

50376
1970
108

Numéro d'ordre:113

50.376
1970
108

THESE

présentée

à la Faculté des Sciences
de l'Université de Lille

pour obtenir

le Titre de Docteur-Ingénieur

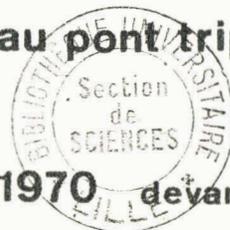
par

M. H. SCHOORENS

Ingénieur HEI

Contribution à l'étude des montages redresseurs

Application au pont triphasé mixte



Soutenue le 10 Novembre 1970 devant la Commission d'Examen:

MM. A. LEBRUN Président
M. PANET Examineur
C. MAIZIERES Examineur
G. SEQUIER Rapporteur



030 020497 2

A MA FAMILLE

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES MONTAGES REDRESSEURS

APPLICATION AU MONTAGE MIXTE TRIPHASE EN PONT

Le remplacement des redresseurs à arc par des semi-conducteurs de puissance a donné un nouvel essor aux montages statiques assurant la transformation alternatif-continu : la valeur beaucoup plus faible de la chute de tension interne améliore notablement le rendement des montages, la facilité de mise en oeuvre permet d'adopter de nouveaux schémas.

La multiplication des unités de transformation et l'accroissement des puissances unitaires conduit à affiner l'étude des montages et de leurs caractéristiques.

L'étude générale de l'ensemble des montages redresseurs vient d'être effectuée par Monsieur SEGUIER. Une telle étude qui débouche sur la comparaison des montages et le choix à opérer pour chaque type d'application n'a pu être menée à bien qu'en admettant l'hypothèse de la constance du courant redressé.

Lorsque la nature du récepteur placé du côté continu infirme cette hypothèse, les relations et les caractéristiques obtenues sont modifiées. Le fonctionnement d'un montage redresseur dépend en effet des paramètres caractérisant le récepteur qu'il alimente et cela d'autant plus que la tension redressée présente un taux d'ondulation plus élevé.

Toutefois la complexité des calculs conduit à adopter les résultats obtenus dans l'étude classique comme point de départ et base de comparaison.

Après avoir rappelé les résultats de cette étude, nous consacrerons la première partie de ce mémoire à l'établissement des relations et des procédés de calcul qui permettent de corriger ces résultats lorsque l'ondulation du courant redressé cesse d'être négligeable. Nous vérifierons les méthodes proposées sur le montage redresseur monophasé double alternance qui, de tous les montages industriellement utilisés, est celui qui conduit aux plus fortes ondulations du courant dans un récepteur donné.

Dans la seconde partie nous appliquerons les procédés ainsi établis à l'un des montages les plus intéressants quant à ses performances, le montage qui, à l'aide de trois diodes et de trois thyristors, permet de redresser un système triphasé de tensions alternatives et d'obtenir avec de bonnes performances une tension continue variable. Nous examinerons le débit de ce pont triphasé mixte sur un récepteur résistant, puis sur un récepteur résistant et inductif, enfin sur un récepteur résistant, inductif et présentant une force contre-électromotrice.

Ce travail a été effectué dans les laboratoires du Service d'Electrotechnique de la Faculté des Sciences de Lille, nous avons pu aussi disposer des installations du Département Génie Electrique de l'Institut Universitaire de Technologie de BETHUNE.

Nous remercions très vivement Monsieur SEGUIER, Maître de Conférences à la Faculté et Directeur de l'I.U.T., qui nous a associé à ses recherches sur les montages redresseurs. Tout au long de la préparation et de la rédaction de ce mémoire il a été pour nous un guide et un conseiller attentif et bienveillant.

Nous exprimons aussi notre reconnaissance à nos collègues et amis de la Faculté des Sciences de Lille et de l'I.U.T. de BETHUNE, tout particulièrement à Monsieur F. NOTELET, Chef du Département Génie Electrique et à Monsieur J. LESENNE, Chef de Service à l'I.U.T. Ils ont fait tout leur possible pour nous aider dans nos calculs et nos vérifications expérimentales.

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

Un rappel, aussi bref que possible, est indispensable pour situer notre travail par rapport aux connaissances acquises sur les montages redresseurs.

Il est difficile de préciser les étapes qui ont conduit à la théorie générale, maintenant bien décantée, des montages redresseurs. On doit à H. GIROZ ^[1] le premier ouvrage donnant une étude globale du problème. M. DEMONTVIGNIER ^[2] à ^[9] a éclairci les points les plus délicats et donné les moyens de calculer les éléments des montages classiques. Citons également le travail de G. KOUSKOFF ^[10] sur la détermination précise de la caractéristique totale de tension.

G. SEGUIER ^[11] ^[12], devant les difficultés rencontrées lorsqu'on veut, avec les montages antérieurement utilisés, obtenir une tension redressée à faible ondulation, a eu l'idée de réaliser avec des redresseurs statiques l'opération effectuée par l'ensemble balais-collecteur des dynamos à courant continu. Il a proposé le nom de montages à commutation série pour les redresseurs procédant ainsi.

Pour situer l'intérêt de ce nouveau mode de redressement ^[13], il a repris et complété l'étude des autres types de montages qualifiés de montages à commutation parallèle ou à commutation parallèle double. Il vient de publier l'ensemble des résultats relatifs aux trois types de montages et à leurs groupements.

C'est à ce récent ouvrage ^[14] que nous nous référons pour présenter les éléments de départ de notre étude complémentaire.

Après avoir rappelé le principe des trois modes de commutation et les étapes de la VOIE qui permet de déterminer les caractéristiques des divers montages, nous donnerons les principales relations obtenues lors du fonctionnement en commutation naturelle, puis lors du fonctionnement à commutation retardée. Nous pourrons alors, en réfléchissant sur le sens profond de l'hypothèse du courant redressé constant, préciser dans quelle optique il convient d'étudier ce qui se passe quand cette hypothèse ne peut être retenue.

