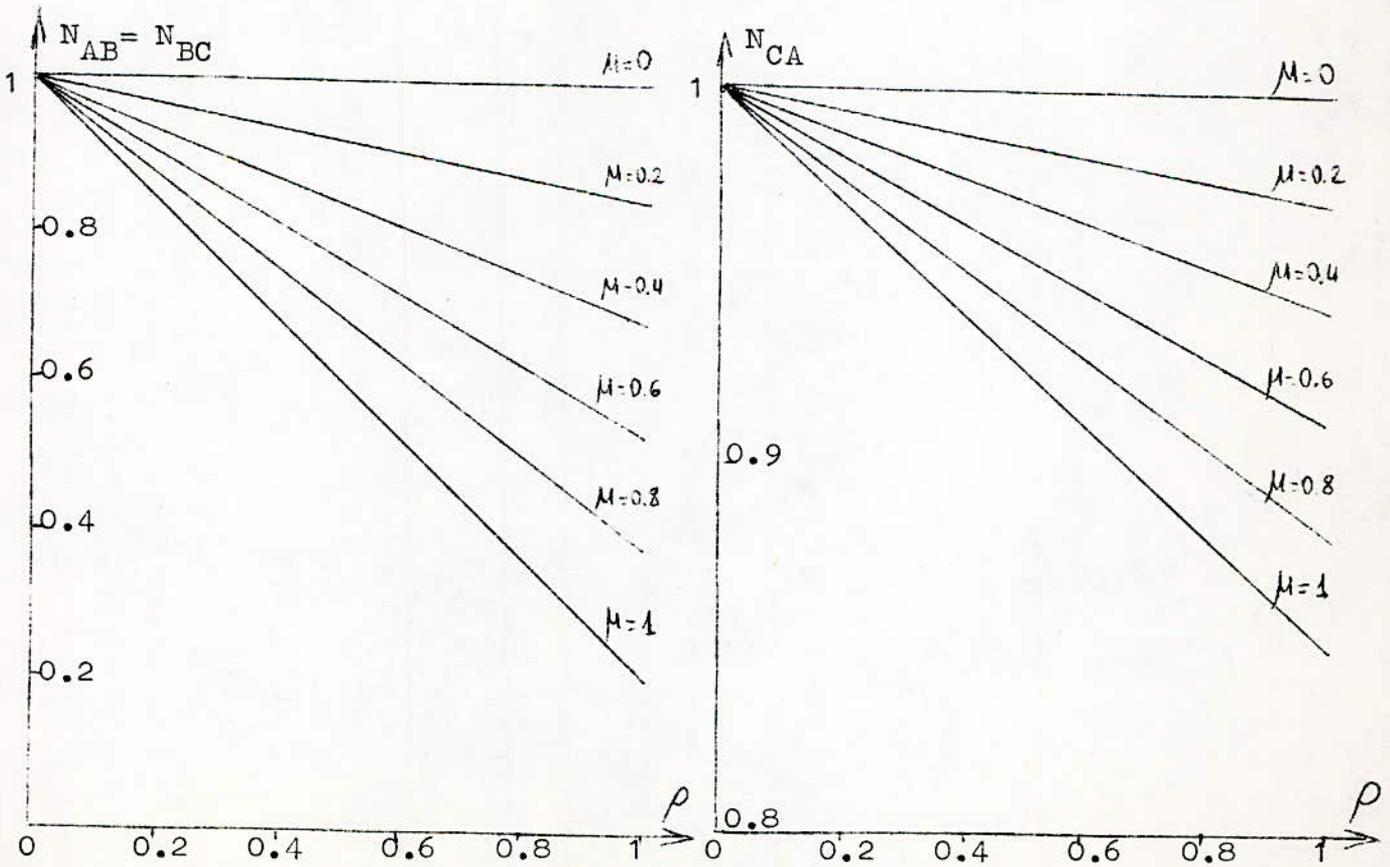
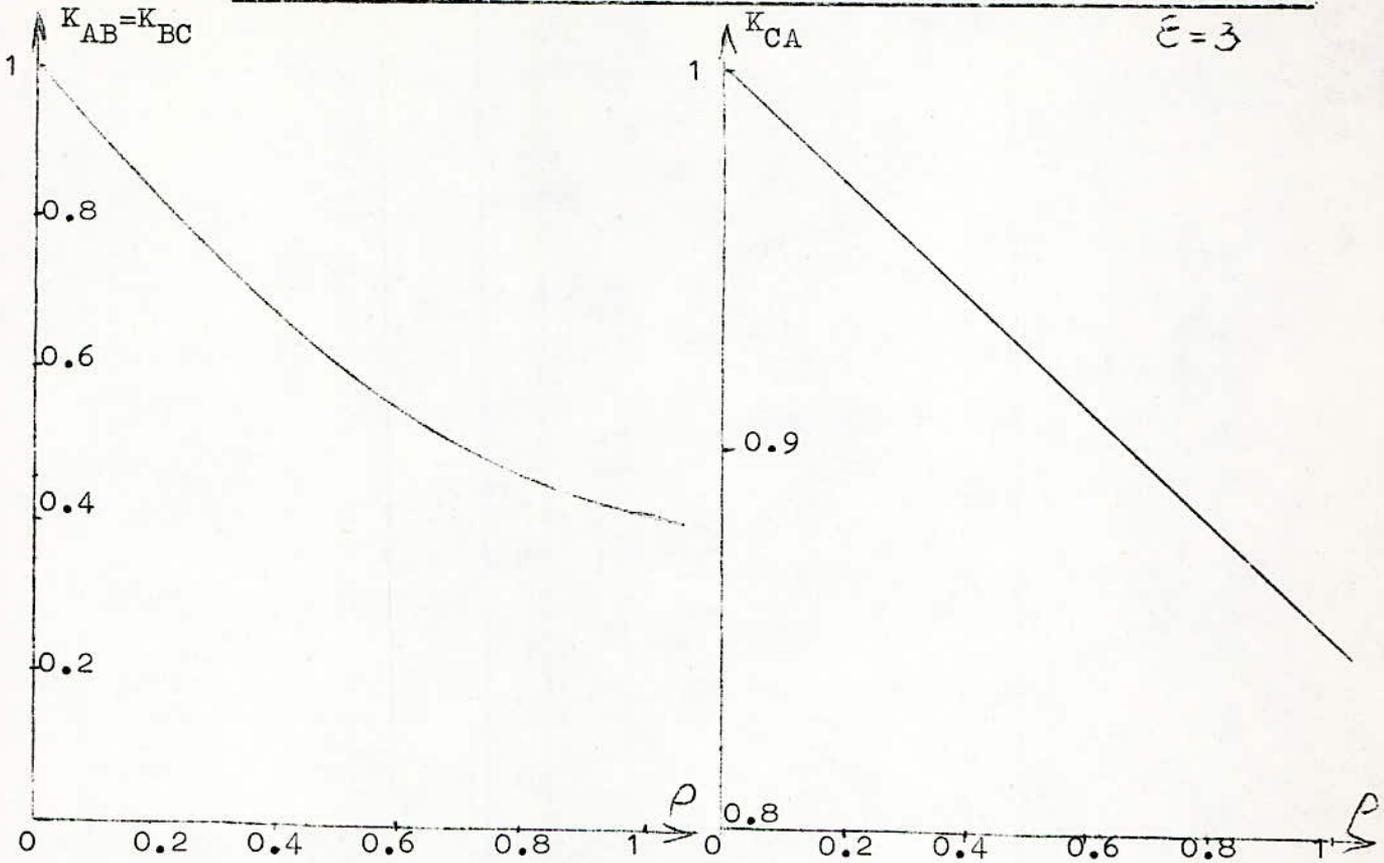
$-\psi_{AB} = \psi_{CA} \quad \psi_{BC} = 0$





COURT-CIRCUIT BIPHASE AVEC TERRE COUPLAGE TRANSFO. λ/Δ

$\bar{E} = 3$



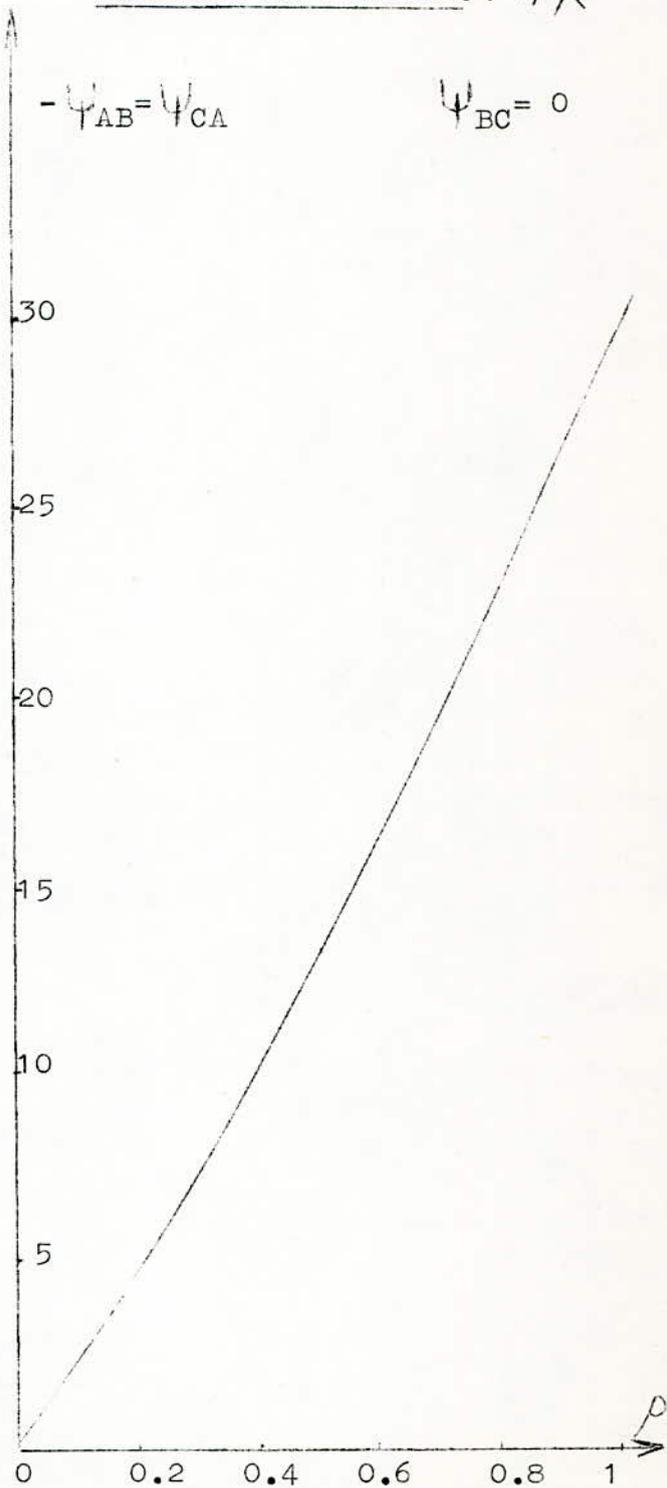
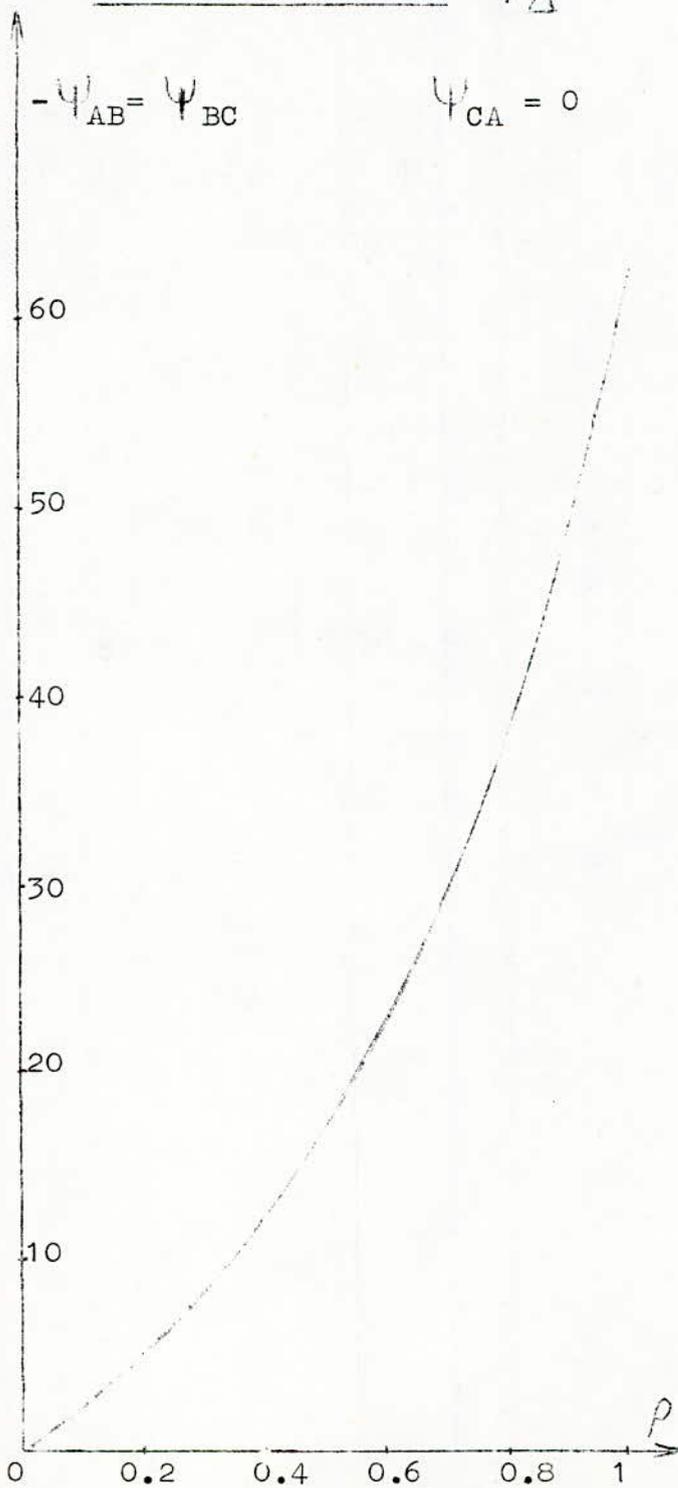
C O U R T - C I R C U I T B I P H A S E A V E C T E R R E $\epsilon = 3$

COUPLAGE DU TRANSFO Δ / Δ

COUPLAGE DU TRANSFO. Δ / Δ

$-\psi_{AB} = \psi_{BC}$ $\psi_{CA} = 0$

$-\psi_{AB} = \psi_{CA}$ $\psi_{BC} = 0$



VI- SIMULATION DU PONT REDRESSEUR

6.1. Méthodes de simulation

La simulation du pont redresseur nécessite une méthode convenable programmée sur ordinateur. Pour cela deux méthodes sont envisageables:

1° méthode

A partir du schéma du pont, on décrit les six circuits possibles par des équations différentielles dont on introduit les conditions initiales de courants et de tensions. On définit un système de 7 équations différentielles résolubles par des méthodes numériques.

2° méthode

A partir du pont, on définit une topologie générale qui permet de diminuer l'ordre du système dont la résolution se fera pour chaque intervalle de temps, soit 60° en régime symétrique ; et on remplace au fur et à mesure pour chaque opération les tensions d'alimentation par phase.

6.2. Processus central

Le système pont redresseur fonctionne de manière à donner une variété de tensions et de courants demandés. Un programme sur ordinateur digital, dans lequel tous les paramètres sont représentés numériquement fournit, pour tous les cas considérés des résultats appréciables. Les auteurs (c.f. Bibliog. n°3) ont appelé ceci le "Central Process", méthode ou technique qui définit les états du système.

Le processus commence par l'ouverture d'un thyristor se poursuit par la commutation et le temps pendant lequel deux thyristors de la série assurant la conduction du courant de charge I_d , il se termine par l'ouverture du thyristor suivant.

Cette méthode représente un ensemble d'opérations différentielles et booléennes, dont le système est défini mathématiquement par 5 équations différentielles du 1^o ordre résolues par la méthode itérative numérique dite de " RANGE KUTTA " .

Le programme est utilisé entièrement par insertions de conditions initiales correctes au commencement de chaque opération et dont la continuité est systématique.

Le pont dont les valves ou thyristors sont numérotés de 1 à 6 sera représenté par un schéma équivalent ou une topologie générale. Chaque thyristor passant peut être connu par le nombre d'intervalles de temps dans lequel il conduit et prend le courant direct .

Par exemple le thyristor th_1 sera conducteur passant aux opérations 1,7,13,19, généralisé par le nombre $1+6m$ ou m est un nombre entier positif .

Pour les autres valves et intervalles n , leurs opérations seront données par l'état $n+6m$,

Exemple :

Th_2 $n=2$ état $2+6m$

Le tableau n°1 de la page 52 nous donne les caractéristiques des tensions , courants à chaque intervalle de temps réparti sur six états (Six valves) pendant une période.

L'étude d'HIGNORANI (c.f.bibliog.) à nos jours a utilisé un schéma équivalent généralisé à 3 valves .

Notre étude nous a permis de faire ressortir et d'insister sur le phénomène d'apparition d'une 4^{ème} valve (régime 4) en surcharge et charges modérées.

La 4^{ème} valve intervenant lors du régime 3-4 a fait l'objet d'une nouvelle topologie plus complète que celle du processus central, néanmoins la résolution mathématique reste valable tout en utilisant une autre méthode de calcul pour la résolution des équations différentielles. La page 51 portant la configuration du processus généralise l'ensemble des six étapes .