(1) les chiffres entre crochets se rapportent à la bibliographie annexée à ce mémoire

Q1. LES TROIS MODES DE COMMUTATION

Pour obtenir une tension continue à partir d'un ensemble de tensions alternatives, il faut opérer une "commutation" c'est-à-dire modifier de façon périodique les connexions entre les bornes où apparaissent ces tensions et celles entre lesquelles on recueille la tension redressée.

G. SEGUIER a pensé que le fonctionnement des montages redresseurs, qui effectuent statiquement cette opération, dépendait moins de la façon dont on groupe les redresseurs diodes ou thyristors, que de la façon dont sont groupés les q enroulements sièges des tensions alternatives à redresser.

Il distingue trois types de montages :

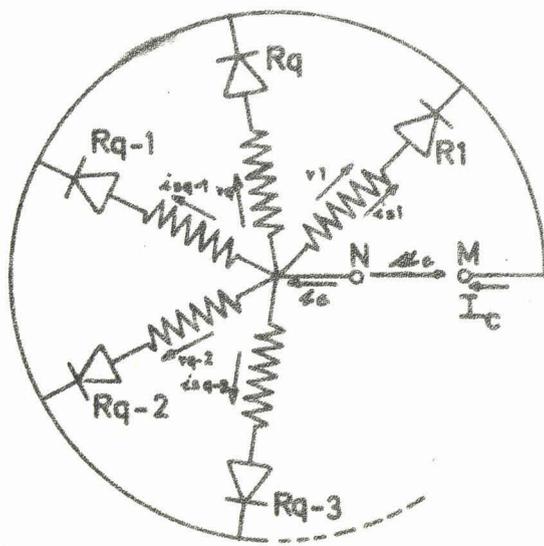
- les montages à commutation parallèle (P.)
- les montages à commutation parallèle double (P.D.)
- les montages à commutation série (S.)

La figure 1 donne les schémas généraux permettant l'étude de ces trois modes de commutation et indique les notations adoptées tout au long de ce mémoire. Nous désignerons par :

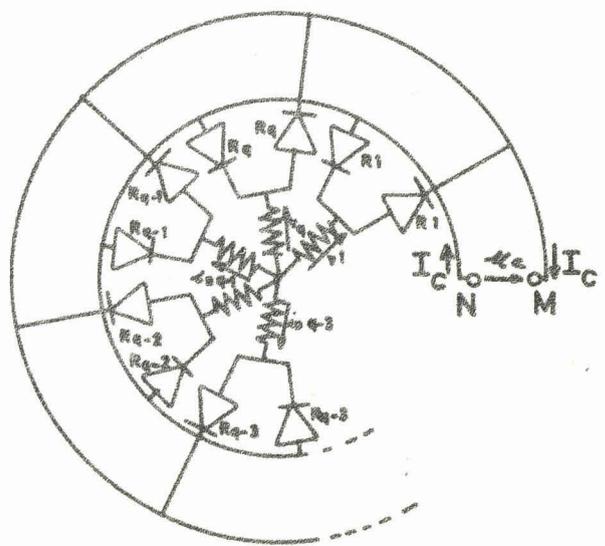
$v_1, v_2 \dots v_q$ les q tensions, supposées sinusoïdales de période T soumises au redressement. Il s'agit d'ordinaire des tensions secondaires d'un transformateur,

$$\begin{aligned}
 v_1 &= V_m \sin \omega t && \} \\
 v_2 &= V_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{q} \right) && \} \quad (1) \\
 &&& \} \\
 v_q &= V_m \sin \left[\omega t - (q - 1) \frac{2\pi}{q} \right] && \}
 \end{aligned}$$

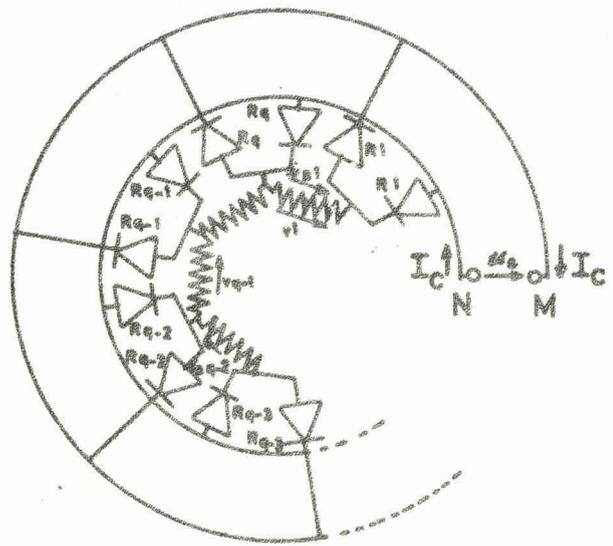
- $i_{s1}, i_{s2}, \dots, i_{sq}$ les courants dans les q enroulements secondaires,
- i_{p1}, i_{p2}, \dots les courants dans les bobinages primaires,
- j_{p1}, j_{p2}, \dots les courants primaires en ligne si les enroulements primaires sont groupés en polygone,
- i_1, i_2, \dots, i_q les courants dans les redresseurs de la première série R_1, R_2, \dots, R_q ,
- i'_1, i'_2, \dots, i'_q les courants dans les redresseurs de la deuxième série R'_1, R'_2, \dots, R'_q .



P.



P.D.



S.

Figure 1.-Les différents modes de commutation:

- P. : Commutation "Parallèle";
- P.D. : Commutation "Parallèle-Double";
- S. : Commutation "Série".