CONFIGURATION DU PROCESSUS

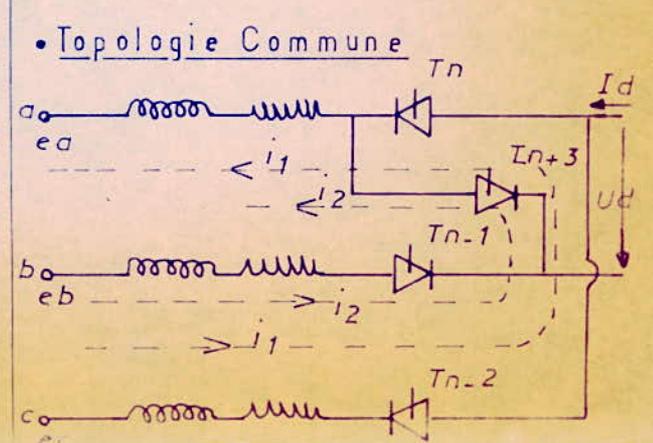
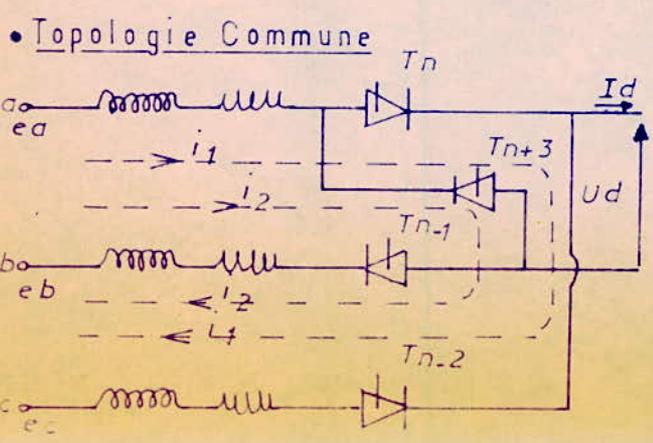
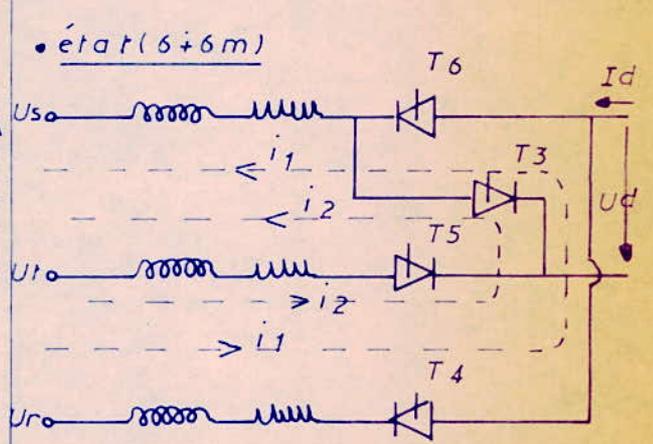
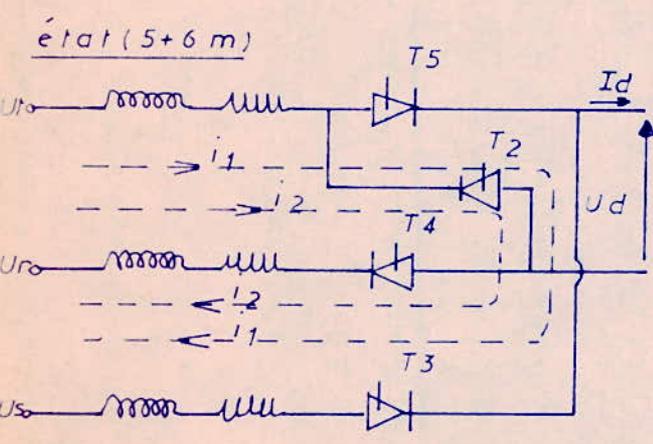
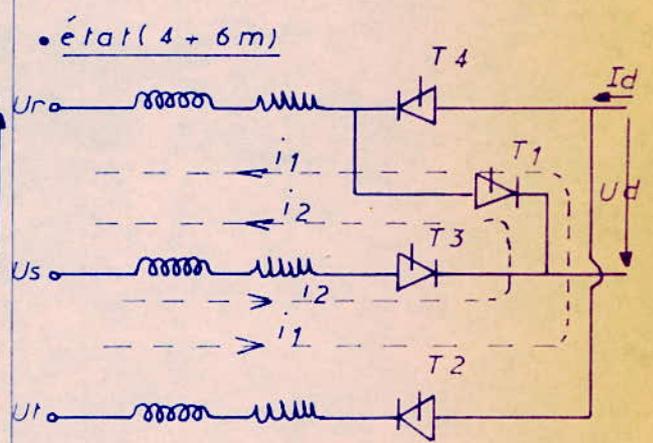
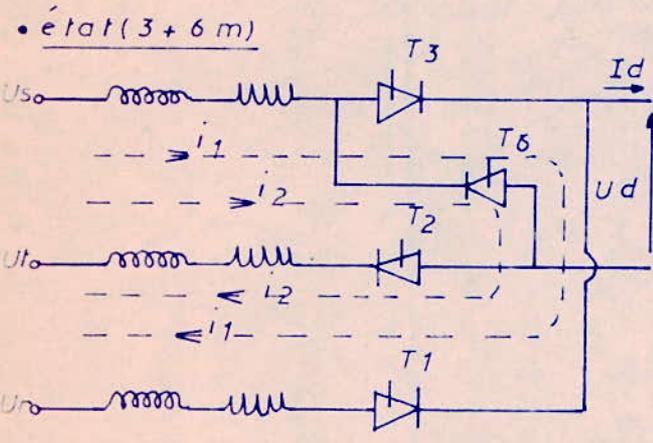
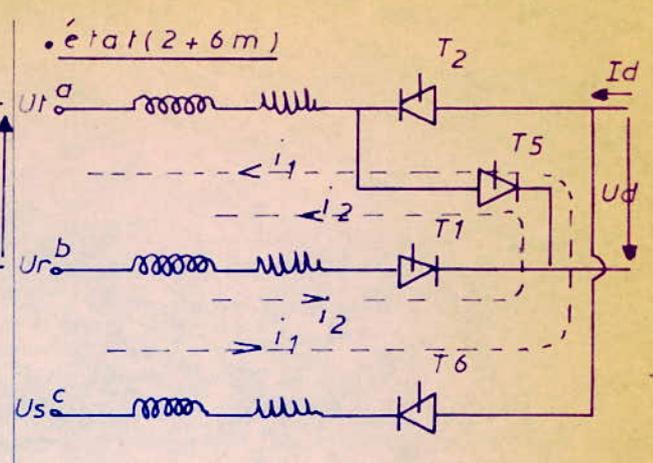
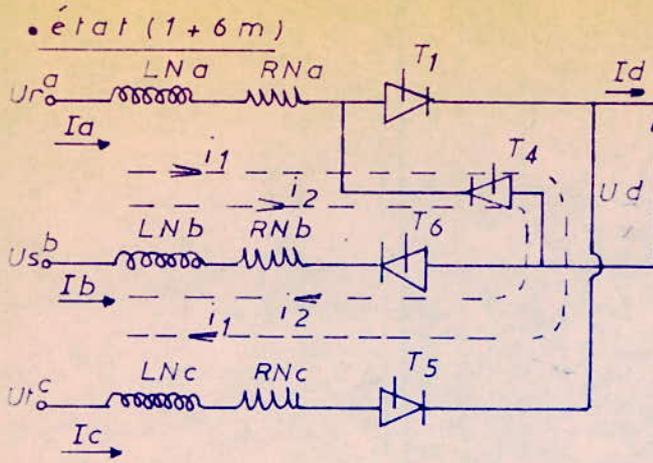


TABLEAU DES CARACTERISTIQUES DU SYSTEME (TABLEAU N° 1)

	1+6m	2+6m	3+6m	4+6m	5+6m	6+6m
e_A	e	$-e_T$	e_S	$-e_R$	e_T	$-e_S$
e_B	e_S	$-e_R$	e_T	$-e_S$	e_R	$-e_T$
e_C	e_T	$-e_S$	e_R	$-e_T$	e_S	$-e_R$
e_{AB}	e_{RS}	$-e_{TR}=e_{RT}$	e_{ST}	$-e_{RS}=e_{SR}$	e_{TR}	$-e_{ST}=e_{TS}$
e_{BC}	e_{ST}	$-e_{RS}=e_{SR}$	e_{TR}	$-e_{ST}=e_{TS}$	e_{RS}	$-e_{TR}=e_{RT}$
I_A	$i_1+i_2-I_d$	i_2	I_d-i_1	$-(i_1+i_2-I_d)$	$-i_2$	$-(I_d-i_1)$
I_B	$-i_2$	$-(I_d-i_1)$	$i_1+i_2-I_d$	i_2	I_d-i_1	$-(i_1+i_2-I_d)$
I_C	I_d-i_1	$-(i_1+i_2-I_d)$	$-i_2$	$-(I_d-i_1)$	$i_1+i_2-I_d$	i_2
$e_{AB} = e_1$	$\sqrt{2} \frac{E}{RS} \sin G_1$	$\sqrt{2} \frac{E}{RT} \sin G_1$	$\sqrt{2} \frac{E}{ST} \sin G_1$	$\sqrt{2} \frac{E}{SR} \sin G_1$	$\sqrt{2} \frac{E}{TR} \sin G_1$	$\sqrt{2} \frac{E}{RT} \sin G_1$
$e_{BC} = e_2$	$\sqrt{2} \frac{E}{ST} \sin G_2$	$\sqrt{2} \frac{E}{SR} \sin G_2$	$\sqrt{2} \frac{E}{TR} \sin G_2$	$\sqrt{2} \frac{E}{TS} \sin G_2$	$\sqrt{2} \frac{E}{RS} \sin G_2$	$\sqrt{2} \frac{E}{RT} \sin G_2$
Th	4 5 6 1	5 6 1 2	6 1 2 3	1 2 3 4	2 3 4 5	3 4 5 6
I_{th_1}	i_1	i_2	I_d-i_1	I_d-i_1	0	0
I_{th_2}	0	i_1	i_2	I_d-i_1	I_d-i_1	0
I_{th_3}	0	0	i_1	i_2	I_d-i_1	I_d-i_1
I_{th_4}	I_d-i_1	0	0	i_1	i_2	I_d-i_1
I_{th_5}	I_d-i_1	I_d-i_1	0	0	i_1	i_2
I_{th_6}	i_2	I_d-i_1	I_d-i_1	0	0	i_1

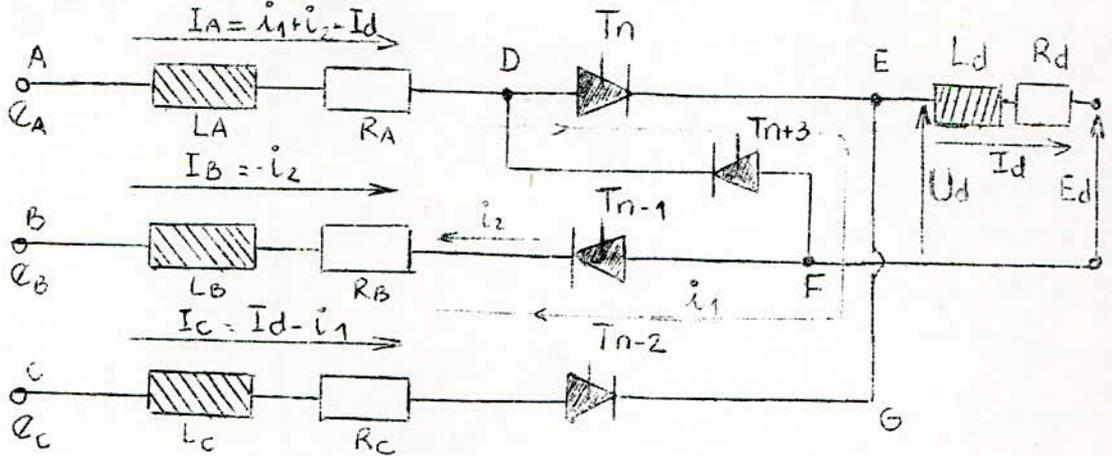
nota: $G_1 = wt + \alpha + \frac{\pi}{3} + \psi_{CA} + \psi_{AB}$
 $G_2 = wt + \alpha - \frac{\pi}{3} - \psi_{CA} + \psi_{BC}$

6.3. Choix d'une topologie générale.

Pour un processus donné, il suffit de choisir convenablement les tensions et le sens des courants correspondants.

De ces dernières topologies du système, on en déduit une topologie générale valable pour tous les processus.

On remarque que pour passer de l'une à l'autre il faut changer le sens de montage des valves, ce qui revient à changer les signes des tensions en conservant une même topologie.



6.4. Mise en équation

A partir du schéma équivalent ci-dessus, nous définissons les 5 équations relatives aux mailles du système.

- Equation (1) maille A E F B
- Equation (2) maille D E F courant $i_1 = I_d$
- Equation (3) maille F B courant $i_2 = I_d$
- Equation (4) maille A E G C
- Equation (5) maille A D F B

6.5. Notation

$$I_A = i_1 + i_2 + Id$$

$$I_B = -i_2$$

$$I_C = Id - i_1$$

$$f_1 = d i_1 / dt$$

$$f_2 = d i_2 / dt$$

$$f_3 = d Id / dt$$

$$i_1 = Y_1$$

$$i_2 = Y_2$$

$$i_3 = Y_3$$

$$E_{AB} = E_1$$

$$E_{BC} = E_2$$

$$E_d = E_3$$

$$U_d = U_3$$

$$L_A = L N_A$$

$$L_B = L N_B$$

$$L_C = L N_C$$

$$R_A = R N_A$$

$$R_B = R N_B$$

$$R_C = R N_C$$

6.6. Ecriture des équations

⊕ Equation (1) maille AEFB

$$E_{AB} = R_A I_A + L_A \frac{dI_A}{dt} + L_d \frac{dI_d}{dt} + R_d I_d + E_d - R_B I_B - L_B \frac{dI_B}{dt}$$

$$E_{AB} = R_A (i_1 + i_2 - I_d) + L_A \frac{d(i_1 + i_2 - I_d)}{dt} + L_d \frac{dI_d}{dt} + R_d I_d + E_d + R_B i_2 + L_B \frac{di_2}{dt}$$

$$E_{AB} = E_1 = R_A Y_1 + (R_A + R_B) Y_2 + (R_d - R_A) Y_3 + L_A f_1 + (L_A + L_B) f_2 + (L_d - L_A) f_3 + E_3$$

$$= L_A f_1 + (L_A - L_B) f_2 + (L_d - L_A) f_3 = -R_A Y_1 - (R_A + R_B) Y_2 + (R_A - R_d) Y_3 + E_1 - E_3$$

$$L_A f_1 + L_{AB} f_2 + (L_d - L_A) f_3 = -R_A Y_1 - R_{AB} Y_2 + (R_A - R_d) Y_3 + E_1 - E_3$$

⊕ Equation (2) courant $i_1 = I_d$ $f_1 = f_3$

soit l'équation $f_1 - f_3 = 0$

$$f_1 - f_3 = 0$$

⊕ Equation (3) courant $i_2 = I_d$ $f_2 = f_3$

soit l'équation $f_2 - f_3 = 0$

$$f_2 - f_3 = 0$$

⊕ Equation (4) maille AEGC

$$E_{AC} = R_A I_A + L_A \frac{dI_A}{dt} - R_C I_C - L_C \frac{dI_C}{dt}$$

$$E_{AC} = R_A (i_1 + i_2 - I_d) + L_A \frac{d(i_1 + i_2 - I_d)}{dt} - R_C (I_d - i_1) - L_C \frac{d(I_d - i_1)}{dt}$$

$$E_{AC} = E_1 + E_2 = R_A (Y_1 + Y_2 - Y_3) + L_A (f_1 + f_2 - f_3) - R_C (Y_3 - Y_1) - L_C (f_3 - f_1)$$

$$E_1 + E_2 = (R_A + R_C) Y_1 + R_A Y_2 - (R_A + R_C) Y_3 + (L_A + L_C) f_1 + L_A f_2 - (L_A + L_C) f_3$$

$$(L_A + L_C) f_1 + L_A f_2 - (L_A + L_C) f_3 = -(R_A + R_C) Y_1 - R_A Y_2 + (R_A + R_C) Y_3 + E_1 + E_2$$

$$L_{AC} f_1 + L_A f_2 - L_{AC} f_3 = -R_{AC} Y_1 - R_A Y_2 + R_{AC} Y_3 + E_1 + E_2$$

⊕ Equation (5) maille ADFB

$$E_{AB} = R_A I_A + L_A \frac{d I_A}{dt} + R_B i_2 + L_B \frac{d i_2}{dt}$$

$$E_{AB} = R_A (i_1 + i_2 - I_d) + L_A \frac{d(i_1 + i_2 - I_d)}{dt} + R_B i_2 + L_B \frac{d i_2}{dt}$$

$$E_{AB} = R_A (Y_1 + Y_2 - Y_3) + L_A (f_1 + f_2 - f_3) + R_B Y_2 + L_B f_2$$

$$E_{AB} = E_1 = R_A Y_1 + (R_A + R_B) Y_2 - R_A Y_3 + L_A f_1 + (L_A + L_B) f_2 - L_A f_3$$

$$L_A f_1 + (L_A + L_B) f_2 - L_A f_3 = E_1 - R_A Y_1 - (R_A + R_B) Y_2 + R_A Y_3$$

$$L_A f_1 + L_{AB} f_2 - L_A f_3 = -R_A Y_1 - R_{AB} Y_2 + R_A Y_3 + E_1$$

Nous résumerons les équations en fonction des conditions d'amorçage, courants et tensions dans le tableau ci-dessous :

Courants	$i_1 < I_d$ $i_2 < I_d$	$i_2 = I_d$ $i_1 < I_d$	$i_2 = I_d$ $i_1 = I_d$
Valves conductantes	4	3	2
Equations	(1) (4) (5)	(1) (3) (4)	(1) (2) (3)

⊕ Régime 4 valves

équations régissant au fonctionnement à partir des conditions d'amorçage $i_1 < I_d$ et $i_2 < I_d$ (1,4,5)

$$(1) \quad L_A f_1 + (L_A + L_B) f_2 + (L_d - L_A) f_3 = -R_A Y_1 - R_{AB} Y_2 + (R_A - R_d) Y_3 + E_1 + E_3$$

$$(4) \quad L_{AC} f_1 + L_A f_2 - L_{AC} f_3 = -R_{AC} Y_1 - R_A Y_2 + (R_{AC}) Y_3 + E_1 + E_2$$

$$(5) \quad L_A f_1 + L_{AB} f_2 - L_A f_3 = -R_A Y_1 - R_{AB} Y_2 + R_A Y_3 + E_1$$

A partir de ces trois équations on forme un système matriciel de la forme $|A| \cdot |f| = |B|$ dont l'inversion est faite manuellement $|f| = |A|^{-1} \cdot |B|$

$$\begin{bmatrix} L_A & L_{AB} & L_d - L_A \\ L_{AC} & L_A & -L_{AC} \\ L_A & L_{AB} & -L_A \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_A Y_1 - R_{AB} Y_2 + (R_A - R_d) Y_3 + E_1 - E_3 \\ -R_{AC} Y_1 - R_A Y_2 + R_{AC} Y_3 + E_1 + E_2 \\ -R_A Y_1 - R_{AB} Y_2 + R_A Y_3 + E_1 \end{bmatrix}$$

En calculant le déterminant de la matrice [A] on trouve

$$\det = D_4 = L_d (L_{AC} L_{AB} - L_A^2)$$

$$[A]^{-1} = \frac{1}{D_4} \begin{bmatrix} L_{AB} L_{AC} - L_A^2 & L_{AB} L_d & -L_A L_d \\ 0 & -L_A L_d & L_{AC} L_d \\ L_{AC} L_{AB} - L_A^2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = [A]^{-1} \begin{bmatrix} -R_A Y_1 - R_{AB} Y_2 + (R_A - R_d) Y_3 + E_1 - E_3 \\ -R_{AC} Y_1 - R_A Y_2 + R_{AC} Y_3 + E_1 + E_2 \\ -R_A Y_1 - R_{AB} Y_2 + R_{AC} Y_3 + E_1 \end{bmatrix}$$

En développant nous trouvons une expression simple :

$$f_1 = A_{11} Y_1 + A_{12} Y_2 + A_{13} Y_3 + A_{14} E_1 + A_{15} E_2 + A_{16} E_3$$

$$f_2 = A_{21} Y_1 + A_{22} Y_2 + A_{23} Y_3 + A_{24} E_1 + A_{25} E_2 + A_{26} E_3$$

$$f_3 = A_{31} Y_1 + A_{32} Y_2 + A_{33} Y_3 + A_{34} E_1 + A_{35} E_2 + A_{36} E_3$$

Les coefficients A_{mn} sont fonctions de $[A]^{-1}$, R .
 Nous expliciterons pour chaque régime les valeurs des coefficients A_{mn} .

⊕ Coefficients , regime 4 V .

Notons les expressions des coefficients N_{mn}

$$N_{AB} = 2 L N_{AB}$$

$$N_{AC} = 2 L N_{AC}$$

$$N_{AB} = \frac{1}{2} (N_A + N_B) \text{ généralisé } N_{mn} = \frac{1}{2} (N_m + N_n)$$

$$N_A = N_{AB} + N_{AC} - N_{CA}$$

-valeurs des coefficients A_{mn} de f_1 .

$$A_{11} = \frac{R_A L_A - R_{AC} L_{AB}}{L_{AC} L_{AB} - L_A^2} = - \frac{R}{L}$$

$$A_{12} = \frac{R_{AB} L_A - L_{AB} R_A}{L_{AC} L_{AB} - L_A^2} = 0$$

$$A_{13} = \frac{R_{AC}L_{AB} - R_A L_A}{L_{AC}L_{AB} - L_A^2} - \frac{R_d}{L_d} = \frac{R}{L} - \frac{R_d}{L_d}$$

$$A_{14} = \frac{L_{AB} - L_A}{L_{AC}L_{AB} - L_A^2} = \frac{2 N_{AB} - N_A}{L(4 N_{AC}N_{AB} - N_A^2)}$$

$$A_{15} = \frac{L_{AB}}{L_{AC}L_{AB} - L_A^2} = \frac{2 N_{AB} - N_A}{L(4 N_{AC}N_{AB} - N_A^2)}$$

$$A_{16} = - \frac{1}{L_d} = \frac{1}{L L'_d}$$

-Valeurs des coefficients A_{mn} de f_2

$$A_{21} = \frac{R_{AC}L_A - R_A L_{AC}}{L_{AC}L_{AB} - L_A^2} = 0$$

$$A_{22} = \frac{R_A L_A - R_{AB}L_{AC}}{L_{AC}L_{AB} - L_A^2} = - \frac{R}{L}$$

$$A_{23} = \frac{R_A L_{AC} - R_A L_A - R_d L_{AC}}{L_{AC}L_{AB} - L_A^2} = 0$$

$$A_{24} = \frac{L_{AC} - L_A}{L_{AC}L_{AB} - L_A^2} = \frac{2 N_{AC} - N_A}{L(4 N_{AC}N_{AB} - N_A^2)}$$

$$A_{25} = \frac{-L_A}{L_{AC}L_{AB} - L_A^2} = \frac{-N_A}{L(4 N_{AC}N_{AB} - N_A^2)}$$

$$A_{26} = 0$$

-Valeurs des coefficients A_{mn} de f_3

$$A_{31} = \frac{R_A - R_A}{L_d} = 0$$

$$A_{32} = 0$$

$$A_{33} = - R_d / L_d$$

$$A_{34} = 0$$

$$A_{35} = 0$$

$$A_{36} = - 1 / L_d$$

⊕ Régime à 3 valves

Conditions d'amorçage des thyristors:

$$i_2 = I_d \quad i_1 < I_d \quad (\text{équations 1,3,4})$$

$$(1) \quad L_A f_1 + (L_A + L_B) f_2 + (L_d - L_A) f_3 = -R_A Y_1 - R_{AB} Y_2 + (R_A - R_d) Y_3 + E_1 - E_3$$

$$(3) \quad f_2 - f_3 = 0$$

$$(4) \quad L_{AC} f_1 + L_A f_2 - L_{AC} f_3 = -R_{AC} Y_1 - R_A Y_2 + R_{AC} Y_3 + E_1 + E_2$$

en formant le système matriciel on obtient:

$$\begin{bmatrix} L_A & L_{AB} & L_d - L_A \\ 0 & 1 & -1 \\ L_{AC} & L_A & -L_{AC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_A Y_1 - R_{AB} Y_2 + (R_A - R_d) Y_3 + E_1 - E_3 \\ 0 & 0 & 0 \\ -R_{AC} Y_1 - R_A Y_2 + R_{AC} Y_3 + E_1 + E_2 \end{bmatrix}$$

Le déterminant de la matrice |A| est :

$$\text{déterminant} = D_3 = L_A^2 - L_{AB} L_{AC} - L_{AC} L_d$$

$$|A|^{-1} = \frac{1}{D_3} \begin{bmatrix} L_A - L_{AC} & L_{AB} L_{AC} + L_A (L_d - L_A) & -L_{AB} (L_d - L_A) \\ -L_{AC} & -L_{AC} L_d & L_A \\ -L_{AC} & L_{AC} L_{AB} - L_A^2 & L_A \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = |A|^{-1} \begin{bmatrix} -R_A Y_1 - R_{AB} Y_2 + (R_A - R_d) Y_3 + E_1 - E_3 \\ 0 & 0 & 0 \\ -R_{AC} Y_1 - R_A Y_2 + R_{AC} Y_3 + E_1 + E_2 \end{bmatrix}$$

En développant nous trouvons une expression simple:

$$f_1 = A_{11} Y_1 + A_{12} Y_2 + A_{13} Y_3 + A_{14} E_4 + A_{15} E_2 + A_{16} E_3$$

$$f_2 = A_{21} Y_1 + A_{22} Y_2 + A_{23} Y_3 + A_{24} E_1 + A_{25} E_2 + A_{26} E_3$$

$$f_3 = A_{31} Y_1 + A_{32} Y_2 + A_{33} Y_3 + A_{34} E_4 + A_{35} E_2 + A_{36} E_3$$

Explicitons les valeurs des coefficients A_{mn}

⊕ Coefficients A_{mn} du régime 3 V

- Valeurs des coefficients def.

$$A_{11} = \frac{R_A L_{AC} - R_A L_A + R_{AC} L_{AB} + L_d R_{AC} - R_{AC} L_A}{D_3} = - \frac{R}{L}$$

$$A_{12} = \frac{R_{AB}L_{AC} + R_{AL_d} - R_{AL_A} + R_{AL_{AB}} - R_{AB}L_A}{D_3} = \frac{R(4N_{AB}N_{AC} - N_A^2 + N_{AL_d}')}{L(N_A^2 - N_{AC}N_{AB} - 2N_{AC}L_d')}$$

$$A_{13} = \frac{L_A R_A - R_A L_{AC} - R_d L_A + R_d L_{AC} - R_{AC} L_{AB} - R_{AC} L_d + R_{AC} L_A}{D_3} =$$

$$= \frac{R(N_A^2 - N_{AC}N_{AB} - 2N_{AC}L_d' + 2R_d' N_{AC} + R_d' N_A)}{D_3}$$

$$A_{14} = \frac{-L_{AB} - L_{AC} + 2L_A - L_d}{D_3} = \frac{-(2N_{BC} + L_d')}{L(N_A^2 - 4N_{AC}N_{AB} - 2N_{AC}L_d')}$$

$$A_{15} = \frac{-L_{AB} - L_d + L_A}{D_3} = \frac{-(N_B + L_d')}{L(N_A^2 - 4N_{AC}N_{AB} - 2N_{AC}L_d')}$$

$$A_{16} = \frac{-L_A + L_{AC}}{D_3} = \frac{N_C}{N_A^2 - 4N_{AC}N_{AB} - 2N_{AC}L_d'}$$

-Valeurs des coefficients de f₂

$$A_{21} = \frac{L_{AC}R_A - L_A R_{AC}}{D_3} = 0$$

$$A_{22} = \frac{L_{AC}R_{AB} - R_A L_A}{D_3} = \frac{R(4N_{AC}N_{AB} - N_A^2)}{L(N_A^2 - 4N_{AB}N_{AC} - 2N_{AC}L_d')}$$

$$A_{23} = \frac{L_A R_{AC} - R_A L_{AC} + R_d L_{AC}}{D_3} = \frac{R(2N_{AC}L_d')}{L(N_A^2 - 4N_{AB}N_{AC} - 2N_{AC}L_d')}$$

$$A_{24} = \frac{L_A - L_{AC}}{D_3} = \frac{N_C}{L(N_A^2 - 4N_{AC}N_{AB} - 2N_{AC}L_d')}$$

$$A_{25} = \frac{L_A}{D_3} = \frac{N_A}{L(N_A^2 - 4N_{AC}N_{AB} - 2N_{AC}L_d')}$$

$$A_{26} = \frac{L_{AC}}{D_3} = \frac{2N_{AC}}{L(N_A^2 - 4N_{AC}N_{AB} - 2N_{AC}L_d')}$$

Les coefficients de f₃ sont égaux à ceux de f₂ f₃=f₂

© Régime à 2 Voltes

Conditions d'amorçage des 3

$$i_2 = i_1 = I_d \quad (\text{équations})$$

- (1) $L_A f_1 + (L_A + L_B) f_2 + (L_d - L_A) f_3 = R_A I_d$
- (2) $f_1 - f_3 = 0$
- (3) $f_2 - f_3 = 0$

En formant le système matriciel on trouve :

$$\begin{bmatrix} L_A & L_{AB} & L_d - L_A \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_A I_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Le déterminant de la matrice $|A|$ est :

$$\det = D_2 = L_{AB} + L_d$$

$$|A|^{-1} = \frac{1}{D_2} \begin{bmatrix} 1 & L_{AB} + L_d & 0 \\ 1 & -L_A & 0 \\ 1 & -L_A & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = |A|^{-1} \begin{bmatrix} R_A I_d + R_{AB} I_d + (R_A - R_d) I_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

En développant nous trouvons une relation :

$$\begin{aligned} f_1 &= A_{11} Y_1 + A_{12} Y_2 + A_{13} Y_3 + A_{14} E_1 + A_{15} E_2 + A_{16} E_3 \\ f_2 &= A_{21} Y_1 + A_{22} Y_2 + A_{23} Y_3 + A_{24} E_1 + A_{25} E_2 + A_{26} E_3 \\ f_3 &= A_{31} Y_1 + A_{32} Y_2 + A_{33} Y_3 + A_{34} E_1 + A_{35} E_2 + A_{36} E_3 \end{aligned}$$

Explicitons les valeurs des coefficients :

© Coefficients A_{nm} du régime 2 V

- Valeurs des coefficients $f_1 = f_2 = f_3$

$$A_{11} = A_{21} = A_{31} = \frac{-R_A}{L_{AB} + L_d} = \frac{-R_A I_d}{L(2 H_{AB} + I_d)}$$

$$A_{12}=A_{22}=A_{32} = \frac{-R_{AB}}{L_{AB}+L_d} = \frac{-2 R N_{AB}}{L(2 N_{AB}+L_d)}$$

$$A_{13}=A_{23}=A_{33} = \frac{R_A - R_d}{L_{AB} + L_d} = \frac{R(N_A - R_d)}{L(2N_{AB} + L_d)}$$

$$A_{14}=A_{24}=A_{34} = \frac{1}{L_{AB} + L_d} = \frac{1}{L(2N_{AB} + L_d)}$$

$$A_{15}=A_{25}=A_{35} = 0$$

$$A_{16}=A_{26}=A_{36} = -\frac{1}{L_{AB} + L_d} = -\frac{1}{L(2N_{AB} + L_d)}$$

VII- ORGANIGRAMME GENERAL DE CALCUL

7.1. Procédé du choix des tensions et impédances

Les tensions E_{AB}, E_{BC}, E_{CA} entre phases sont posées pour former un système d'équations à partir duquel les dérivées f_1, f_2, f_3 sont obtenues. Ces tensions sont obtenues à partir des mailles du circuit et elles forment un ensemble matriciel de la forme :

$$[E] = [R][Y] + [L][f]$$

Si les tensions $[E]$ varient, en cas de changement de régime, il faudrait ajuster les éléments $[R]$ et $[L]$ de la matrice $[E]$ à chaque instant et en modifier les valeurs dans le système d'équation .

La méthode consiste à graduer le procédé d'obtention de la matrice $[E]$ en une rangée de nombre allant de 1 à 6 dite " Process Number " . Cet ajustement est achevé par l'insertion de l'équation $N=N - \frac{(N-1)}{6} \times 6$, ou le quotient de $(N-1)$ divisé par 6 indique qu'on prend la partie entière de la division (Exemple : $9/2=4$).

Les éléments à ajuster $[R]$ et $[L]$ forment les impédances de phases. Leurs variations sont introduites dans le procédé de calcul, par les paramètres relatifs à la nature du régime .

L'examen du tableau n°1 nous indique pour chaque étape du processus les valeurs des tensions entre phases.

Exemple : $E_{AB} = 2 E_{RS} \sin(G_1)$ ou G_1 argument de phase ici égal à $\omega t_n + \chi - \pi/3 + \psi_{BC} - \psi_{CA}$

t_n est le temps à partir duquel le nième process commence

Cette méthode de selection des tensions et impédances permet de résoudre les équations des circuits en un même temps dont la fréquence angulaire, l'angle de retard χ_r et de déphasage ψ dû au court-circuit sont liés à chaque étape du processus de calcul.

7.2. Choix de l'état du convertisseur (méthode de sélection des équations appropriées aux régimes

Il y a 5 équations représentant le système , sélectionnées dépendamment des rapports entre les courants de commutation i_1, i_2 et du courant redressé I_d .

Des critères appropriés en courant, permettent le choix de l'état du convertisseur sous trois formes de régimes possibles : Régime à 4 Thyristors (R 4 V) , régime à 3 thyristors (R 3 V) , régime à 2 thyristors (R 2 V).

Les équations valables sont introduites dans le système matriciel $|A| |f| = |B|$ ou la matrice $|A|$ contient toutes les constantes paramétriques tandis que $|B|$ dépend des inconnues (Y_1, Y_2, Y_3) et des tensions entre phases. L'inversion matricielle $|B| = |A| \cdot |f|$ est résolue manuellement $|f| = |A|^{-1} |B|$, ceci afin de réduire le temps de calcul.

Théoriquement l'exécution de l'inversion matricielle peut se faire par insertion d'un sous programme. (sous routine)

7.3. Contrôle et fixation de l'angle α retard

Le contrôle et la fixation de l'angle de retard se font en fonction des conditions d'allumage des valves et des tensions aux bornes des thyristors .

7.4. Resolution du système d'équations.

La résolution du système d'équations différentielles est faite par la méthode dite de " RANGE KUTTA " (C.f. Bibliographie n°4 & 5 , Annexe).

La méthode de RANGE KUTTA est un programme dans lequel l'integration de l'ensemble des équations différentielles du 1° ordre est calculée du temps $t=0$ à $t+h$, ou h represente un pas de calcul .

L'avantage de cette méthode réside dans le fait que l'erreur peut être divisée pendant le calcul dans le but de donner des solutions avec précision prévue par intervalle de temps (par approximation).

Les équations différentielles du I^o ordre pour être résolues doivent être posées sous la forme :

$$\begin{aligned} d i_1/dt &= f_1 & d i_2/dt &= f_2 & d I_d/dt &= f_3 \\ i_1 &= Y_1 & i_2 &= Y_2 & I_d &= Y_3 \end{aligned}$$

Dans ce cas Y_1, Y_2, Y_3 sont des inconnues; f_1, f_2, f_3 sont les dérivées par rapport aux inconnues. Dans le procédé de calcul, le commencement de la commutation des inconnues et des paramètres est initialisé à l'origine du temps $t=0$.

Le calcul des coefficients de RANGE KUTTA est établi systématiquement jusqu'au temps d'amorçage $t_{am} = t$ auquel est adjoint le bloc de fixation de l'angle de retard.

7.5. Changement de régime

Les équations sont résolues de $t=0$ à t_{cc1} (t_{cc1} temps de court circuit : t_{cc1} = début du court-circuit t_{cc2} fin du court-circuit) et l'insertion des paramètres relatifs au changement de régime s'effectue instantanément jusqu'au temps t_{cc2} .

7.6. Rétablissement du régime normal

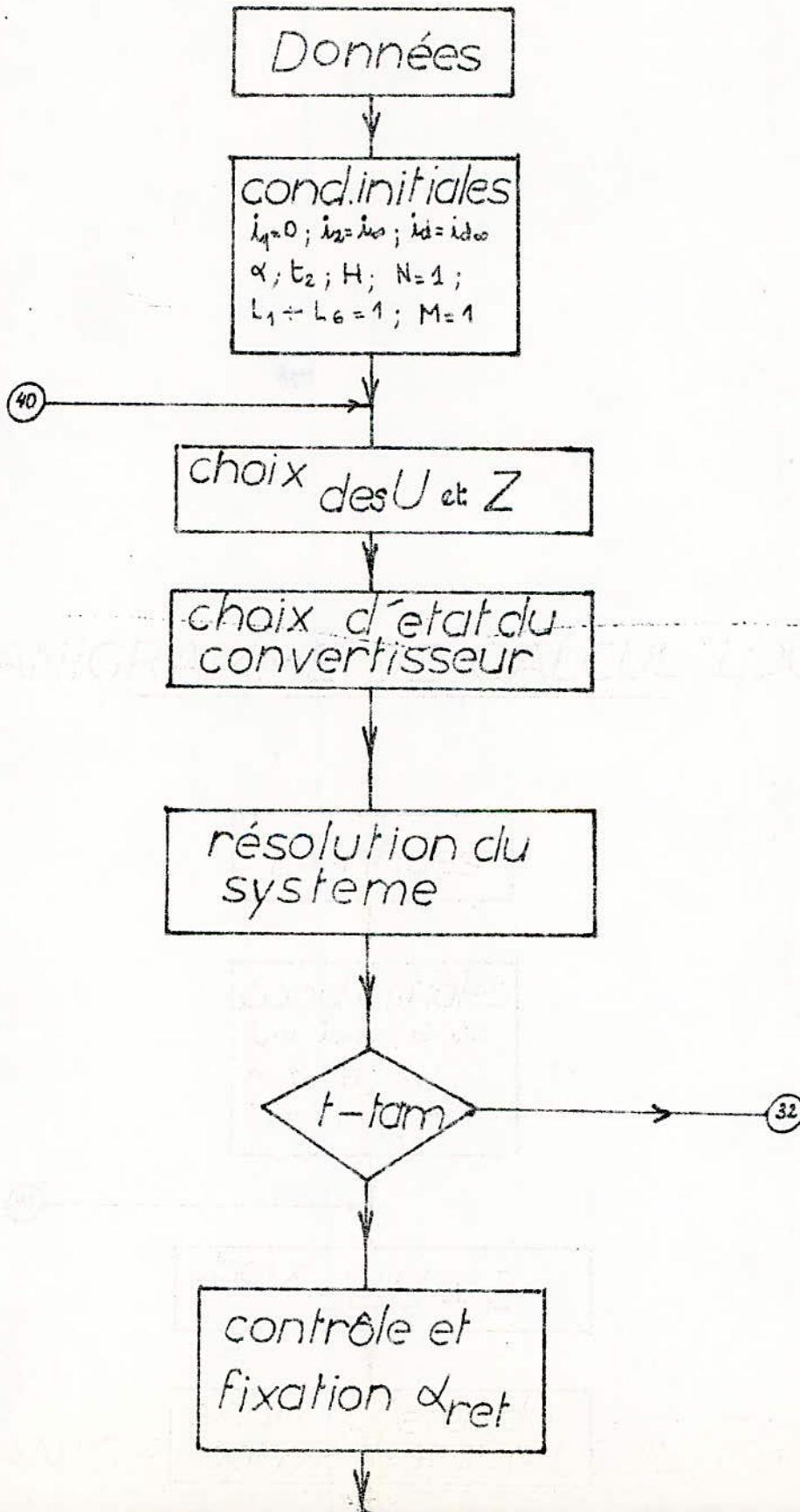
Le rétablissement du régime normal, après le régime de dissymétrie, s'enclenche sans coupure de calcul et les courants croissent ou décroissent pour atteindre le régime de fonctionnement normal ou permanent.

7.7. Détection de la fin du process

La détection de fin de process peut être faite au temps où la méthode de RANGE KUTTA donne des résultats et en pratique le fin du processus peut arriver à n'importe quel instant dans l'intervalle désiré h (h peut être de l'ordre de 1 ms).

Dans notre étude le temps de calcul est d'environ 5 min pour une période de fréquence 50 HZ, fixé à l'avance dans les conditions initiales.

ORGANIGRAMME DE CALCUL "LOGIQUE"



$N = N + 1 ; N = N - (N - 1) / 6 \geq 6$
 $TRAD = TRAD - 1.047 + 2FCC2 + FCC3$

32

sortie
 $t, TD; i_1; i_2; i_3; i_N, i_{t2}$
 $i_{t3}; i_{t4}; i_{t5}; i_{t6}; U_d$

tcc1

changement de régime

tcc2

rétablissement du régime normal

tlim

40

END

Organigramme de calcul détaillé

$R; L; R_d; L_d; t_1; t_2$
 $T_{cc1}; T_{cc2}; H; \alpha$
 $U_5; E_d; \omega$
 $\rho; \nu; \varepsilon$

bloc des données

$i_1 = 0; i_2 = i_{00}; i_d = i_{d0}$
 $\alpha; t_2; H; N = 1$
 $L_1 \hat{=} L_6 = 1; M = 1$

bloc des conditions initiales

GoTo (11,12,13,11,12,13),N

bloc choix des "U et Z"

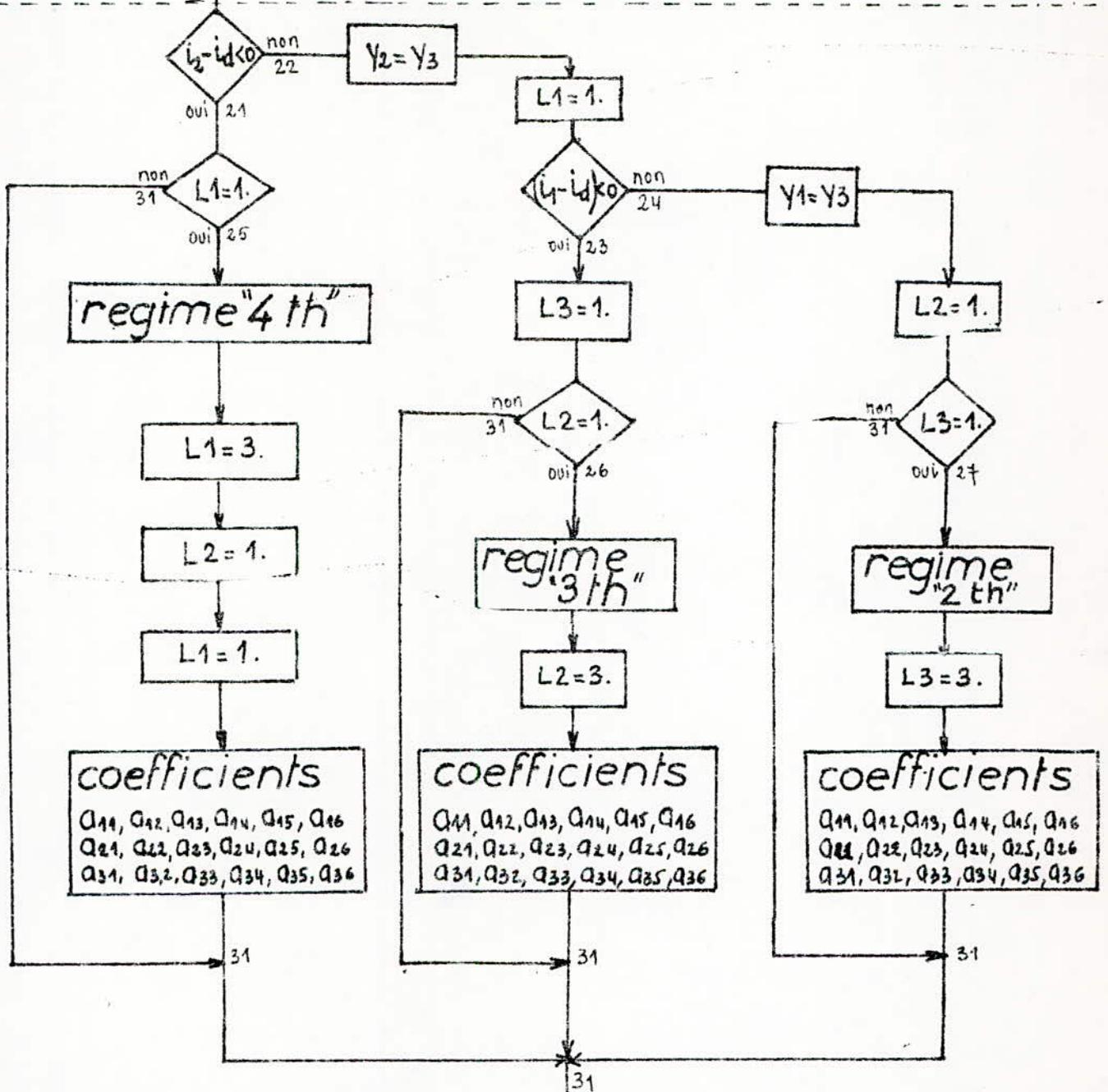
Interval 1 et 4
 $N_{AB}; N_{CA}; N_{BC}$
 $EM_1 = U_5 \cdot N_{AB}$
 $EM_2 = U_5 \cdot N_{BC}$
 ψ_{AB}
 ψ_{BC}