$v_{R_1}, \dots, v_{R_q}, v_{R'_1}, \dots, v_{R'_q}$ les tensions aux bornes des redresseurs,
 u_c la tension redressée, de valeur moyenne U_{CO}
à vide et U_c en charge
 i_c le courant redressé de valeur moyenne I_c

Dans les montages à commutation naturelle, tous les redresseurs sont de simples diodes. En commutation retardée on utilise des redresseurs à électrode de commande, des thyristors le plus souvent. Les montages à $2q$ redresseurs pour q tensions secondaires (commutation parallèle double ou série) peuvent être mixtes, c'est-à-dire que R'_1, R'_2, \dots, R'_q sont des thyristors alors que pour R_1, R_2, \dots, R_q on emploie des diodes.

Pour expliquer rapidement le fonctionnement des montages envisageons le fonctionnement en commutation naturelle et supposons que le courant i_c ne s'annule jamais au cours de la période.

0.1.1. Montages à commutation parallèle (figure 1.P)

Les bobinages sont groupés en étoile, le point neutre N constitue d'ailleurs la borne "moins" de la tension redressée u_c . Les q bornes de phase sont réunies aux anodes des q redresseurs, les cathodes réunies forment la borne "plus" M.

A chaque instant par le débit du redresseur correspondant M est relié à la borne secondaire dont le potentiel est le plus élevé, c'est donc la phase dont la tension est la plus grande qui débite.

Quand $v_1 > v_2, v_3, \dots, v_q$, R_1 conduit ; si on néglige la chute de tension dans R_1 , $u_c = v_1$. Le courant i_c passe dans la phase 1, $i_{s1} = i_1 = i_c$. Les autres courants sont nuls.

Durant le $q^{\text{ième}}$ de période suivant, v_2 est la plus grande des tensions, R_2 est seul passant, $i_{s2} = i_2 = i_c$

0.1.2. Montages à commutation parallèle double (figure 1.P.D.)

Les enroulements sont encore en étoile, mais il y a deux séries de redresseurs.

La première série, R_1, R_2, \dots, R_q , relie comme précédemment M à la borne de la phase dont la tension est la plus positive. La série des redresseurs à anodes équipotentielles, R'_1, R'_2, \dots, R'_q , réunit N à la borne dont le potentiel est le plus bas donc à la phase dont la tension est la plus négative. A chaque instant il y a deux diodes conductrices, une de chaque série et la tension redressée u_c est la différence entre la plus positive et la plus négative des q tensions alternatives.

Pendant la $q^{\text{ième}}$ de période où v_1 est plus grand que v_2, v_3, \dots, v_q , R_1 débite et $i_{s1} = i_1 = i_c$. Quand v_1 est la plus négative des tensions, c'est le redresseur R'_1 qui assure le passage de i_c , alors $i_{s1} = -i'_1 = -i_c$. Le courant dans chaque bobine secondaire est donc alternatif.

0.1.3. Montages à commutation série (figure 1.S.)

Ce type de montage utilise aussi $2q$ redresseurs groupés comme précédemment, mais les enroulements sièges des tensions à redresser sont couplés en polygone et non plus en étoile.

Par le débit du redresseur correspondant de la première série R_1, R_2, \dots, R_q , M est relié à la borne la plus positive du polygone. De même à chaque instant, la conduction de l'une des diodes de la seconde série relie N à celle des bornes 1, 2, ... ou q dont le potentiel est le plus négatif.

G. SEGUIER ^[11] a montré que le redresseur passant du premier groupe est celui placé à l'extrémité de l'enroulement dont la tension est devenue positive la dernière. De même, la diode conductrice de la seconde série est celle placée à l'extrémité de la bobine dont la tension est devenue négative en dernier lieu. Ainsi, puisque $v_1 = V_m \sin \omega t$, R_1 conduit pour $0 < t < \frac{T}{q}$ et R'_1 pour $\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2} + \frac{T}{q}$.

La tension redressée u_c , recueillie entre N et M, est à chaque instant, égale à la somme des tensions secondaires positives.

Le courant i_c passe à l'intérieur du polygone par deux voies, celle groupant tous les enroulements sièges de tensions positives et celle groupant tous ceux dont la tension est négative. Si le nombre q de phases est pair, il y a $\frac{q}{2}$ enroulements dans chacune des voies et le courant i_c se partage également entre les deux circuits en parallèle. Si le nombre de phases est impair, une voie compte $\frac{q+1}{2}$ phases parcourues par $i_c \frac{q-1}{2q}$, l'autre $\frac{q-1}{2}$ traversées par $i_c \frac{q+1}{2q}$.

Le courant dans chaque enroulement est alternatif, positif quand la phase est dans le groupe de celles qui sont le siège de tensions positives, négatif durant l'autre moitié de la période.

Afin d'illustrer cette explication sommaire du principe de fonctionnement, pour les trois montages possibles à $q = 3$, nous avons déduit (figure 2) des tensions à redresser v_1 , v_2 et v_3

- l'intervalle de conduction des divers redresseurs
- la forme d'onde de la tension redressée u_c
- celle de la tension v_{R_1} aux bornes du redresseur R_1 .

Puis en supposant que la charge est une résistance pure R , donc que $i_c = \frac{u_c}{R}$, nous avons tracé les formes d'ondes des courants i_1 dans R_1 et i_{s_1} dans la première phase secondaire.

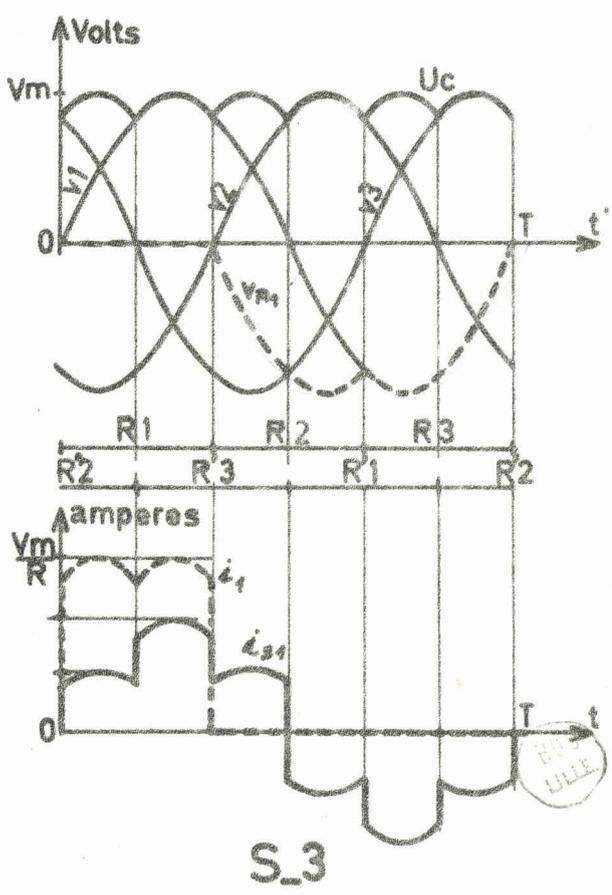
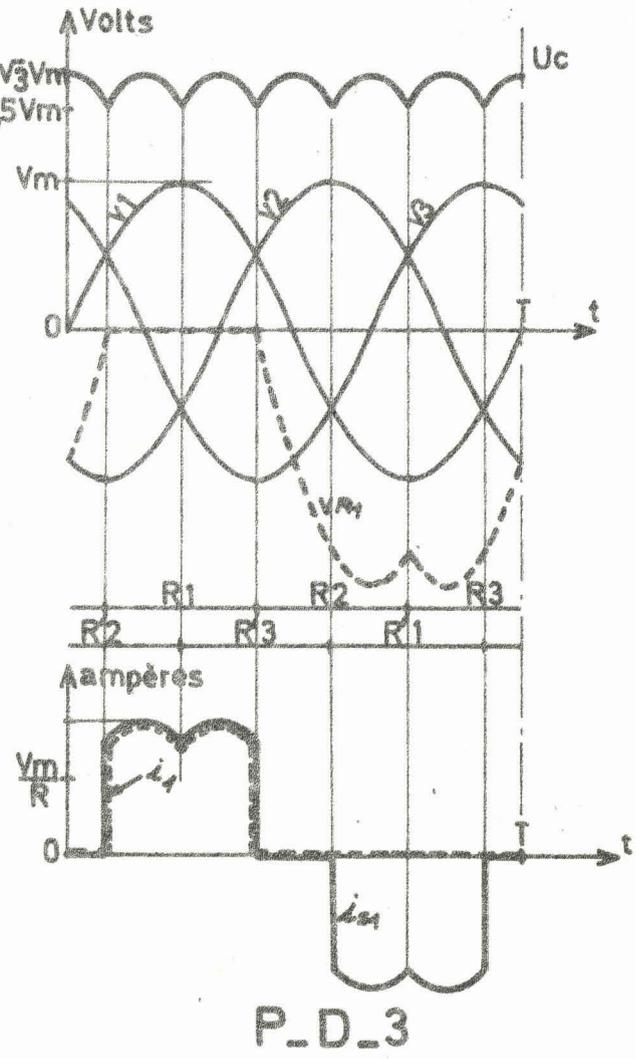
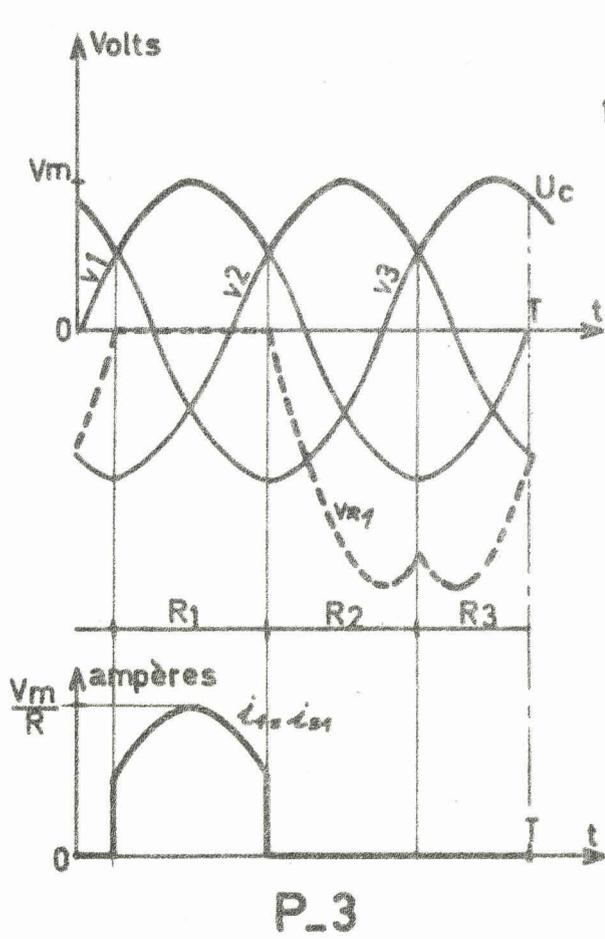


Figure 2. - Détermination de la forme d'onde des tensions u_c et v_{R1} , des courants i_1 et i_{s1} , pour $q = 3$ et un récepteur résistant.

- P.3. montage à commutation parallèle
- P.D.3. montage à commutation parallèle double
- S.3. montage à commutation série.