Interval 2 et 5
 $N_{CA}; N_{BC}; N_{AB}$
 $EM_1 = U_5 \cdot N_{CA}$
 $EM_2 = U_5 \cdot N_{AB}$
 ψ_{CA}
 ψ_{AB}

Interval 3 et 6
 $N_{BC}; N_{AB}; N_{CA}$
 $EM_1 = U_5 \cdot N_{BC}$
 $EM_2 = U_5 \cdot N_{CA}$
 ψ_{BC}
 ψ_{CA}

$N_A = N_{AB} + N_{CA} - N_{BC}$
 $N_B = N_{AB} + N_{BC} - N_{CA}$
 $N_C = N_{BC} + N_{CA} - N_{AB}$

bloc "choix de l'état du convertisseur"

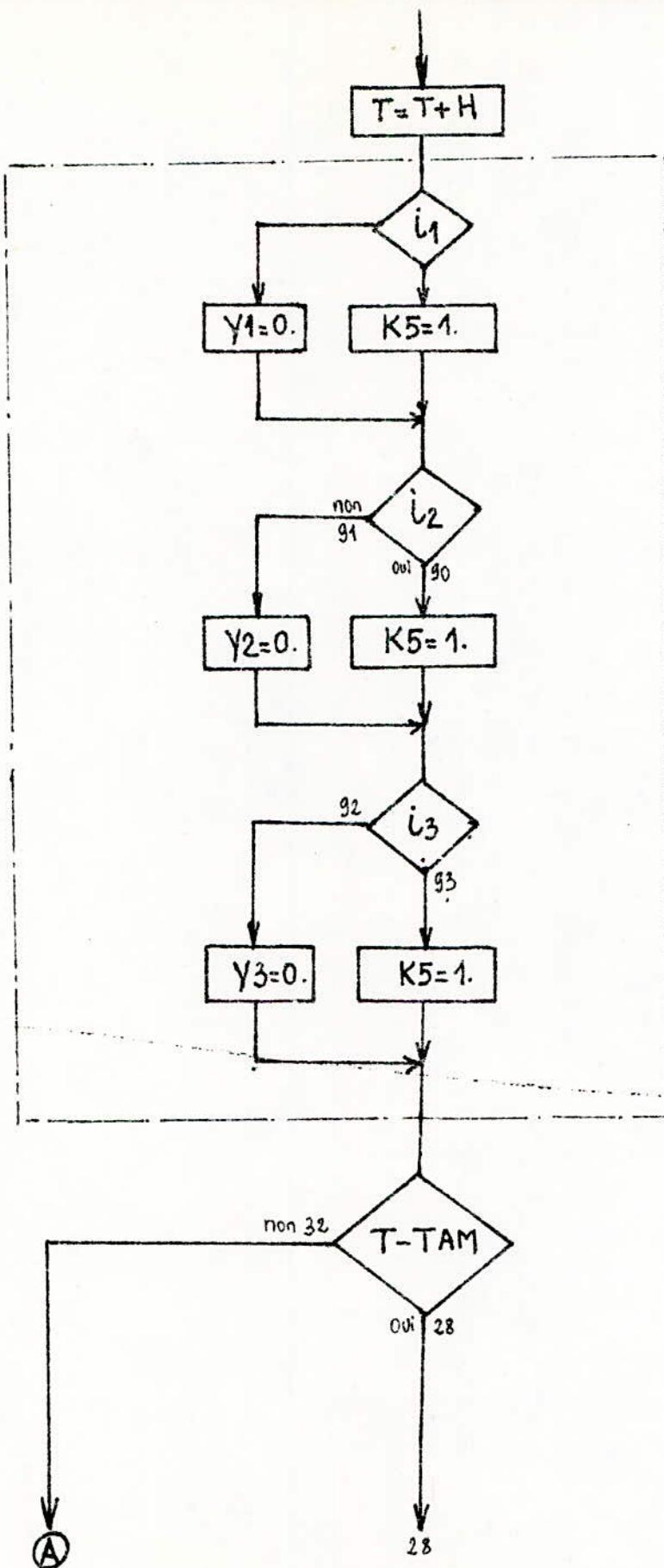


résolution

"RANGE KUTTA"

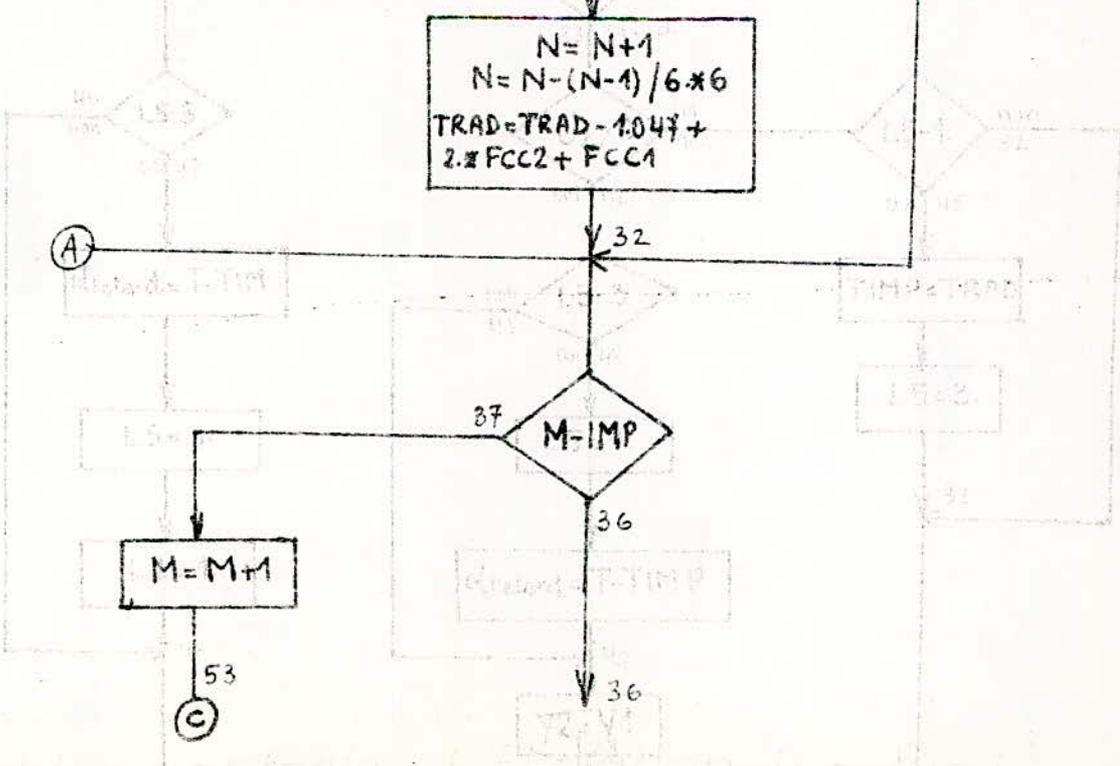
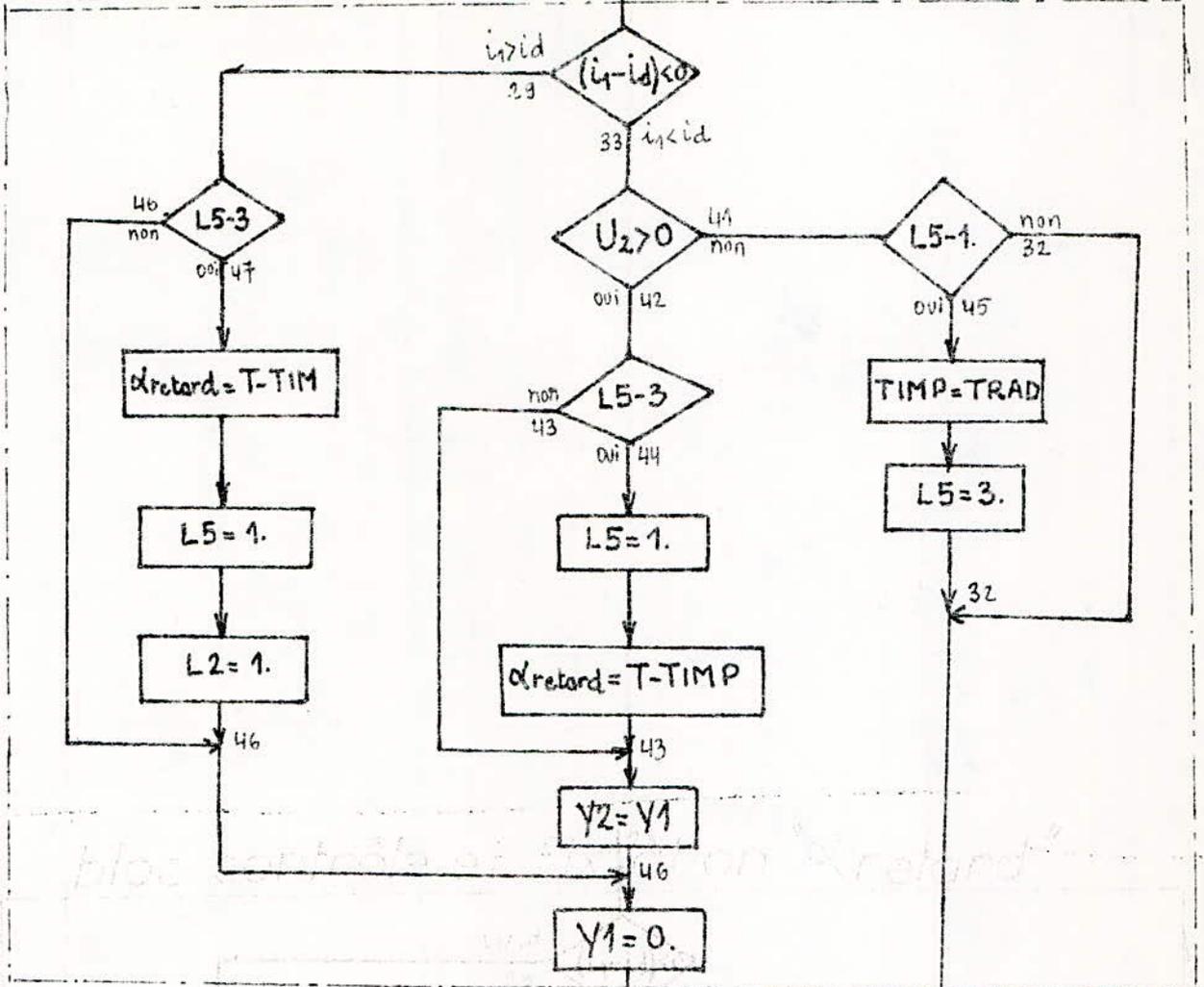
calcul des
coefficients de
"RANGE KUTTA"

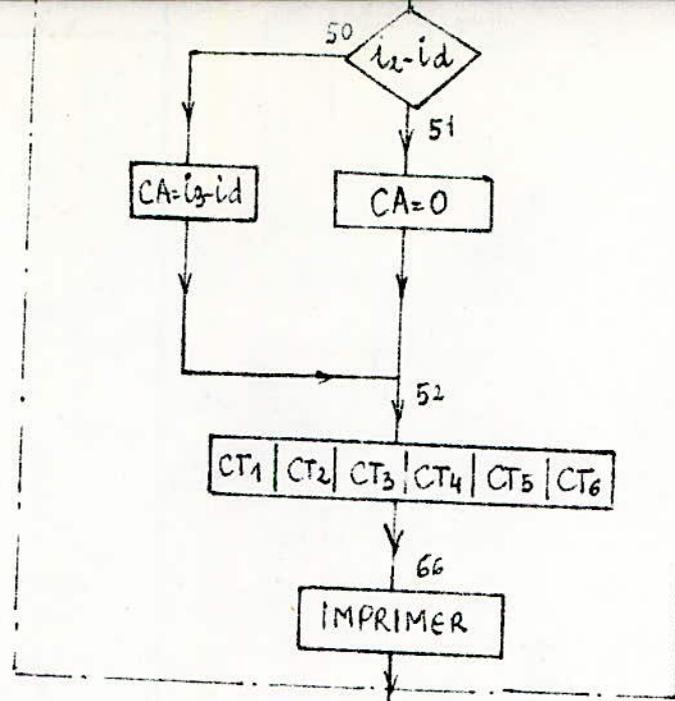
résolution du
"systeme"



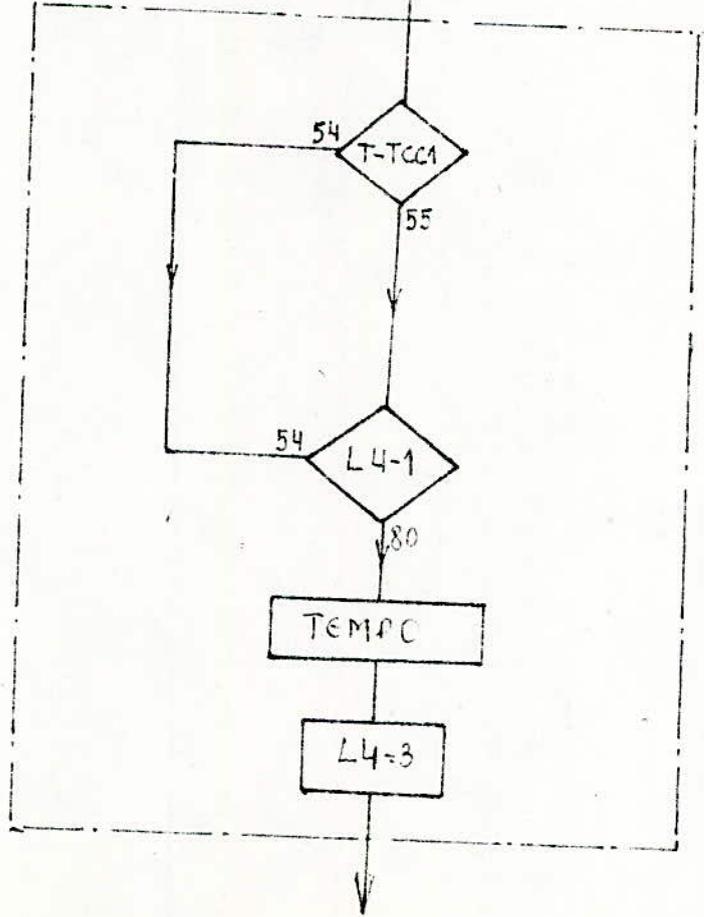
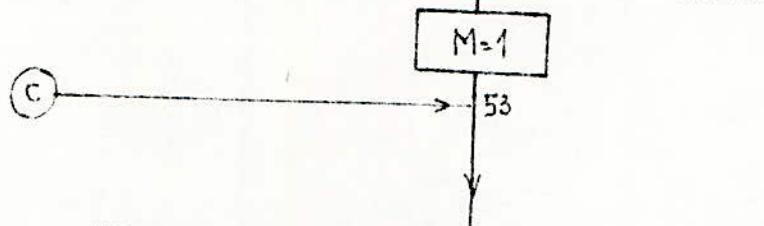
*bloc controle
des valeurs des
courants*

bloc contrôle et fixation "α retard" ²⁸



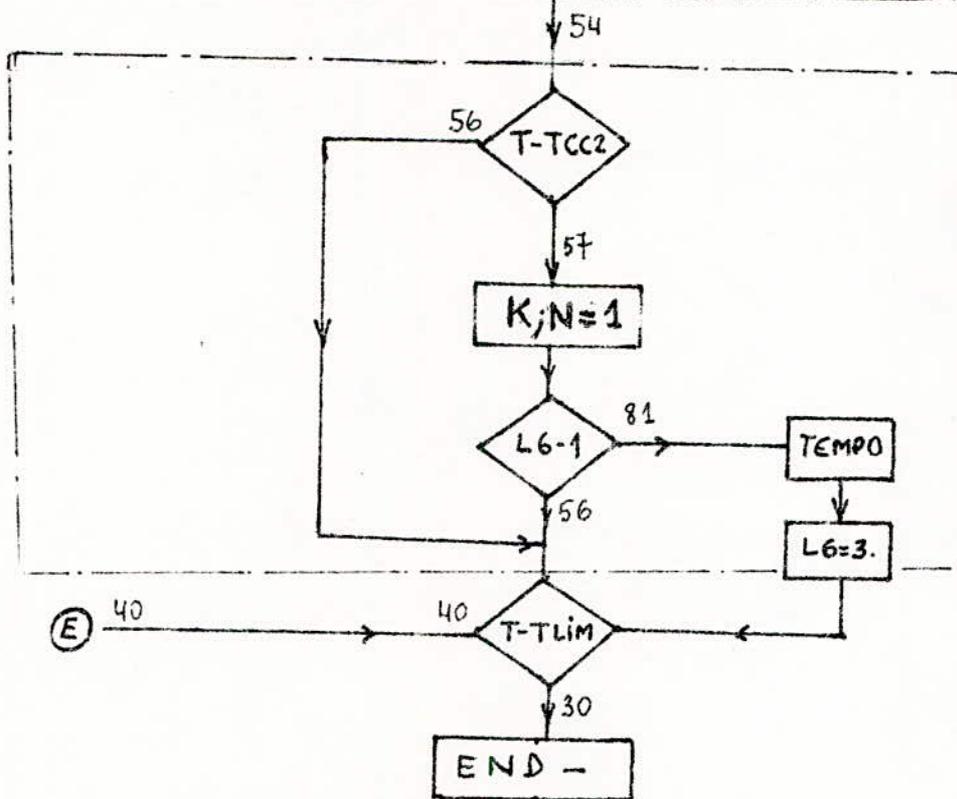
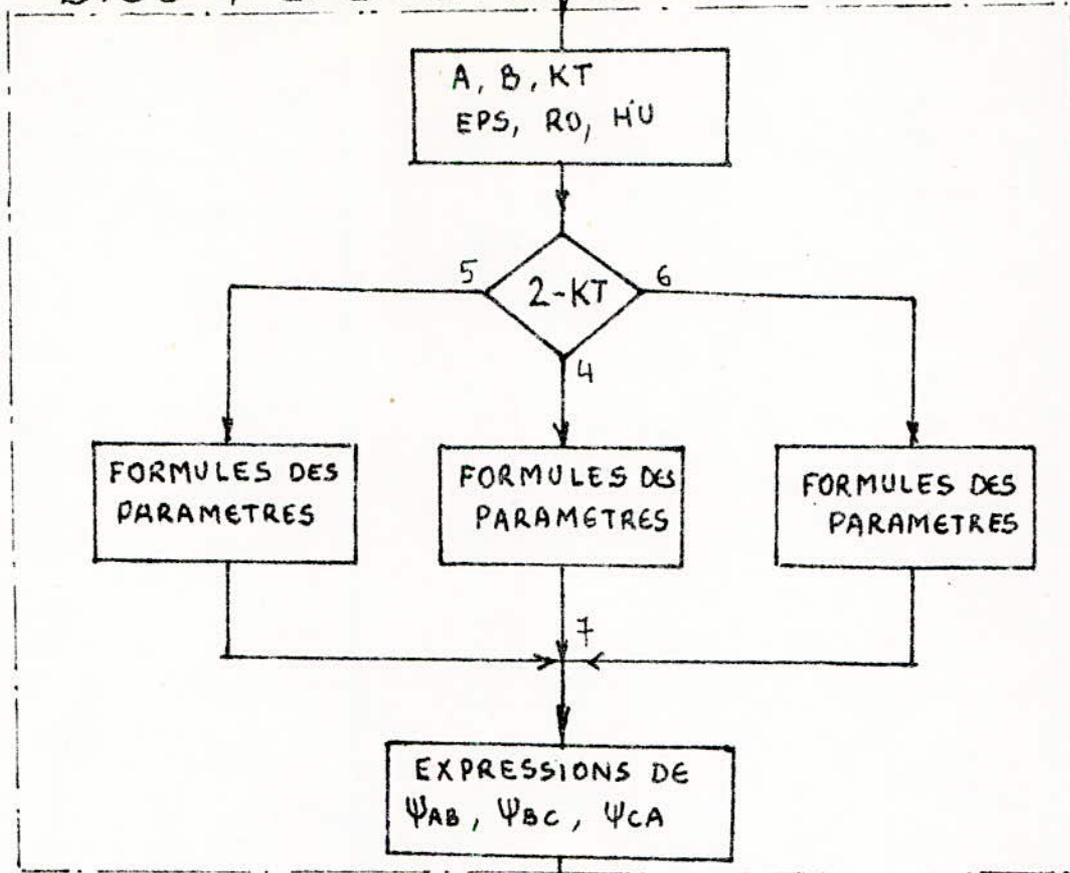


bloc sortie
temps
courants
tensions



bloc de
changement
de régime

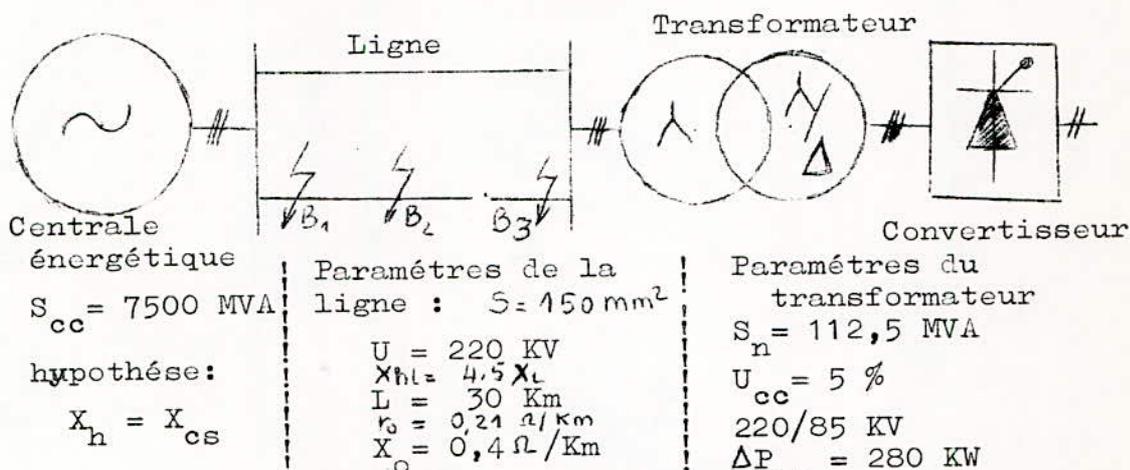
bloc Paramètres de commutation



bloc
retablisement
du régime
normal

VIII- EXEMPLE D'APPLICATION : Schema d'installation et Généralisation des calculs .