02. VOIE ADOPTÉE POUR L'ÉTUDE GÉNÉRALE

L'étude d'un montage redresseur effectuée en tenant compte d'une part de la nature du récepteur placé du côté continu, d'autre part des causes de chute de tension internes au montage conduit à des calculs très compliqués et ne donne pas de relation générale utilisable. Ainsi, P. VANDEPLANQUE^[15], pour tracer la caractéristique du montage P.D.3 à diodes débitant sur une charge purement résistive en tenant compte simultanément de la résistance et de la réactance supposées constantes et ramenées à chaque phase secondaire, a dû avoir recours à un ordinateur puissant pour déterminer la courbe point par point.

Les travaux sur les redresseurs ont permis finalement d'établir une méthode générale, valable pour tous les montages et conduisant à des résultats d'une bonne précision comme l'ont confirmé toutes les vérifications expérimentales. Cette méthode, devenue classique, suit une VOIE étroitement guidée par des hypothèses. On y admet que le courant redressé est parfaitement lissé pour ne pas devoir tenir compte de la nature du récepteur et on procède par étapes successives où chacune utilise les résultats de la précédente et prépare la suivante.

Examinons ces étapes et les hypothèses qui les caractérisent :

1ère étape : étude des tensions

Effectuée en négligeant toutes les causes de chute de tension, notamment le phénomène d'empiètement.

Elle donne :

- le redresseur de chaque série conducteur à chaque instant, donc le fonctionnement du montage.
- la tension redressée à vide de valeur moyenne U_{CO} .
- la tension inverse à vide aux bornes des redresseurs.

2ème étape : étude des courants

Effectuée en négligeant l'empiètement.

A l'aide du diagramme des conductions des redresseurs établi précédemment, cette étape donne en fonction du courant redressé I_C :

- le courant dans les redresseurs,
- le courant dans les enroulements secondaires,
- le courant primaire, à l'aide de relations générales entre ampères - tours secondaires et primaires.

3ème étape : chute de tension en fonctionnement normal en ajoutant les chutes de tension évaluées séparément.

Par fonctionnement normal on entend les divers régimes compris entre la marche à vide et la marche à régime nominal ; la chute de tension totale y est relativement faible et l'angle d'empiètement réduit.

On détermine la chute de tension ΔU_C en additionnant

- la chute due aux réactances,
- la chute due aux résistances,
- la chute due aux redresseurs,

chacune d'elles étant évaluée en supposant que les courants sont ceux établis dans la deuxième étape.

4ème étape : reste de la caractéristique de tension en ne tenant compte que des réactances.

L'étape précédente a permis de calculer, pour chaque valeur de I_C , la tension redressée moyenne $U_C = U_{C0} - \Delta U_C$ donc de tracer le début de la caractéristique de tension $U_C = f(I_C)$.

Pour prolonger celle-ci jusqu'au point de court-circuit on ne saurait utiliser les courants établis lors de la deuxième étape car l'empiètement devient très important. Pour pouvoir mener à bien les calculs donnant le reste de la caractéristique on ne tient compte que de la principale cause chute de tension, les réactances. Cette détermination reste, malgré cela, très laborieuse.

Il faut utiliser ce processus pour l'étude du montage d'abord en commutation naturelle, puis en commutation retardée car les résultats trouvés pour le montage à diodes sont en partie utilisables lorsqu'on leur substitue des thyristors, de plus les calculs effectués facilitent ceux, plus compliqués, qui correspondent au fonctionnement en commutation retardée.

MONTAGE	Parallèle (P)		Parallèle double PD		Série (S)	
	q pair	q impair	q pair	q impair	q pair	q impair
Uc	n	q	q	2q	q	2q
	ωC	pour $\frac{I \cdot I_c \cdot t}{4 \cdot 2q}$ $\omega C = V_m \sin \omega t$	$\frac{I \cdot I_c \cdot t}{4 \cdot 2q}$ $\omega C = 2V_m \sin \omega t$	$\frac{I \cdot I_c \cdot t}{4 \cdot 2q}$ $\omega C = 2V_m \sin \omega t$	$0 < t < \frac{T}{q}$ $\omega C = \frac{2V_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{q})}{2 \sin \frac{\pi}{q}}$	$0 < t < \frac{T}{2q}$ $\omega C = \frac{2V_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2q})}{2 \sin \frac{\pi}{2q}}$
	U_{CO}	$\frac{q}{\pi} V_m \sin \frac{\pi}{q}$	$\frac{2q}{\pi} V_m \sin \frac{\pi}{q}$	$\frac{q}{\pi} V_m$		
	Ko	$\frac{\pi}{2q} \frac{1 - \cos \frac{\pi}{q}}{\sin \frac{\pi}{q}}$	$\frac{\pi}{2q} \frac{1 - \cos \frac{\pi}{q}}{\sin \frac{\pi}{q}}$	$\frac{\pi}{2q} \frac{1 - \cos \frac{\pi}{q}}{\sin \frac{\pi}{q}}$	$\frac{\pi}{2q} \frac{1 - \cos \frac{\pi}{q}}{\sin \frac{\pi}{q}}$	$\frac{\pi}{4q} \frac{1 - \cos \frac{\pi}{2q}}{\sin \frac{\pi}{2q}}$
	$V_i \text{ max}$	2 Vm	$2V_m \cos \frac{\pi}{2q}$	2 Vm	$2V_m \cos \frac{\pi}{2q}$	$\frac{V_m}{2 \sin \frac{\pi}{2q}}$
Diodes	I_c/q					
	$i \text{ moy}$					
Secondaires	Is	I_c/\sqrt{q}		$I_c\sqrt{q}$	$I_c/2$	$I_c\sqrt{q-1}$
	f s	$\frac{\sqrt{2q}}{\pi} \sin \frac{\pi}{q}$		$\frac{2\sqrt{q}}{\pi} \sin \frac{\pi}{q}$	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0.90$	$0.90 \frac{q}{\sqrt{q^2-1}}$
ΔU_c	$\alpha \frac{d}{dt}(I_c)$	$\frac{d \cos \alpha}{dt} = \frac{N_2 \omega I_c}{V_m \sin \frac{\pi}{q}}$		$\frac{d \cos \alpha}{dt} = \frac{N_2 \omega I_c}{V_m \sin \frac{\pi}{q}}$	$\frac{d \cos \alpha}{dt} = \frac{N_2 \omega I_c}{V_m}$	$\frac{d \cos \alpha}{dt} = \frac{N_2 \omega I_c}{V_m}$
	$\Delta_1 U_c$	$\frac{q}{2\pi} N_2 \omega I_c$		$\frac{q}{\pi} N_2 \omega I_c$	$\frac{q}{2\pi} N_2 \omega I_c$	$\frac{q}{2\pi} N_2 \omega I_c \cdot \frac{1}{\sqrt{q^2-1}}$
	$\Delta_2 U_c$	$R_c \cdot I_c$				
	$\Delta_3 U_c$	$(\omega) I_c$		$2(\omega) I_c$		$2(\omega) I_c$

TABLEAU I. - Principales relations obtenues lors de l'étude des montages redresseurs fonctionnant en commutation naturelle et débitant sur un récepteur d'inductance infinie.

03. RESULTATS TROUVES POUR LES MONTAGES A DIODES

Rappelons les résultats établis dans le cas du courant redressé d'ondulation négligeable. Ces relations serviront de référence pour l'étude des effets de la nature du récepteur ; nous avons groupé les plus importantes dans le tableau I.

Il donne,

pour la tension redressée à vide :

- son ordre n , c'est-à-dire le nombre de sommets de sinusoïdes formant u_c durant une période T des tensions d'alimentation.
- son expression durant l'une de ses périodes.
- sa valeur moyenne U_{CO} .
- son facteur d'ondulation K_0 défini par :

$$K_0 = \frac{u_c \max - u_c \min}{2 U_{CO}}$$

pour les diodes :

- leur tension inverse maximale $V_i \max$
- leur courant direct moyen $i \text{ moy}$

pour les enroulements secondaires :

- la valeur efficace I_s
- le facteur de puissance f_s défini par

$$f_s = \frac{U_{CO} I_c}{\frac{V_m}{\sqrt{2}} I_s}$$

pour les chutes de tension en fonctionnement normal :

- la relation donnant l'angle d'empiètement α
- celle donnant la chute de tension $\Delta_1 U_c$ due aux réactances
- l'expression de la chute $\Delta_2 U_c$ due aux résistances.
- l'expression de celle $\Delta_3 U_c$ due aux diodes conductrices ;
(u) I_c indique la chute de tension lue sur la caractéristique des diodes utilisées pour un courant direct I_c .

Quelques remarques sont nécessaires pour expliquer l'établissement des relations reportées dans ce tableau ou la façon de les utiliser :

a) les relations (2), (3), (4), (5) et (6) découlent de la première étape de la méthode générale. Celles notées (7), (8) et (9) de la deuxième.

b) pour passer des courants secondaires aux courants primaires, on utilise les équations suivantes déduites de la compensation des ampères - tours :

- pour un circuit magnétique monophasé, le courant i_p dans l'enroulement primaire de n_1 spires est donné par

$$n_1 i_p = \sum n_2 i_s \quad (10)$$

en désignant par $\sum n_2 i_s$ la somme des A.T. secondaires tous comptés dans le sens opposé à celui adopté pour les A.T. primaires et déduction faite de la valeur moyenne de cette somme si elle existe.

- pour un circuit magnétique triphasé, les relations donnant les courants i_{p1} , i_{p2} , i_{p3} dans les trois bobines primaires de n_1 tours dépendent du couplage de ces bobines.

- si les enroulements primaires sont groupés en triangle,

$$\begin{array}{rcl} n_1 i_{p1} = \sum_{N_1} n_2 i_s, &) & \\ &) & \\ n_1 i_{p2} = \sum_{N_2} n_2 i_s, &) & (11) \\ &) & \\ n_1 i_{p3} = \sum_{N_3} n_2 i_s, &) & \end{array}$$

En désignant par $\sum_{N_1} n_2 i_s$ la somme des A.T. secondaires du noyau 1 déduction faite de la valeur moyenne de cette somme s'il y en a une.

Les courants en ligne, désignés par j_{p1} , j_{p2} et j_{p3} , se déduisent directement des courants dans les enroulements

$$\begin{array}{rcl} j_{p1} = i_{p1} - i_{p2} &) & \\ j_{p2} = i_{p2} - i_{p3} &) & (12) \\ j_{p3} = i_{p3} - i_{p1} &) & \end{array}$$

- Si les enroulements forment une étoile sans conducteur neutre,

$$\begin{aligned} n_1 i_{p1} &= \frac{2}{3} \left(\sum_{N_1} n_2 i_s - \frac{1}{2} \sum_{N_2} n_2 i_s - \frac{1}{2} \sum_{N_3} n_2 i_s \right) \\ n_1 i_{p2} &= \frac{2}{3} \left(\sum_{N_2} n_2 i_s - \frac{1}{2} \sum_{N_1} n_2 i_s - \frac{1}{2} \sum_{N_3} n_2 i_s \right) \\ n_1 i_{p3} &= \frac{2}{3} \left(\sum_{N_3} n_2 i_s - \frac{1}{2} \sum_{N_1} n_2 i_s - \frac{1}{2} \sum_{N_2} n_2 i_s \right) \end{aligned} \quad (13)$$

Ce système d'équations n'est équivalent au système (11) que si la somme des A.T. secondaires est nulle, c'est-à-dire si

$$\sum_{N_1} n_2 i_s + \sum_{N_2} n_2 i_s + \sum_{N_3} n_2 i_s = 0. \quad (13')$$

c) La réactance $N_2 \omega$ intervenant dans les relations (14) et (15) est la réactance de fuite du transformateur et celle du réseau amont ramenées à chaque enroulement secondaire.