8.1. Schéma de l'installation



On choisit une ligne à 2 ternes pour augmenter la fiabilité du réseau en diminuant la probabilité d'interruption de service .

8.2. Réactances des éléments du réseau et schema resultant .

⊕ Paramètres de la centrale:

$$X_{cs} = \frac{U_n^2}{S_{cc}} = \frac{(220)^2 \times 10^6}{7500 \times 10^6} = 6,4 \Omega \quad R_{cs} \cong 0$$

$$X_{cs} = X_{hs} = 6,4 \Omega$$

⊕ Paramètres de la ligne /terne :

$$X_L = 0,4 / \text{Km} \times 30 = 12 \Omega$$

$$R_L = 0,21 / \text{Km} \times 30 = 6,3 \Omega$$

$$X_{hL} = m X_L$$

$X_L = 12 \Omega$	$R_L = 6,3 \Omega$	$X_{hL} = m X_L$
-------------------	--------------------	------------------

⊗ Paramètres du transformateur :

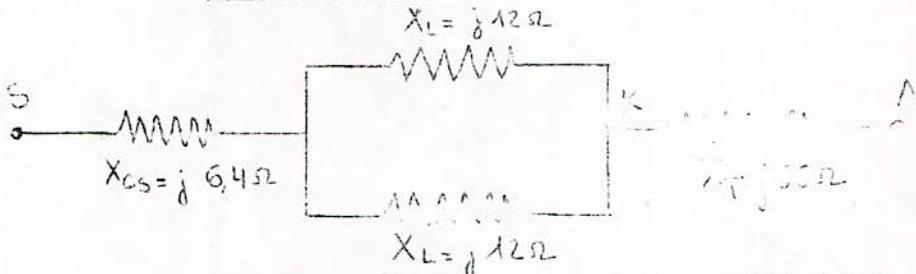
$$R_T = \frac{10^3 P_{cc} U_n^2 (V)}{S_n^2 (KVA)} = \frac{10^3 \times 200 (220)^2}{(112,5 \times 10^3)^2} = 1$$

$$X_T = \frac{10 \times U_{cc} \% U_n^2 (V)}{S_n (KVA)} = \frac{10 \times 15 \times (220)^2}{112,5 \times 10^3} = 65$$

à remarquer que R_T est largement inférieur à X_T

$X_T = 65$	$X_{Tn} = P X_T$
------------	------------------

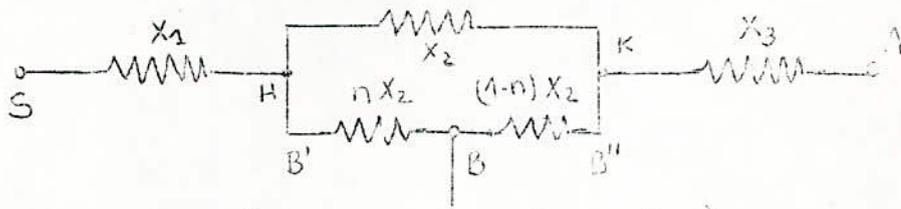
⊗ Schéma équivalent du réseau



Dans ce schéma on omet les résistances des deux termes de la ligne pour ne considérer que les réactances

Comme ça été dit au chapitre III, l'avarie peut avoir lieu en n'importe quel point du trajet séparant S de A. Pour localiser le point dont il est question on introduit un coefficient n de 0 à 1 dit coefficient de distance. A chaque valeur de " n " correspond une position du point B de court-circuit.

⊗ Schéma équivalent généralisé

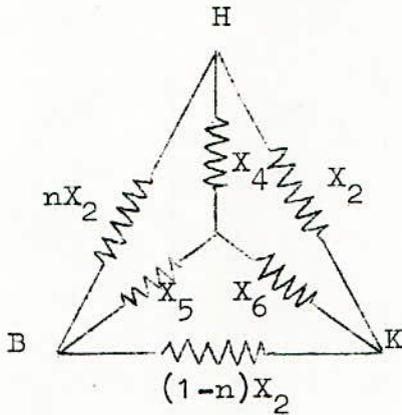


$n=1$ B en B"
 $n=0,5$ B en B
 $n=0$ B en B'

$X_{cs} = X_1$
 $X_L = X_2$
 $X_T = X_3$

8.3. Détermination de X_{Ad} , X_{Bd} , X_{ABd} .

Transformation du triangle BHK en étoile X_4, X_5, X_6 .

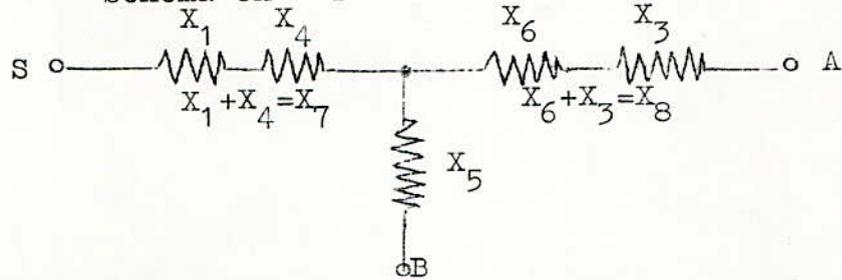


$$X_4 = \frac{n X_2 X_2}{nX_2 + X_2 + (1-n)X_2} = \frac{n X_2}{2}$$

$$X_5 = \frac{n X_2 (1-n) X_2}{nX_2 + X_2 + (1-n)X_2} = \frac{n(1-n)X_2}{2}$$

$$X_6 = \frac{X_2 (1-n) X_2}{nX_2 + X_2 + (1-n)X_2} = \frac{(1-n) X_2}{2}$$

Schéma en " T " déduit :



En appliquant les définitions se rapportant aux impédances vues d'un point A, B des deux points A et B, il ne reste qu'à identifier pour calculer X_{Ad} , X_{Bd} , ou X_{ABd} .

⊕ $X_{Ad} = X_7 + X_8 = X_1 + X_4 + X_6 + X_3 = X_1 + X_3 + nX_2/2 + (1-n)X_2/2 = X_1 + X_3 + X_2/2$

$$X_{Ad} = X_1 + X_3 + X_2/2$$

⊕ $X_{Bd} = X_7 + X_5 = X_1 + X_4 + X_5 = X_1 + nX_2/2 + n(1-n)X_2/2 = X_1 + (2n-n^2)X_2/2$

$$X_{Bd} = X_1 + \frac{(2n-n^2)X_2}{2}$$

⊕ $X_{ABd} = X_7 = X_1 + X_4 = X_1 + nX_2/2$

$$X_{ABd} = X_1 + n X_2 / 2$$

8.4. Détermination de la réactance homopolaire

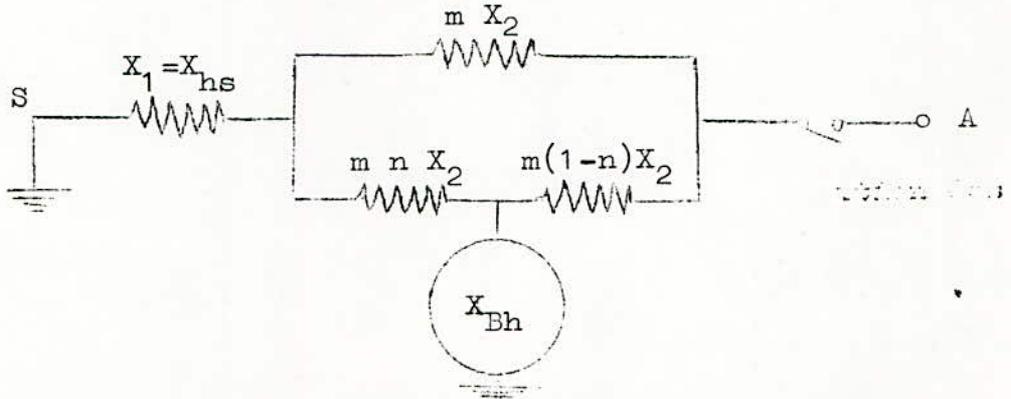
X_{Bh} vue du point B .

Cette réactance est fonction du mode de couplage du transformateur et de l'état de son neutre ,c'est pourquoi on distingue deux cas :

1° CAS: Circuit primaire du transformateur en étoile avec neutre isolé.

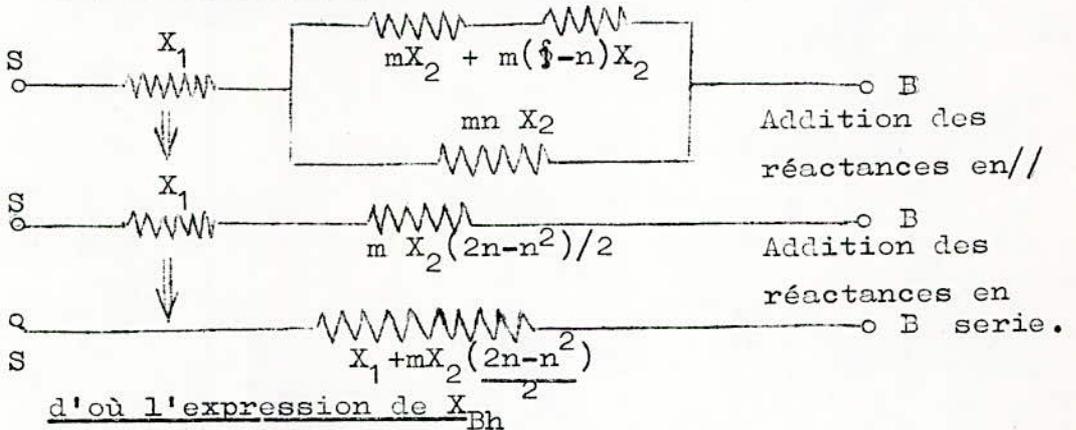
La réaction homopolaire du système étant définie par les réactances homopolaires des éléments composant ce dernier,il en résulte le schéma équivalent suivant:

neutre isolé : $X_{Th} = P X_T = 0$



Le point A étant complètement isolé X_{Bh} correspond à la réactance totale . séparant S de B

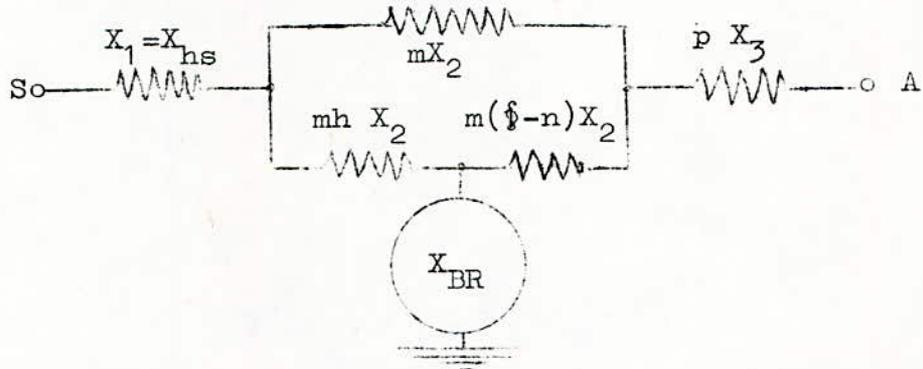
⊕ Transfiguration du schéma ci-dessus :



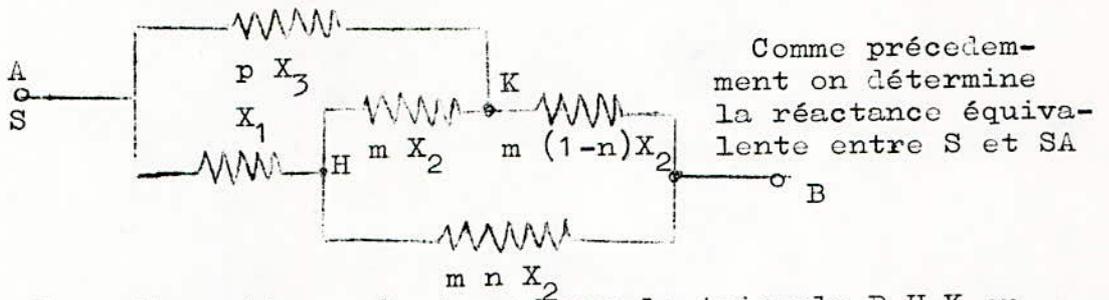
$$X_{Bh} = X_1 + m X_2 \frac{(2n-n^2)}{2}$$

2° CAS : Circuit primaire du transformateur en Etoile avec neutre relié à la terre .

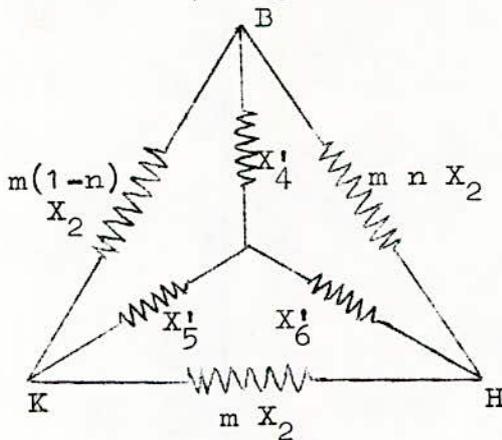
-Schéma équivalent du circuit



La liaison commune entre S et A étant la terre , on joint les deux points .



Transfiguration : On transforme le triangle B H K en Etoile X'_4 , X'_5 , X'_6 correspondante .

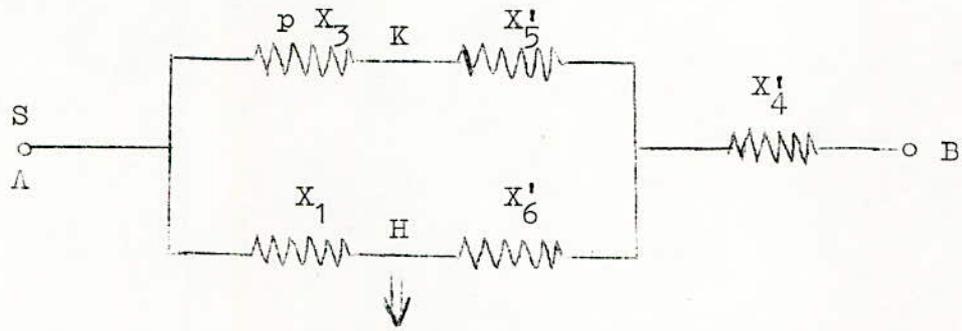


$$X'_4 = \frac{m^2 n (1-n) X_2^2}{2 m X_2} = \frac{m n (1-n) X_2}{2}$$

$$X'_5 = \frac{m^2 (1-n) X_2^2}{2 m X_2} = \frac{m (1-n) X_2}{2}$$

$$X'_6 = \frac{m^2 n X_2^2}{2 m X_2} = \frac{m n X_2}{2}$$

- Introduction de l'étoile B K H :



$$X_5' + p X_3 = \frac{m(1-n)e X_2}{2} + p X_3 \quad X_6' + X_1 = m n X_2 / 2 + X_1$$

$$X_e = \frac{(X_5' + pX_3)(X_6' + X_1)}{X_5' + pX_3 + X_6' + X_1} = \frac{(m(1-n)X_2 + 2pX_3)(mnX_2 + 2X_1)}{2(m(1-n)X_2 + 2pX_3 + mnX_2 + 2X_1)}$$

$$2(m^2n - m^2n^2)X_2^2 + (2m - 2mn^2)X_1X_2 + (4mnpX_2X_3 +$$

$$X_e + X_4' = X_{Bh} = \frac{2(mX_2 + 2pX_3 + 2X_1)}{2(mX_2 + 2pX_3 + 2X_1) + \frac{4pX_1X_3 - 2mn^2pX_2X_3}{2(mX_2 + 2pX_3 + 2X_1)}}$$

$$X_{Bh} = \frac{(m^2n - m^2n^2)X_2^2 + (m - mn^2)X_1X_2 + (2mnp - mn^2p)X_2X_3 + 2pX_1X_3}{mX_2 + 2pX_3 + 2X_1}$$

8.5. Application numérique:

On considère le cas particulier où le court-circuit se produit à 15 Km de la source c'est à dire " n=0,5 " et le cas où le transformateur couplé en "Etoile" en son primaire a son neutre relié à la terre (cas le plus répandu) , avec des hypothèses supplémentaires m=4,5 p=0,8

Les valeurs de $\varepsilon, \rho, \gamma$, obtenues dans cet exemple sont introduites dans l'organigramme général régissant tout le fonctionnement du pont .

Ainsi toutes les courbes obtenues en régime de fonctionnement anormal sont relatives à cet exemple réel considéré.

	$n=0,5$ $X_1=6,4$	$m=4,5$ $X_2=12$	$p=0,8$ $X_3=65$			
	$X_{Ad}=X_1+X_3+X_2/2$			$X_{Ad}=77,40$		
	$X_{Bd}=X_1+(2n-n^2)X_2/2$			$X_{Bd}=10,90$		
	$X_{ABd}=X_1+nX_2/2$			$X_{ABd}=9,40$		
	$X_{Bh}=f(X_1, X_2, X_3, m, n, p)$			$X_{Bh}=18,80$		
	$\rho = X_{ABd}/X_{Ad}$			$\rho = 0,86$		
	$\psi = X_{ABd}/X_{Ad}$			$\psi = 0,012$		
	$\varepsilon = X_{Bh}/X_{Bd}$			$\varepsilon = 1,88$		
CC Coef	CC Monoph.	CC Biphassé	CC Biph/T	CC Mono	CC Bipha.	CC Biph/ T
K_{AB}	0,69	0.86	0.71	0.90	0.51	0.42
K_{BC}	1	0.14	0.14	0.90	0.51	0.42
K_{CA}	0.69	0.86	0.71	0.55	1	0.81
N_{AB}	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
N_{BC}	1	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99
N_{CA}	0.99	0.99	0.99	0.99	1	0.99
Ψ_{AB}	16	-25,3	-24,3	12,1	-46,3	-43,5
Ψ_{BC}	0	0	0	-12,1	46,3	43,5
Ψ_{CA}	-16	25,3	24,3	0	0	0
	Couplage transfo λ/λ			Couplage transfo λ/Δ		

IX-ANALYSE DES RESULTATS

L'observation des tableaux des coefficients $K_{mn}, N_{mn}, \Psi_{mn}$, fait ressortir certaines constatations remarquables .

C'est ainsi que les court-circuits considérés ne touchant qu'une phase ou deux, permettent de subdiviser l'ensemble des coefficients se rapportant à un couplage donné (Etoile-Etoile ou Etoile-Triangle) en deux groupes et ce grâce aux similitudes relevées.

Couplage du transfo. en λ/λ

$K_{AB}=K_{CA}$	K_{BC}
$N_{AB}=N_{CA}$	N_{BC}
$\Psi_{AB}=-\Psi_{CA}$	$\Psi_{BC}=0$

Couplage Trans. λ/Δ

$K_{AB}=K_{BC}$	K_{CA}
$N_{AB}=N_{BC}$	N_{CA}
$\Psi_{AB}=-\Psi_{BC}$	$\Psi_{CA}=0$

ρ, ν, ε calculés en fonction des réactances caractérisant l'état de la ligne à la suite de la dissymétrie et du lieu de cette dernière , nous ont permis de tracer les diagrammes ou planches donnés aux pages Vis 83/84/85/86/87/88/89 . Ces courbes illustrent les variations de $K_{mn}, N_{mn}, \Psi_{mn}$ facilitent ainsi leur détermination pour une éventuelle intégration dans le système d'équation généralisées. Lesquelles équations généralisées définissant tout régime de fonctionnement, sont utilisées pour l'exploitation de cette étude à l'aide d'une simulation mathématique d'un système énergétique alternatif/continu.

Pour l'exemple particulier, mais courant retenu: ligne à deux ternes, longueur de 30 Km et dont le point de court-circuit se situe à 15 Km ($n=0,5$), les résultats obtenus sont présentés sur les planches. Les paramètres de commutation $U_{AE}, U_{BC}, U_{CA}; X_{AB}, X_{BC}, X_{CA}$ les courants à travers les thyristors i_{th} , la tension redressée U_d et le courant redressé I_d , dont on peut suivre l'évolution dans le temps en fonction de l'état de fonctionnement du convertisseur ont été déterminés à partir des données d'entrée suivantes :

R=RES=0.2	US=U _S =110 KV
L=SELF =0.056	ECD=Ed=80 Kv
Rd=RES D= 5	W= =314
Ld=SELFD=0.75	K _{AB} =DEAB=1
t ₁ =TEMPO=0.00	K _{BC} =DEBC=1
t _{cc1} =TCC1=0.02	K _{CA} =DECA=1
h=H =0.000111	ψ _{AB} = DEAB=0
α=ALFA= 15°	ψ _{BC} = DEBC=0
t _{cc2} =TCC2=0.06	ψ _{CA} = DECA=0
t ₂ =TLIM=0.1	N _{AB} =ANAB=1
	N _{BC} =ANBC=1
	N _{CA} =ANCA=1

Sur l'intervalle de temps considéré ,l'introduction de la dissymétrie est faite à Tcc₁=0.02 sec et se prolonge jusqu'à Tcc₂=0.06 secondes .

De T₀ = 0 s à Tcc₁=0.02 S : Regime normal

Tcc₁=0.02 à Tcc₂=0.06 s : Régime anormal (dissymé)

Tcc₂=0.06 s à T_∞ : Rétablissement reg.normal

Ainsi les courbes i_{th}=f(t) ; Ud=f(t) ; Id=f(t) ; les diagrammes des réactances et les étoiles de tensions reflètent le comportement du système .

-COURT-CIRCUIT MONOPHASE COUPLAGE TRANSFO ETOILE-ETOILE

Pour ce cas d'anomalie l'influence de la non-symétrie sur les paramètres U_{BC} et X_{BC} est nulle ,
 $K_{BC}=N_{BC}=1$, $\psi_{BC}=0$.
Par contre les variations dues à $K_{AB}=K_{CA}$ et à $\psi_{AB}=-\psi_{CA}$
sont assez apparentes contrairement à $X_{AB}=X_{CA}$ qui diminue
ent très légèrement .

Pendant le court-circuit les thyristors continuent de fonctionner en respectant l'ordre de commutation, quoique la durée de conduction a tendance à diminuer .

La diminution des valeurs moyennes des courants à travers les thyristors donc du courant redressé débité est de l'ordre de 70 % .

La tension redressée U_d contient l'harmonique $2f$ ($f=50\text{Hz}$) ceci à cause de la perturbation qui se produit au niveau de l'étoile de tension qui se rapproche plus d'une tension monophasée que triphasée.

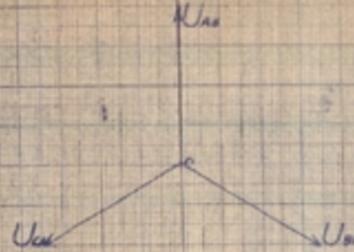
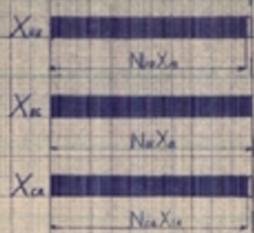
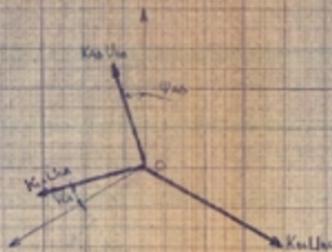
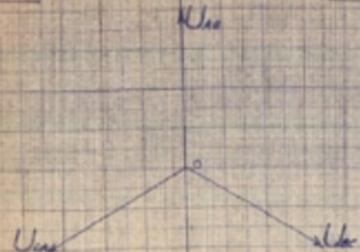
Le rétablissement du régime normal pour U_d se fait simultanément avec la fin de la dissymétrie ce ~~xxx~~ qui n'est pas le cas pour I_d pour lequel ce même rétablissement se fait progressivement à cause de l'inductance considérable L_d du circuit externe .

COUPLAGE DU TRANSFO Δ/Δ

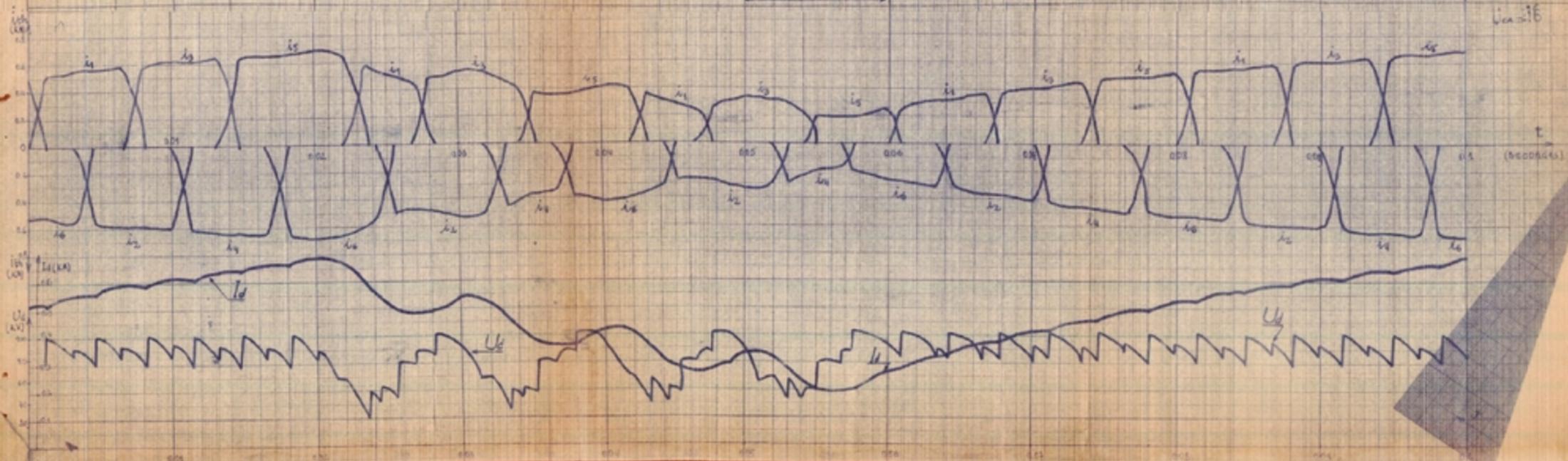
REGIME NORMAL

REGIME DE COURT-CIRCUIT MONOPHASE

RETABLISSEMENT DU REGIME NORMAL



- $K_{a1} = 0.69$
- $K_{a2} = 1$
- $K_{a3} = 0.69$
- $n = -0.50$
- $N_{a1} = 0.99$
- $N_{a2} = 1$
- $N_{a3} = 0.99$
- $U_{a1} = 16$
- $U_{a2} = 0$
- $U_{a3} = 16$



-COURT-CIRCUIT MONOPHASE COUPLAGE TRIANGLE-TOURNE-TRIANGLE

Les trois phases sont atteintes par l'avarie due à ce genre de court-circuit.

Dans ce cas les conséquences sont plus graves que dans le précédent: Id diminue jusqu'à 0,16 KA. contre 0,2KA (Etoile-Etoile).

Le rétablissement du régime normal a lieu de la même façon que sur la planche Etoile-Etoile précédente.

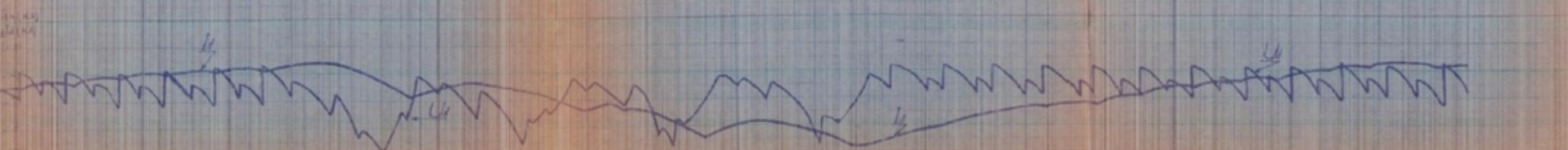
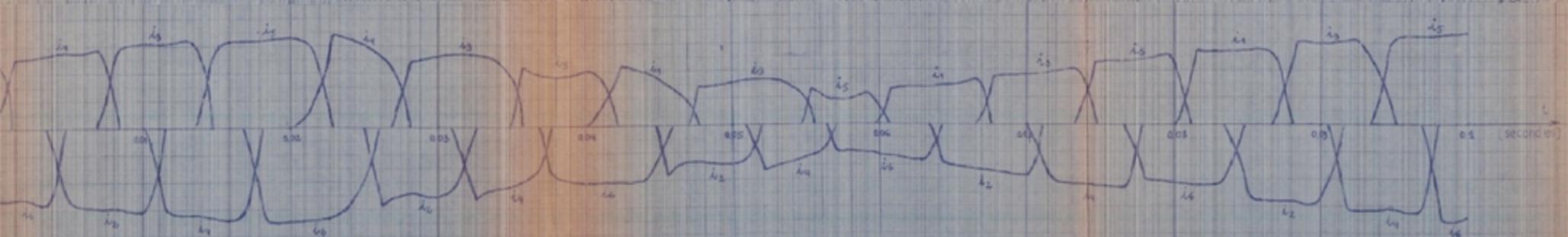
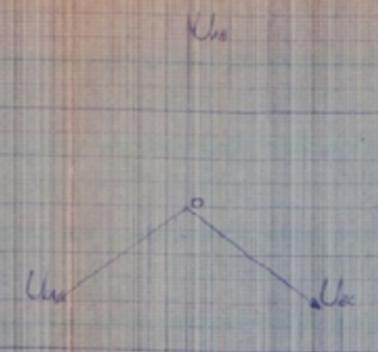
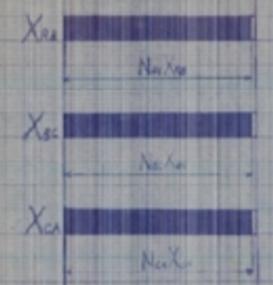
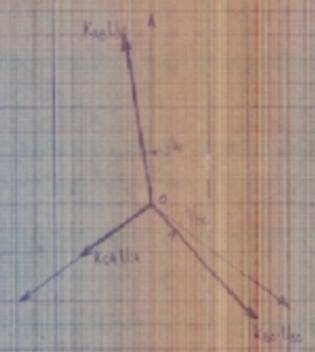
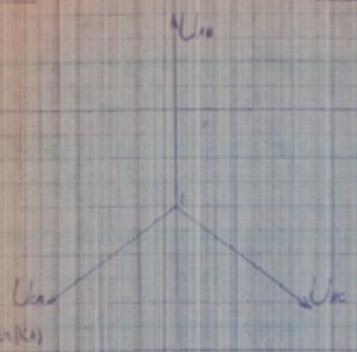
COUPLAGE DU TRANSFO Δ/Δ

REGIME NORMAL

REGIME DE COURT CIRCUIT MONOPHASE

RETABLISSEMENT DU REGIME NORMAL

- $K_{sc} = 0.90$
- $K_{sc} = 0.90$
- $K_{sc} = 0.55$
- $\Pi = 0.56$
- $N_{sc} = 0.99$
- $N_{sc} = 0.99$
- $N_{sc} = 0.99$
- $U_{sc} = 121$
- $U_{sc} = 121$
- $U_{sc} = 121$



-COURT-CIRCUIT BIPHASE COUPLAGE TRANSFOR: ETOILE-ETOILE .

C'est l'un des court-circuits les plus dangereux où une composante de tension atteint sa plus petite valeur $K_{BC}=0.14$. Pendant l'avarie le courant redressé s'annule complètement par intermittence tandis que la tension redressée U_d représente presque une sinusoïde pure .

On constate aussi que U_d passe par une valeur négative à $t=0,026$ s ceci s'explique par la prolongation de commutation entre th_6 et th_2 . Avant le déséquilibre le régime de conduction était de 2-3 Valves et pendant la durée de court-circuit le pont entre dans les régimes 3-3 valves et même 3-4 Valves ($t=0.026$ s ; $t_1=0.037$ s) .

Le rétablissement du régime normal se fait comme pour les court-circuits monophasés .

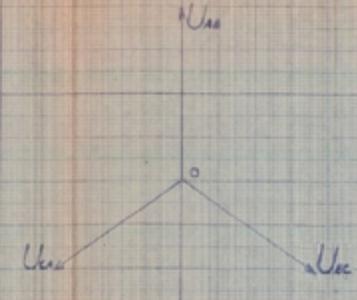
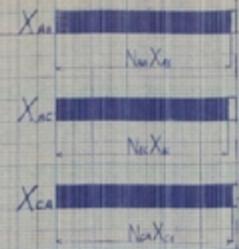
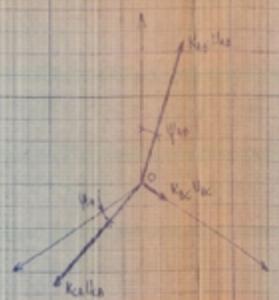
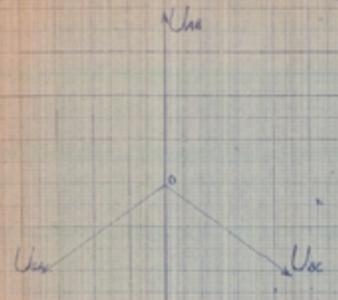
COUPLAGE DU TRANSFO M1

REGIME NORMAL

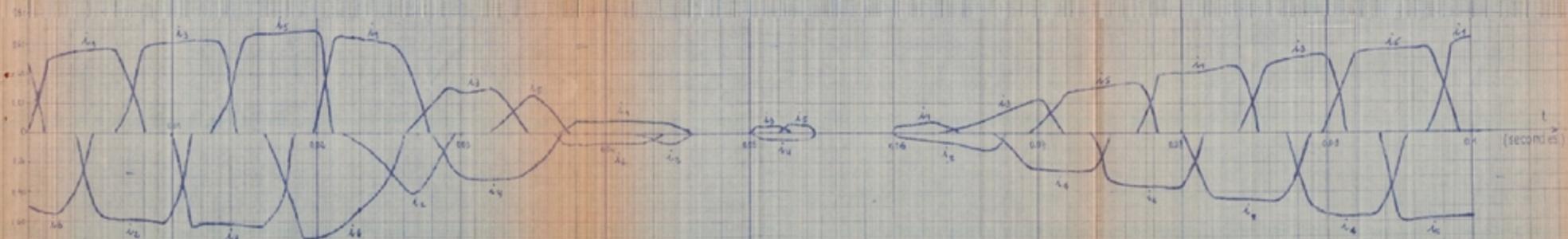
REGIME DE COURT-CIRCUIT BIPHASE

RETABLISSEMENT DU REGIME NORMAL

- $K_{sc} = 0.86$
- $K_{sc} = 0.14$
- $K_{sc} = 0.86$
- $n = 0.50$
- $N_{sc} = 0.99$
- $N_{sc} = 0.98$
- $N_{sc} = 0.99$
- $\psi_{sc} = -25.3$
- $\psi_{sc} = 0$
- $\psi_{sc} = 25.3$



$i(t)$



$i_{sc}(t)$



-COURT-CIRCUIT BIPHASE COUPLAGE TRANSFO : ETOILE-TRIANGLE.

Le changement de couplage du transformateur d'Etoile-Etoile à l'Etoile-Triangle , s'il permet d'éviter toute perturbation aux deux paramètres U_{CA} et X_{CA} n'apporte pas pour autant une amélioration remarquable au niveau de U_d et I_d .

A partir de $T_{CC1}=0.02$ s on relève l'apparition des angles de retard et du régime 3-4 Valves qui se prolonge jusqu'à la disparition du courant redressé à $t=0,047$ s, ce genre de court-circuit est à l'origine d'une succession d'intervalles de conduction n'existant pas dans n'importe quel régime symétrique.

Dans l'ensemble les résultats obtenus à cause de ces deux court-circuits Biphases sont semblables.

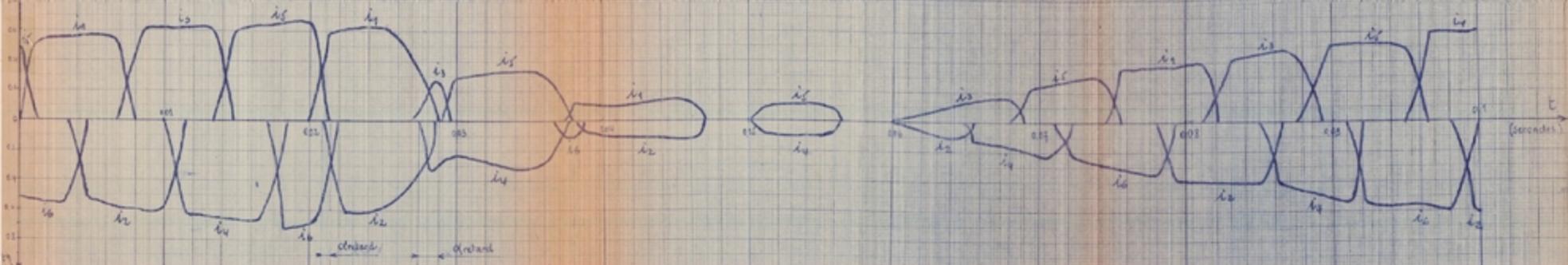
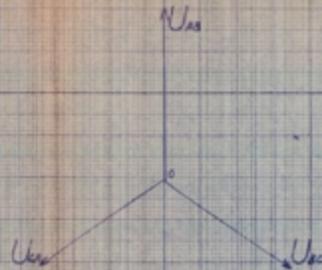
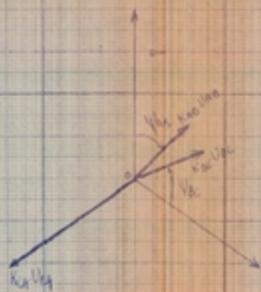
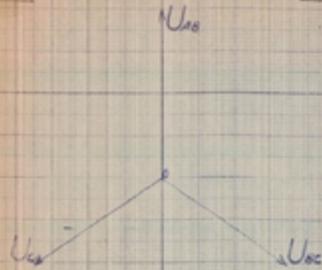
COUPLAGE DU TRANSFO N_A

REGIME NORMAL

REGIME DE COURT-CIRCUIT BIPHASE

RETABLISSEMENT DU REGIME NORMAL

- $K_{sc} = 0.51$
- $K_{sc} = 0.51$
- $K_{sc} = 1$
- $n = 0.50$
- $N_{sc} = 0.99$
- $N_{sc} = 0.99$
- $N_{sc} = 1$
- $U_{sc} = 45.3$
- $U_{sc} = 45.3$
- $U_{sc} = 0$



-COURT-CIRCUIT BIPHASE AVEC TERRE COUPLAGE ETOILE-ETOILE

Ce court-circuit se distingue des autres puisqu'il est le plus dangereux vu que le convertisseur s'éteint totalement pendant une certaine période de : $t=0.036$ s jusqu'au rétablissement du régime normal. Comme pour le court-circuit Biphasé Etoile-Etoile la composante de tension " $K_{BC} U_{BC}$ " est négligeable et les deux autres restantes sont presque opposées, aussi le pont triphasé se comporte comme un pont monophasé ordinaire d'où obtention d'une tension redressée à $2f=100$ Hz.