Les relations (14) donnent l'angle de recouvrement des phases conductrices des diodes consécutives de la même série. Les relations (15) qui ont été établies en supposant que cet angle est assez faible ne sont valables que

pour $\alpha < \frac{2\pi}{q}$, montages P. et P.D. ou S. à q pair.

pour $\alpha < \frac{\pi}{q}$, montages P.D. ou S. à q impair.

d) Pour calculer la résistance équivalente au montage ramenée du côté continu R_c on remarque que les relations (8), (10), (11), (12) et (13) permettent d'exprimer tous les courants en fonction du courant redressé I_c . Les pertes Joule totales peuvent être mises sous la forme

$$P_j = q r_2 I_s^2 + q_1 r_1 I_p^2 + q_1 r'_1 J_p^2,$$

avec q et q_1 , nombres de phases secondaires et primaires r_2 , r_1 et r'_1 , résistances des enroulements secondaires du transformateur, des enroulements primaires et du réseau amont.

I_s , I_p et J_p , intensités efficaces correspondantes.

Les pertes Joule peuvent s'écrire

$$P_j = R_c I_c^2$$

et la chute ohmique $\Delta_2 U_c = R_c I_c$.

04. RESULTATS TROUVES POUR LES MONTAGES A THYRISTORS

En remplaçant les diodes par des redresseurs à électrode de commande, on peut retarder l'instant où, à chaque période, les redresseurs entrent en conduction. Cela permet, à partir des q tensions alternatives d'amplitude V_m constante, d'obtenir une tension redressée de valeur moyenne variable.

Pour les trois types de montages correspondant aux trois modes de commutation, on peut substituer des thyristors à toutes les diodes, on obtient ainsi des montages tout thyristors.

En commutation parallèle double et en commutation série, on a la possibilité de conserver une série de diodes, R'_1, R'_2, \dots, R'_q et de ne remplacer par des thyristors que celles de la série R_1, R_2, \dots, R_q . Les montages ainsi réalisés sont appelés montages mixtes.

Dans les deux cas on caractérise le fonctionnement par l'angle de retard ψ . Les redresseurs commandés sont débloqués $\frac{\psi}{\omega}$ après l'instant où ils entraient en conduction en commutation naturelle pour laquelle les relations établies correspondent donc à ψ nul. Rappelons comment elles se trouvent modifiées, toujours dans le cadre de l'hypothèse du courant redressé constant I_c .

0.4.1. Montages tout thyristors

Chaque redresseur voit son intervalle de conduction décalé d'un angle ψ .

Tension redressée

La tension redressée u_c fournie par un même montage reste du même ordre n qu'en commutation naturelle. Mais au lieu d'être formée de n sommets de sinusoïdes par période T , elle est constituée de n portions de sinusoïdes.

Au cours de l'une de ses périodes $\frac{T}{n}$, la tension u_c aura la même expression que celle donnée par la relation (3) mais l'intervalle de validité de cette expression sera retardée de $\frac{\psi}{\omega}$. Ainsi,

- Montages P,

$$\frac{T}{4} - \frac{T}{2q} + \frac{\psi}{\omega} < t < \frac{T}{4} + \frac{T}{2q} + \frac{\psi}{\omega}, u_c = V_m \sin \omega t \quad (18)$$

- Montages P D,

q pair

$$\frac{T}{4} - \frac{T}{2q} + \frac{\psi}{\omega} < t < \frac{T}{4} + \frac{T}{2q} + \frac{\psi}{\omega}, u_c = 2 V_m \sin \omega t$$

q impair

$$\frac{T}{4} - \frac{T}{2q} + \frac{\psi}{\omega} < t < \frac{T}{4} + \frac{\psi}{\omega}, u_c = 2 V_m \cos \frac{\pi}{2q} \sin (\omega t + \frac{\pi}{2q})$$

- Montages S.

q pair

$$\frac{\psi}{\omega} < t < \frac{T}{q} + \frac{\psi}{\omega}, u_c = \frac{V_m}{\sin \frac{\pi}{q}} \cos (\omega t - \frac{\pi}{q})$$

q impair

$$\frac{\psi}{\omega} < t < \frac{T}{2q} + \frac{\psi}{\omega}, u_c = \frac{V_m}{2 \sin \frac{\pi}{2q}} \cos (\omega t - \frac{\pi}{2q})$$

Pour tous les montages, la valeur moyenne de u_c se déduit de celle trouvée en commutation naturelle par

$$U_{c0} = (U_{c0})_{\psi=0} \cos \psi ; \quad (19)$$

en faisant varier ψ de 0 à π , on fait passer U_{c0} de + $(U_{c0})_{\psi=0}$ à - $(U_{c0})_{\psi=0}$. Les valeurs négatives de la tension redressée moyenne correspondent à la marche en onduleur ; les montages tout thyristors sont "réversibles en tension".

L'ondulation de la tension redressée s'accroît au fur et à mesure que $|\cos \psi|$ diminue. Quel que soit le montage,

$$\begin{aligned} \text{pour } 0 < \psi < \frac{\pi}{n}, K_o &= \frac{\pi}{2n} \frac{1 - \cos (\frac{\pi}{n} + \psi)}{\sin \frac{\pi}{n} \cos \psi} &) \\ & &) \\ & &) \\ \text{pour } \frac{\pi}{n} < \psi < \frac{\pi}{2}, K_o &= \frac{\pi}{n} \operatorname{tg} \psi &) \\ & &) \end{aligned} \quad (20)$$

n étant égal à q ou à 2q suivant le mode de commutation et la parité du nombre de phases.