La valeur moyenne de U_d diminue sensiblement pendant le déséquilibre devenant même inférieure à la f.c.e.m de la charge (80 Kv) .

Le rétablissement du régime normal au point de vue tension est plus long que pour les autres genres de court-circuits.

Avant le blocage complet des thyristors l'avarie provoquée a été source de perturbations du processus de commutation ce qui a occasionné l'apparition d'intervalles de conduction de 4 Valves à $t=0.002475$ s .

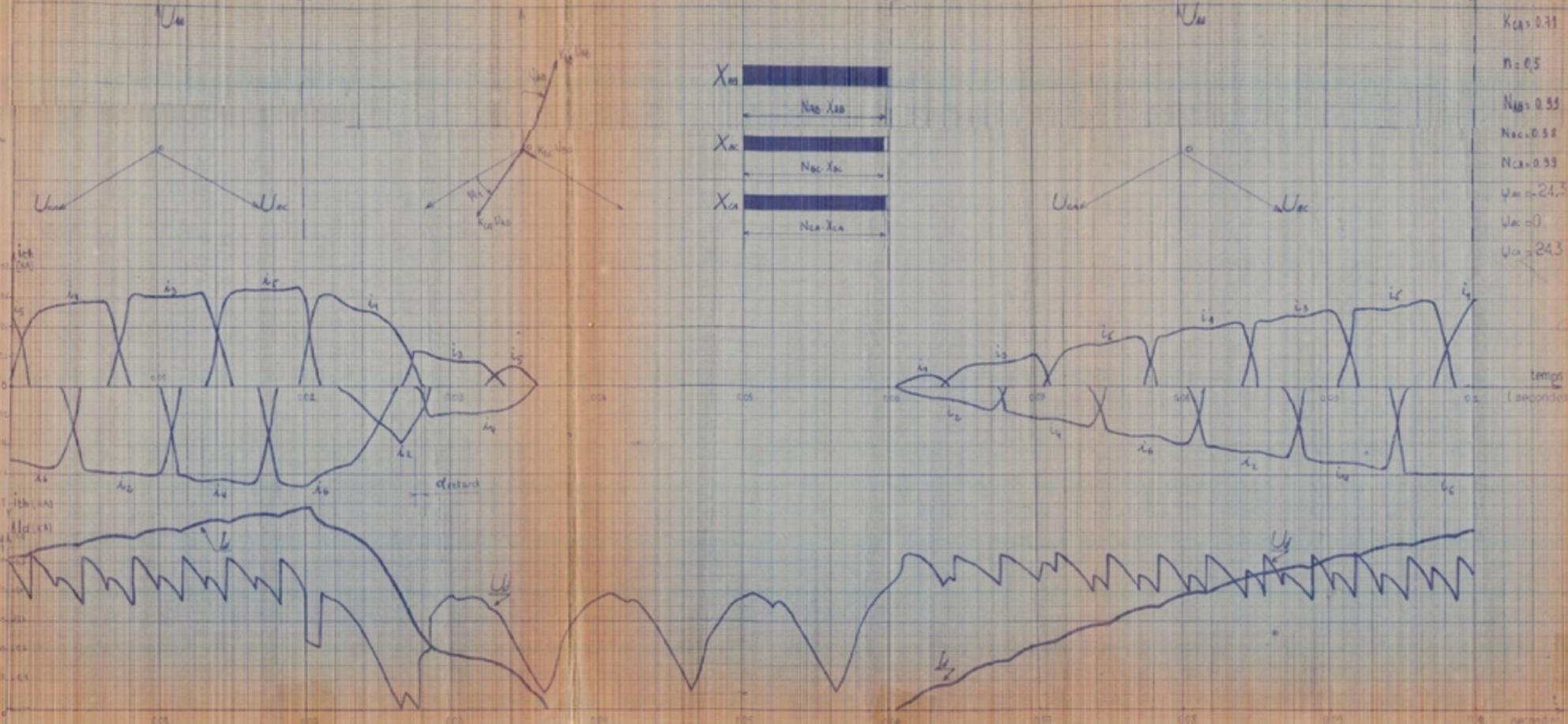
COUPLAGE DU TRANSFO N/A

REGIME NORMAL

REGIME DE COURT-CIRCUIT BIPHASE α -TERRE

RETABLISSEMENT DU REGIME NORMAL

- $k_{\alpha} = 0.91$
- $K_{\alpha} = 0.44$
- $K_{\alpha 1} = 0.71$
- $n = 0.5$
- $N_{\alpha} = 0.55$
- $N_{\alpha 1} = 0.58$
- $N_{\alpha 2} = 0.93$
- $U_{\alpha} = 24.5$
- $U_{\alpha 1} = 0$
- $U_{\alpha 2} = 24.3$



-COURT-CIRCUIT BIPHASE AVEC TERRE COUPLAGE ETOILE-TRIANGLE

Contrairement au court-circuit ci-dessus et malgré les grandes modifications constatées sur les paramètres tension, on remarque quelques velléités de conduction parmi certains thyristors ce qui permet d'obtenir un courant redressé $I_d=0.05 \text{ KA}$.

Ici aussi apparaissent tous les régimes de fonctionnement caractérisés par le nombre de valves conductrices 2-2-3 -4 etc.

Le rétablissement du régime normal de tension est plus prompt dans ce cas-ci comparativement au précédent.

Quant au courant I_d tant pour ces deux derniers genres de court-circuit que pour tous les autres analysés, le rétablissement du régime normal reste subordonné à l'inductance L_d du circuit à courant continu.

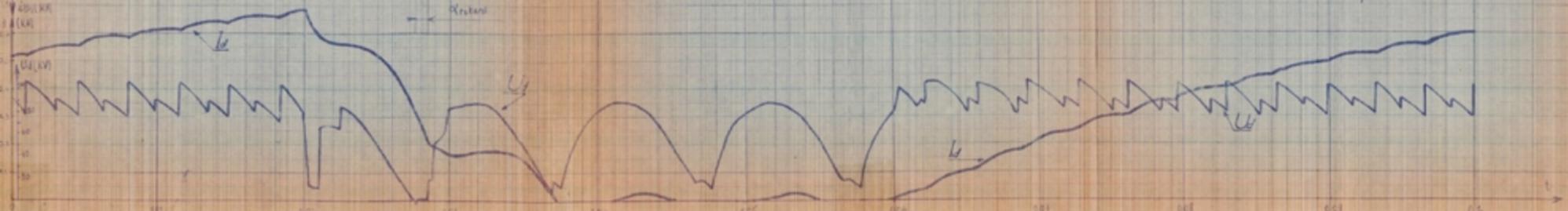
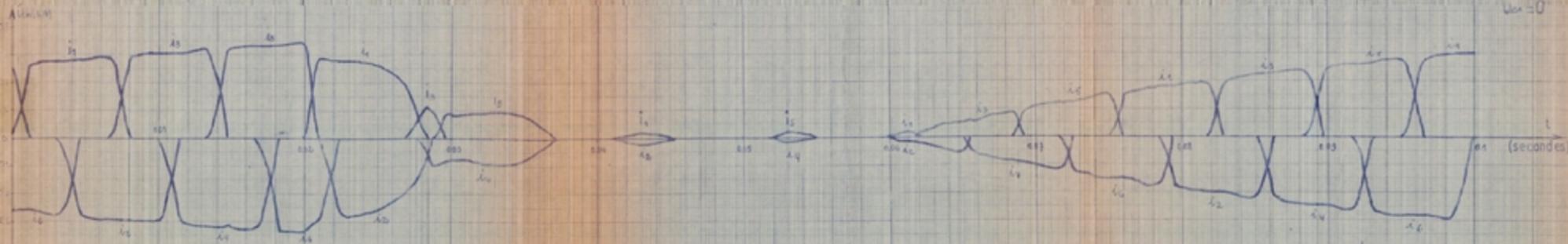
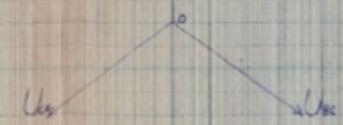
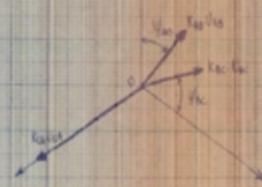
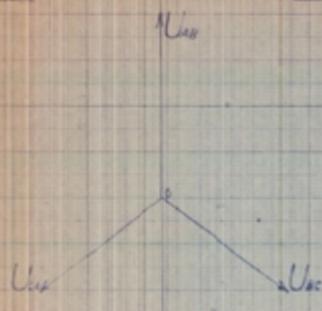
COUPLAGE DU TRANSFO Δ/Δ

REGIME NORMAL

REGIME DE COURT-CIRCUIT BIPHASE ou TERRE

RETABLISSEMENT DU REGIME NORMAL

$K_{12} = 0.42$
 $K_{21} = 0.42$
 $K_{13} = 0.81$
 $n = 0.50$
 $N_{12} = 0.99$
 $N_{21} = 0.33$
 $N_{13} = 0.99$
 $\psi_{12} = -43.5$
 $\psi_{21} = 43.5$
 $\psi_{31} = 0$



-COURT-CIRCUIT MONOPHASE ETOILE-ETOILE (REGIME DE SURCHARGE)

Les résultats obtenus pour ce cas d'anomalie sont complètement différents des autres et ce pour deux raisons:

1°- La distance séparant le lieu du court-circuit du transformateur est plus grande ($n \neq 0.5$)

2°- C'est un régime de surcharge en conséquence les courants de court-circuits sont de l'ordre du courant nominal de plus les données sont différentes.

L'éloignement du lieu de court-circuit n'affecte pas dans de grandes proportions les paramètres de commutation.

Même avant l'application de la dissymétrie le convertisseur fonctionne en régime 3-4 Valves conductrices.

Id courant redressé diminue en moyenne de 30 % .

Quant à la tension U_d dont l'allure est toute particulière du fait quelle soit obtenue sous une figuration hachée, elle ne subit l'influence du court-circuit que très légèrement.

Cette configuration de tension est due au nombre de thyristors qui sont simultanément en fonctionnement.

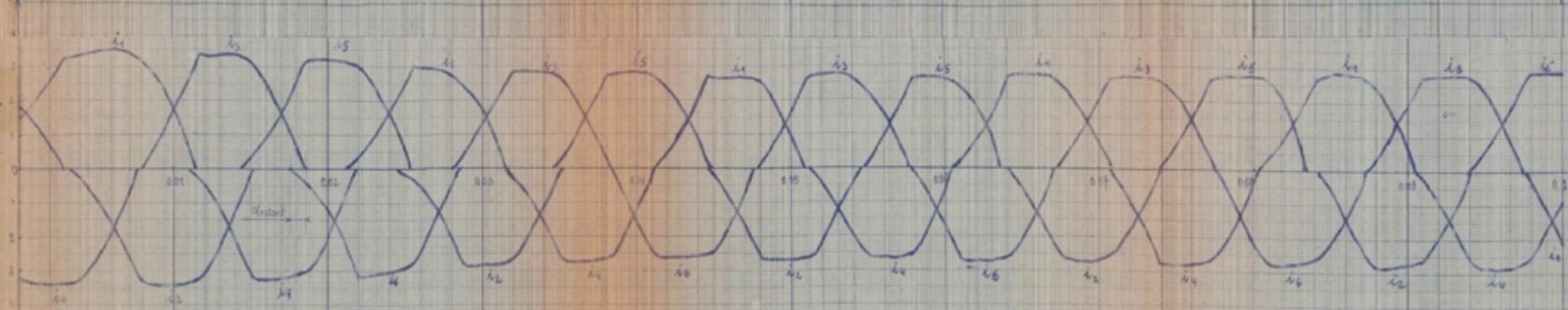
COUPLAGE DU TRANSO- Δ/Δ REGIME DE SURCHARGE

REGIME NORMAL

REGIME DE COURT-CIRCUIT MONOPHASE

RETABLISSEMENT DU REGIME NORMAL

$K_{sc} = 0.85$
 $K_{sc} = 1$
 $K_{sc} = 0.85$
 $n = 0.50$
 $N_{sc} = 0.91$
 $N_{sc} = 1$
 $N_{sc} = 0.91$
 $V_{sc} = 5.8$
 $V_{sc} = 0$
 $V_{sc} = 5.8$



- SYNTHESE GENERALE DES RESULTATS.

Dans cette étude où les cas considérés sont des plus pratiques; les figures représentant les composantes generales du pont et tous les paramètres s'y afferant, nous ont permis d'illustrer l'influence des court-circuits sur le déroulement des processus électromagnétiques dans le redresseur .

Les modifications et les variations d'amplitude et de déphasage dues à la dissymétrie font surtout ressortir l'influence du genre de court-circuit plutôt que du mode de couplage du transformateur . Cette influence se pepercute au sein des équations généralisées du convertisseur par les changements apportés au niveau des paramètres de commutation.

L'on remarque aussi que la valeur donnée à " n " dit facteur de distance situant le lieu du court-circuit par rapport au transformateur, peut-être source d'effets bien particuliers .

De tous les court-circuits étudiés le plus dangereux est évidemment le court-circuit biphasé avec terre car il provoque le blocage complet du pont redresseur. Quant au court-circuit monophasé dont les conséquences sont moins graves l'on pourrait dire qu'il est facilement supportable .

Pendant la durée du défaut, il ya perturbations dans le système de conduction, ce qui entraîne l'apparition de régimes inhabituels. La durée de commutation entre les différentes paires de phases change durant le déséquilibre ce qui implique une modification des valeurs moyennes des courants à travers les thyristors .

On constate que les six premiers cas de court-circuit (régime de surcharge exclu) considérés mettent en évidence l'apparition de l'harmonique d'ordre 2 assez considerable, chose nuisible pouvant perturber les lignes avoisinantes de télécommunications.

Ce phénomène est dû à la dissymétrie se produisant sur l'étoile de tension , sous laquelle le convertisseur se comporte comme un pont monophasé .

-oo- CONCLUSION -oo

Le perfectionnement du convertisseur statique représente un problème assez important dans l'industrie électroénergétique actuelle.

Dans le système alternatif alimentant le redresseur puissant, les cas d'apparition de nonsymétrie (court-circuit, coupure de phase, différence des paramètres longitudinaux) est assez fréquent.

Notre étude consiste à élaborer un modèle mathématique simulant ou permettant l'étude de fonctionnement d'un redresseur triphasé en cas de tels régimes non symétriques.

Le modèle proposé est général, étant donné qu'il permet d'étudier tous les régimes permanents que transitoires en cas de :

- n'importe quelle structure du système d'alimentation
- n'importe quel lieu de court-circuit dans ce système
- différents modes de couplage du transformateur du redresseur.
- n'importe quel genre de court-circuit non symétrique
- n'importe quelle nonsymétrie longitudinale.

Le programme prévoit la sortie des paramètres suivants

- Tension et impédances d'entrée dans le régime non-symétrique.
- Tension et courant redressés.
- Courants des thyristors
- Courants de phases.

Le programme de calcul établi en langage fortran IV sur IBM II30 est facilement applicable pour n'importe quel ordinateur digital de moyenne puissance.

Pour compléter cette étude, le travail peut être repris, dans la perspective d'une simulation plus complète du système de contrôle et de régulation du redresseur.

X-

A N N E X E S

-93-

X-

A N N E X E S

-93-

NOTATIONS UTILISEES DANS LE PROGRAMME DE CALCUL

Résistances

$$R = RES$$

$$R' = RES1$$

$$R_A = RNA = RES * NA$$

$$R_d = RESD$$

Inductances

$$L = SELF$$

$$L' = SEL 1$$

$$L_d = SELFD$$

$$L_A = L.N_A = SELF * NA$$

Courants

$$i_1 = Y1$$

$$i_2 = Y2$$

$$I_d = Y_3$$

Tensions

$$U_{AB} = UAB$$

$$U_{BC} = UBC$$

$$U_{CA} = UCA$$

$$U_{BA} = UBA$$

$$U_{AC} = UAC$$

$$U_{CB} = UCB$$

$$U_S = US$$

$$E_3 = E_d = ECD$$

Temps

$$t_1 = TEMPO$$

$$t_2 = TLIM \quad (\text{Fin de calcul})$$

$$w = W$$

$$t_{cc1} = TCC1 \quad) \text{ Temps de court-circuit}$$

$$t_{cc2} = TCC2 \quad)$$

Pas ou Intervalle

$$h = H$$

Arguments ou angles

$$\alpha = ALFA$$

$$\psi_{AB} = DFAB$$

$$\psi_{BC} = DFBC$$

$$\psi_{CA} = DFCA$$

suite Notation

Coefficients de changement des valeurs des
impédances de court-circuit,

$$N_{AB} = ANAB$$

$$N_{BC} = ANBC$$

$$N_{CA} = ANCA$$

Coefficients d'amplitude

$$K_{AB} = DEAB$$

$$K_{BC} = DEBC$$

$$K_{CA} = DECA$$

```

// FOR
+ IOCS(CARD,1132 PRINTER )
  ONE WORD INTEGERS
  LIST ALL
C  PROMOTEUR STRIAPAN VALENTINE
C  OUERDANE-KHELIL ."THSE DE FIN D'ETUDES"
C  ETUDE DE REDRESSEUR TRIPHASE EN REGIME NON SYMETRIQUE
C  CAS GENERAL DE COURT CIRCUIT DANS LE RESEAU D'ALIMENTATION
  READ(2,100)RES,SELF,RESD,SELFD,TEMPO,TCC1,H,ALFA,TCC2,TLIM
  READ(2,101)US,ECD,W,DEAB,DEBC,DECA,DFAB,DFBC,DFCA,ANAB,ANBC,
  ANCA,
100 FORMAT(F4.1,F7.4,F4.1,F5.2,F4.1,F6.3,F9.6,F5.0,F6.3,F6.3)
101 FORMAT(F6.1,F6.1,F5.0,3F5.2,3F5.1,3F5.2)
C  CONDITIONS INITIALES
  Y1=0.
  Y2=0.52
  Y3=0.52
  TLIM=0.1
  H=0.00011112
  ECD=80.
  TEMPO=0.
  TRAD=WxTEMPO
  N=1.
  L1=1.
  L2=1.
  L3=1.
  L4=1.
  L5=1.
  L6=1.
  M=1.
  TCC1=0.02
  TCC2=0.06
  HRAD=HxW
  RES1=RESD/RES
  SEL1=SELFD/SELF
  WRITE(3,100)RES,SELF,RESD,SELFD,TEMPO,TCC1,H,ALFA,TCC2,TLIM
  WRITE(3,101)US,ECD,W,DEAB,DEBC,DECA,DFAB,DFBC,DFCA,ANAB,ANBC,
  ANCA
C  CHOIX DES TENSIONS ET DES IMPEDANCES
40 CONTINUE
  GO TO(11,12,13,11,12,13),N
11 DX12=ANAB
  DX13=ANCA
  DX23=ANBC
  EM1=USxDEAB
  EM2=USxDEBC
  FCC1=DFABx3.14/180.
  FCC2=DFBCx3.14/180.
  GO TO 17
12 DX12=ANCA
  DX13=ANBC
  DX23=ANAB
  EM1=USxDECA
  EM2=USxDEAB
  FCC1=DFCAx3.14/180.

```

FCC2=DFABx3.14/180.

GO TO 17

2

13 DX12=ANBC

DX13=ANAB

DX23=ANCA

EM1=USxDEBC

EM2=USxDECA

FCC1=DFBCx3.14/180.

FCC2=DFCAx3.14/180.

17 DX1=DX12+DX13-DX23

DX2=DX12+DX23-DX13

DX3=DX23+DX13-DX12

C CHOIX DE L'ETAT DU CONVERTISSEUR

C COMMUTATION PRECEDENTE EST-ELLE TERMINEE

IF(Y2-Y3)21,22,22

21 IF(L1-1.)31,25,31

25 L2=1.

L3=1.

L1=3.

IMP=1.

DET4=SELFx(4.xDX13xDX12-DX1xDX1)

A11=-HxRES/SELF

A12=0.

A13=Hx(RES:SELF-RES:SELFD)

A14=Hx(2.xDX12-DX1)/DET4

A15=HX2.xDX12/DET4

A16=-Hx1./SELFD

A21=0.

A22=A11

A23=0.

A24=Hx(2.xDX13-DX1)/DET4

A25=-HxDX1/DET4

A26=0.

A31=0.

A32=0.

A33=-HxRES:SELFD

A34=0.

A35=0.

A36=-H/SELFD

GO TO 31

22 L1=1.

Y2=Y3

C COMMUTATION DERNIERE EST-ELLE TERMINEE

IF(Y1-Y3)23,24,24

23 L3=1.

IF(L2-1.)31,26,31

26 TD=TEMPOx180./0.01

WRITE(3,103)TEMPO,TD

103FORMAT(1H,20X,'REGIME 3 THYRISTORS',2X,'T=',F10.7,2X,'TD',F5.0)

L2=3.

IMP=1.

M=1.

DET3=SELFx(DX1xDX1-4.xDX13xDX12-2.xDX13xSEL1)

A11=-HxRES/SELF

A12=HxRESx(4xDX12xDX13-DX1xDX1+DX1xSEL1)/DET3

A13=HxRESx(DX1xDX1-4.xDX13xDX12-2.xDX13xSEL1-2.xRES1xDX13-RES1x

```

1 DX1 )/DET3
A14=-Hx(2.xDX23+SEL1)/DET3
A15=-Hx(DX2+SEL1)/DET3
A16=HxDX3/DET3
A21=0.
A22=HxRESx(4.xDX13xDX12-DX1xDX1)/DET3
A23=HxRESx2.xDX13xRES1:DET3
A24=-HxDX3/DET3
A25=HxDX1/DET3
A26=2.xHxDX13/DET3
A31=A21
A32=A22
A33=A23
A34=A24
A35=A25
A36=A26
GO TO 31
24 L2=1.
Y1=Y3
IF(L3-1)31,27;31
27 TD=TEMPOx180./0.01
WRITE(3,104)TEMPO,TD
104FORMAT(1H,20X,'REGIME 2 THYRISTORS',2X,'T=',F10.7,2X,'TD',F5.0)
L3=3.
IMP=5.
M=5.
DET2=SELFX(2.xDX12+SEL1)
A11=-HxRESxDX1/DET2
A12=-Hx2.xRESxDX12/DET2
A13=HxRESx(DX1-RES1)/DET3
A14=H/DET2
A15=0.
A16=-H/DET2
A21=A11
A22=A12
A23=A13
A24=A14
A25=A15
A26=A16
A31=A11
A32=A12
A33=A13
A34=A14
A36=A16
C RESOLUTION DU SYSTEME
C CALCUL DES COEFFICIENTS DE RANG KUTTA
C CALCUL DES PREMIERS COEFFICIENTS
31 G1=TRAD+ALFAX3.14/180.+1.047+2.xFCC1+FCC2
G2=TRAD+ALFAX3.14/180.-1.047+2.xFCC2+FCC1
AK11=A11xY1+A12xY2+A13xY3+A14xEM1xSIN(G1)+A15xEM2xSIN(G2)+A16x
ECD
AK21=A21xY1+A22xY2+A23xY3+A24xEM1xSIN(G1)+A25xEM2xSIN(G2)+A26x
ECD
AK31=A31xY1+A32xY2+A33xY3+A34xEM1xSIN(G1)+A35xEM2xSIN(G2)+A36x
ECD

```

C CALCUL DES 2 EME COEFFICIENTS

AK12=A11x(Y1+AK11/2.)+A12x(Y2+AK21/2.)+A13x(Y3+AK31/2.)+A14x
EM1 x
5 SIN(G1+HRAD/2.)+A15xEM2xSIN(G2+HRAD/2.)+A16xECD
AK22=A21x(Y1+AK11/2.)+A22x(Y2+AK21/2.)+A23x(Y3+AK31/2.)+A24x
EM1 x
6 SIN(G1+HRAD/2.)+A25xEM2xSIN(G2+HRAD/2.)+A26xECD
AK32=A31x(Y1+AK11/2.)+A32x(Y2+AK21/2.)+A33x(Y3+AK31/2.)+A34x
EM1 x
7 SIN(G1+HRAD/2.)+A35xEM2xSIN(G2+HRAD/2.)+A36xECD

C CALCUL DES 3EME COEFFICIENTS

AK13=A11x(Y1+AK12/2.)+A12x(Y2+AK22/2.)+A13x(Y3+AK32/2.)+A14x
EM1 x
8 SIN(G1+HRAD/2.)+A15xEM2xSIN(G2+HRAD/2.)+A16xECD
AK23=A21x(Y1+AK12/2.)+A22x(Y2+AK22/2.)+A23x(Y3+AK32/2.)+A24x
EM1 x
9 SIN(G1+HRAD/2.)+A25xEM2xSIN(G2+HRAD/2.)+A26xECD
AK33=A31x(Y1+AK12/2.)+A32x(Y2+AK22/2.)+A33x(Y3+AK32/2.)+A34x
EM1 x
xSIN(G1+HRAD/2.)+A35xEM2xSIN(G2+HRAD/2.)+A36xECD

C CALCUL DES 4EME COEFFICIENTS

AK14=A11x(Y1+AK13)+A12x(Y2+AK23)+A13(Y3+AK31)+A14xEM1 xSIN(G1+
xHRAD)+A15xEM2xSIN(G2+HRAD)+A16xECD
AK24=A21x(Y1+AK13)+A22x(Y2+AK23)+A23x(Y3+AK31)+A24xEM1 xSIN(G1+
xHRAD)+A25xEM2xSIN(G2+HRAD)+A26xECD
AK34=A31x(Y1+AK13)+A32x(Y2+AK23)+A33x(Y3+AK31)+A34xEM1 xSIN(G1+
xHRAD)+A35xEM2xSIN(G2+HRAD)+A36xECD
DY1=(AK11+2.xAK12+2.xAK13+AK14)/(6.xH)
DY2=(AK21+2.xAK22+2.xAK23+AK24)/(6.xH)
DY3=(AK31+2.xAK32+2.xAK33+AK34)/(6.xH)
Y1=Y1+DY1 xM
Y2=Y2+DY2 xH
Y3=Y3+DY3 xH
TEMPO=TEMPO+H
TRAD=TRAD+HRAD
IF(Y1)91,90,90

91 Y1=0.

90 K5=1.

IF(Y2)92,93,93

92 Y2=0.

93 K5=2.

IF(Y3)94,95,95

94 Y3=0.

95 K5=1.

UD=EM1 xSIN(G1+HRAD)-SELFxDY1 xDX1-2.xSELFxDX1 2xDY2+SELFxDX1 x
DY3

IF(TRAD-1.047+2.xFCC2+FCC1)32,28,28

28 CONTINUE

IF(Y1-Y3)33,29,29

33 UT=-UD

IF(UT)41,42,42

42 CONTINUE

IF(L5-3.)43,44,43

44 ALR=(TRAD-TIMP)x180./3.14

```
WRITE(3,107)TEMPO,ALR
107FORMAT(20X,'T=',F9.6,2X,'ALLUMAGE 4° THYRISTOR AVEC ALFA
RETARD='F5.1)
L5=1.
43 TD=TEMPOx180./0.01
WRITE(3,102) TEMPO,TD
102 FORMAT(1H,20X,'REGIME 4 THYRISTORS',2X,'T=',F10.7,2X,'TD='F5.0)
Y2=Y1
29 CONTINUE
IF(L5-3.)46,47,46
47 ALR=(TRAD-TIMP)x180./3.14
WRITE(3,108) TEMPO,ALR
108 FORMAT(25X,'T=',F9.6,2X,'ALLUMAGE 3 EME THYRISTOR AVEC ALFA
RETARD='F5.1)
L5=1.
L2=1.
GO TO 46
41 CONTINUE
IF(L5-1.)32,45,32
45 TIMP=TRAD
L5=3.
GO TO 32
46 Y1=0.
N=N+1
N=N-(N-1)/6x6
TRAD=TRAD-1.047+2.xFCC2+FCC1
32 TEL=TRADx180./3.14
IF(M-IMP)37,36,37
36 CONTINUE
IF(Y2-Y3)50,51,51
50 CA=Y3-Y2
GO TO 52
51 CA=0.
52 KL=5.
GO TO (60,61,62,63,64,65),N
60 CT1=Y1
CT2=0.
CT3=0.
CT4=CA
CT5=Y3-Y1
CT6=Y2
GO TO 66
61 CT1=Y2
CT2=Y1
CT3=0.
CT4=0.
CT5=CA
CT6=Y3-Y1
GO TO 66
62 CT1=Y3-Y1
CT2=Y2
CT3=Y1
CT4=0.
CT5=0.
CT6=CA
GO TO 66
```

```

63 CT1=CA
   CT2=Y3-Y1
   CT3=Y2
   CT4=Y1
   CT5=0.
   CT6=0.
   GO TO 66
64 CT1=0.
   CT2=CA
   CT3=Y3-Y1
   CT4=Y2
   CT5=Y1
   CT6=0.
   GO TO 66
65 CT1=0.
   CT2=0.
   CT3=CA
   CT4=Y3-Y1
   CT5=Y2
   CT6=Y1
66 WRITE(3,109)TEMPO,DEL,CT1,CT2,CT3,CT4,CT5,CT6,Y1,Y2,Y3,UD
109 FORMAT(1X,'T=',F9.6,'TEL=',F7.1,'IT1=',F5.2,'IT2=',F5.2,'IT3='
x,F5.2,'IT4=',F5.2,'IT5=',F5.2,'IT6=',F5.2,1X,'I1=',F6.3,1X,
x'I2=',F6.3,1X,'ID=',F6.3,1X,'UD=',F6.1)
   M=1
   GO TO 53
37 M=M+1
53 KL=4.
   IF(TEMPO-TCC1)54,55,55
55 KL=1
   IF(L4-1)54,80,54
80 WRITE(3,110)TEMPO
110 FORMAT(15X,'COURT CIRCUIT DANS LE RESEAU D'ALIMENTATION DU
xREDRESSEUR T=',F9.6)
   L4=3.
   A=0.
   B=1.
   KT=1.
   EPS=1.88
   RO=0.86
   HU=0.012
   WRITE(3,2)A,B,KT
2 FORMAT(40X,2HA=,F2.0,2X,2HB=,F2.0,2X,3HKT=,I1//)
   IF(2.-KT)4,5,6
C FORMULES RELATIVES AU CC DIPHASE AVEC TERRE
4 DEAB=SQRT(1.-((2.+3.xEPS-2.xAxEPS)x(RO+2.xEPSxRO)-(1.+3.xEPS-
22.xAxEPS+3,xEPSxEPS-2.xAxEPSxEPS)xROxRO)/(1.+4.xEPS+4.xEPSx
EPS))
   DEBC=SQRT(1.-2.xRO+ROxRO+(BxROxEPS+2.xBxROxEPSxEPS-
3BxROxROxEPSx(1.+EPS))/(1.+4.xEPS+4.xEPSxEPS))
   DECA=SQRT(1.-((2.xRO+4.xEPSxRO-ROxRO+AxEPSxRO+2.xAxROxEPSxEPS-
4AxROxROxEPSx(1.+EPS))/(1.+4.xEPS+4.xEPSxEPS))
   ANAB=1.-((2.+3.xEPS-2.xAxEPS)xROxHU)/(2.+4.xEPS)
   ANBC=1.-ROxHU+BxEPSxROxHU/(2.+4.xEPS)
   FAB=-ATAN(1.732xROxEPS/(2.+4.xEPS-2.xRO-3.xEPSxRO+2.xAxROxEPS))

```

$$FBC = \text{ATAN}(1.732 \times B \times R0 \times \text{EPS} / (2. + 4. \times \text{EPS} - 2. \times R0 - 3. \times \text{EPS} \times R0))$$

$$FCA = \text{ATAN}(1.732 \times A \times R0 \times \text{EPS} / (2. + 4. \times \text{EPS} - 2 \times R0 - \text{EPS} \times R0))$$

GO T O 7

C FORMULES RELATIVES AU CC DIPHASE

$$5 \text{ DEAB} = \text{SQRT}(1. + (A - 1.5) \times R0 + (0.75 - 0.5 \times A) \times R0 \times R0)$$

$$\text{DEBC} = \text{SQRT}(1. - 2. \times R0 + R0 \times R0 + 0.5 \times B \times R0 - 0.25 \times B \times R0 \times R0)$$

$$\text{DECA} = \text{SQRT}(1. - 0.5 \times A \times R0 + 0.25 \times A \times R0 \times R0)$$

$$\text{ANAB} = 1. + (0.5 \times A - 0.75) \times R0 \times \text{HU}$$

$$\text{ANBC} = 1. + (0.25 \times B - 1.) \times R0 \times \text{HU}$$

$$\text{ANCA} = 1. - 0.25 \times A \times R0 \times \text{HU}$$

$$\text{FAB} = -\text{ATAN}(1.732 \times R0 / (4. + 2. \times A \times R0 - 3. \times R0))$$

$$\text{FBC} = \text{ATAN}(1.732 \times B \times R0 / (4. - R0 \times 3.))$$

$$\text{FCA} = \text{ATAN}(1.732 \times A \times R0 / (4. - R0))$$

GO T O 7

C FORMULES RELATIVES AU CC MONOPHASE

$$6 \text{ DEAB} = \text{SQRT}(1. - (2. \times R0 + \text{EPS} \times R0 + 4. \times A \times R0 + 2. \times A \times R0 \times \text{EPS} - R0 \times R0 - 2. \times A \times R0 \times 5R0) / (4. + 4. \times \text{EPS} + \text{EPS} \times \text{EPS}))$$

$$\text{DEBC} = \text{SQRT}(1. - (2. \times B \times R0 + B \times R0 \times \text{EPS} - B \times R0 \times R0) / (4. + 4. \times \text{EPS} + \text{EPS} \times \text{EPS}))$$

$$\text{DECA} = \text{SQRT}(1. - (8. \times R0 - 4. \times R0 \times R0 - 2. \times A \times R0 + 4. \times R0 \times \text{EPS} -$$

$$6 \times A \times R0 \times \text{EPS} + A \times R0 \times R0) / (4. + 4. \times \text{EPS} + \text{EPS} \times \text{EPS}))$$

$$\text{ANAB} = 1. - ((0.5 \times A) \times R0 \times \text{HU} / (2. + \text{EPS}))$$

$$\text{ANBC} = 1. - (0.5 \times B \times R0 \times \text{HU} / (2. + \text{EPS}))$$

$$\text{ANCA} = 1. - ((2. - 0.5 \times A) \times R0 \times \text{HU} / (2. + \text{EPS}))$$

$$\text{FAB} = \text{ATAN}(1.732 \times R0 / (4. + 2. \times \text{EPS} - 2. \times A \times R0 - R0))$$

$$\text{FBC} = -\text{ATAN}(1.732 \times B \times R0 / (4. + 2. \times \text{EPS} - R0))$$

$$\text{FCA} = -\text{ATAN}(1.732 \times A \times R0 / (4. + 2. \times \text{EPS} - 3. \times R0))$$

$$7 \text{ DFAB} = \text{FAB} \times 180. / 3.14$$

$$\text{DFBC} = \text{FBC} \times 180. / 3.14$$

$$\text{DFCA} = \text{FCA} \times 180. / 3.14$$

WRITE(3,200)DEAB,DEBC,DECA,ANAB,ANBC,ANCA,DFAB,DFBC,DFCA

200 FORMAT(10X,3F5.2,3X,3F5.2,3X,3F5.1)

54 IF(TEMPO-TCC2)56,57,57

57 KL=3.

IF(L6-1)56,81,56

81 WRITE(3,111)TEMPO

111 FORMAT(20X,'RETABLISSEMENT DU REGIME NORMAL T=',F9.6)

L6=3.

C CONDITIONS INITIALES

DEAB=1.

DEBC=1.

DECA=1.

ANAB=1.

ANBC=1.

ANCA=1.

DFAB=0.

DFBC=0.

DFCA=0.

56 IF(TEMPO-TLIM)40,30,30

30 CALL EXIT

END

RESOLUTION DES EQUATIONS DIFFERENTIELLES.

1. Introduction

Lorsqu'on se trouve en présence d'une équation différentielle ou d'un système différentiel, on doit d'abord se demander s'il en existe une méthode élémentaire d'intégration c'est à dire une méthode ramenant le problème de l'intégration à des quadratures. Si ce n'est pas possible on doit se rappeler qu'il existe de nombreux types d'équations différentielles dont les solutions ont été étudiées et tabulées de sorte que, en pratique, ces équations doivent être considérées comme résolues. Lorsqu'un système différentiel semble tout à fait inabordable, on ne peut l'intégrer que par des méthodes numériques, soit directement, soit après des transformations préliminaires qui puissent simplifier les calculs. On peut à cet effet utiliser les méthodes de calcul numérique ou des machines .

Dans les méthodes purement numériques, on doit distinguer les méthodes graphiques et les méthodes de calcul pur. Méthode utilisant la théorie des différences dite d'ADAMS et la méthode de " RUNGE KUTTA " qui peut être considérée comme un modèle élémentaire des nombreuses méthodes utilisées aujourd'hui .

2. Méthode de RUNGE KUTTA.

Cette méthode est souple pour l'utiliser dans les calculateurs digitaux, ordinateurs.

Soit l'équation différentielle: $dY/dX = f(X,Y)$ et soient X_0, Y_0 les conditions initiales. Le problème est de rechercher les valeurs que prend la fonction Y pour des valeurs de X en progression arithmétique de raison h

$$X_0 + h ; X_0 + 2h ; \dots\dots\dots$$

Il existe un certain nombre de formules d'approximation dites de "RUNGE KUTTA". Nous en établirons une seule qui est de forme simple et très suffisante pour les besoins de la pratique du calcul numérique .

Cette formule peut être obtenue par le procédé suivant
la valeur de $Y(X)$ au point X_0+h est :

$$Y(X_0+h) = Y_0 + \int_{X_0}^{X_0+h} f(X, Y) dX$$

Désignons par $Y_{\frac{1}{2}}$ la valeur de Y au point $X_{\frac{1}{2}} = X_0 + h/2$ et Y_1 la valeur de Y au point $X_1 = X_0 + h$.

L'intégrale se calculera par la formule de SIMPSON

$$Y_1 = Y_0 + \frac{h}{6} \left\{ f(X_0, Y_0) + 4f(X_{\frac{1}{2}}, Y_{\frac{1}{2}}) + f(X_1, Y_1) \right\}$$

Calculons des valeurs approchées de Y_1 et $Y_{\frac{1}{2}}$ qui figurent dans le second membre de l'expression précédente :

$$Y_{\frac{1}{2}} = Y_0 + \int_{X_0}^{X_{\frac{1}{2}}} f(X, Y) dX$$

ou en appliquant le théorème de la moyenne

$$Y_{\frac{1}{2}} = Y_0 + \frac{1}{2} h f(\xi, n)$$

n est la valeur de Y correspondant à un point $X = \xi$ compris entre X_0 et $X_0 + h/2$. On aura une valeur approchée en prenant X_0 pour ξ et Y_0 pour n .

Soit $(Y_{\frac{1}{2}})'$ cette valeur approchée

$$(Y_{\frac{1}{2}})' = Y_0 + K_1/2 \quad \text{avec } K_1 = hf(X_0, Y_0)$$

Nous obtiendrons encore une valeur approchée $(Y_{\frac{1}{2}})''$ en prenant dans la formule de la moyenne $\xi = X_0 + h/2$ et $n = (Y_{\frac{1}{2}})'$ nous aurons :

$$(Y_{\frac{1}{2}})'' = Y_0 + K_2/2 \quad \text{avec } K_2 = hf(X_0 + h/2, Y_0 + K_1/2)$$

pour Y_1 nous allons opérer de la même façon

$$Y_1 = Y(X_0+h) = Y_0 + \int_{X_0}^{X_0+h} f(X, Y) dX = Y_0 + hf(\xi_1, n_1)$$

Prenons pour $X = \xi_1$, compris entre X_0 et $X_0 + h$, la valeur $X_0 + h/2$ nous avons

$$Y_1' = Y_0 + hf(X_0 + h/2; Y_0 + K_2/2) = Y_0 + K_3$$

avec $K_3 = hf(X_0 + h/2; Y_0 + K_2/2)$

La formule de simpson écrite plus haut donne pour valeur de $Y(X_0+h)$ que nous adoptons .

$$Y_1 = Y_0 + \frac{h}{6} \left\{ f(X_0, Y_0) + 2f(X_0 + h/2, Y_0 + K_1/2) + 2f(X_0 + h/2; Y_0 + K_2/2) + f(X_0 + h, Y_0 + K_3) \right\}$$

c'est à dire la formule :

$$Y_1 = Y_0 + \frac{1}{3} (K_2 + K_3 + \frac{K_1 + K_4}{2})$$

@@@ Remarque:

Une étude plus approfondie de la méthode qui d'être exposer, montre que l'erreur commise en remplaçant la valeur exacte de Y pour $X_0+h = X_1$ par Y_0+K est un infiniment petit de l'ordre de (h^5)
On se guidera sur une indication pour choisir la valeur de l'intervalle h, selon la précision exigée.

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

- N°1 Technique de l'ingénieur Tome III (1972)
 PIERRE GABRIEL LAURENT (Transp. d'énergie à C.C)
- N°2 V. STRIAPAN Thèse de Doctorat 3° Cycle (Russe)
- N°3 HIGNORANI "Simulation d'un système HVDC sur
 Ordinateur digital "Process Central"
- N°4/5 J. BASS Cours de mathématiques
 A. ANGOT Compléments de mathématiques
 M. MOUNIC Redressement Tomes 1 , 2 et 3
 TECHNIQUES C.E.M Edition mensuelle .
 I. KAGANOV Electronique Industrielle (Tech Sov)