La courbe $K_0 = f(\psi)$ pour ψ allant de 0 à π est symétrique par rapport à $\psi = \frac{\pi}{2}$.

La tension inverse maximale aux bornes des redresseurs conserve, lorsque l'angle ψ est faible, la même valeur qu'en commutation naturelle. Ce seront encore les relations (6) qui guideront, à ce point de vue, le choix des thyristors.

Au-delà d'une certaine valeur de ψ , v_i max diminue. Aux bornes du redresseur non encore débloqué apparaît une tension directe de plus en plus élevée. Le redresseur doit pouvoir supporter sans amorçage une tension directe maximale égale à la tension inverse maximale à ψ nul.

Courants et facteurs de puissance

Les courants dans les redresseurs, dans les enroulements secondaires et primaires du transformateur, dans la ligne d'alimentation ont les mêmes formes d'ondes qu'en commutation naturelle, elles présentent simplement un retard de ψ / ω .

Les relations (7), (8), ainsi que celles établies pour les courants primaires pour chaque montage sont encore applicables :

$$\begin{aligned} i_{\text{moy}} &= \{i_{\text{moy}}\}_{\psi=0} & I_s &= \{I_s\}_{\psi=0} \\ I_p &= \{I_p\}_{\psi=0} & J_p &= \{J_p\}_{\psi=0} \end{aligned}$$

A I_c donné, la puissance active du côté continu $U_{c0} I_c$ diminue au fur et à mesure que $|\cos \psi|$ diminue alors que les tensions, les courants et donc les puissances apparentes du côté alternatif restent les mêmes. Les facteurs de puissance au secondaire, au primaire et en ligne diminuent comme $|\cos \psi|$.

$$\begin{aligned} f_s &= \{f_s\}_{\psi=0} |\cos \psi| \\ f_p &= \{f_p\}_{\psi=0} |\cos \psi| \\ f_l &= \{f_l\}_{\psi=0} |\cos \psi| \end{aligned} \quad (21)$$

Chute de tension

Les courants ayant la même valeur qu'en commutation naturelle, les chutes de tension $\Delta_2 U_C$ due aux résistances et $\Delta_3 U_C$ due aux redresseurs sont toujours données par les relations (16) et (17).

L'angle d'empiètement et la chute de tension correspondante $\Delta_1 U_C$ diminuent en même temps que $|\cos \psi|$.

Pour concrétiser ces remarques générales et montrer les différences avec les résultats obtenus avec le montage mixte que nous étudierons dans la deuxième partie, nous avons tracé (figure 3) les formes d'ondes des tensions U_C et v_{R_1} et du courant secondaire i_{s_1} du montage P.D.3 débitant un courant constant I_C .

Le courant i_1 dans le redresseur R_1 est égal à i_{s_1} pendant l'alternance positive de ce dernier, nul pendant l'alternance négative (alors $i_{R_1} = -i_{s_1}$).

0.4.2. Montages mixtes

L'emploi de q diodes et de q thyristors, pour redresser un ensemble de q tensions sinusoïdales n'est possible qu'en commutation parallèle double ou en commutation série.

Tension redressée

La tension redressée est d'ordre q même si le nombre de phases est impair. A chacune de ses périodes, u_C est formée de deux portions de sinusoïdes ou, pour les fortes valeurs de l'angle de retard ψ , d'une portion de sinusoïde et d'un segment à tension nulle.

La valeur instantanée de u_C ne peut s'inverser, sa valeur moyenne U_{CO} s'annule par accroissement et jonction des segments à u_C nul.

U_{CO} est donné par la relation

$$U_{CO} = (U_{CO})_{\psi=0} \frac{1 + \cos \psi}{2} \quad (22)$$

La réversibilité en tension n'est donc pas possible.

L'ondulation de la tension redressée est plus faible que pour un montage tout thyristors fournissant une tension redressée du même ordre.

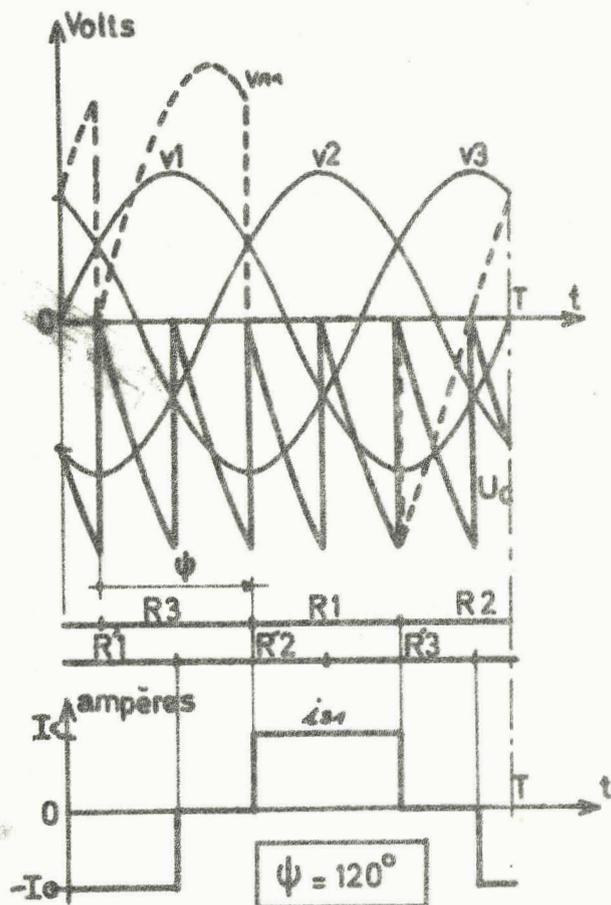
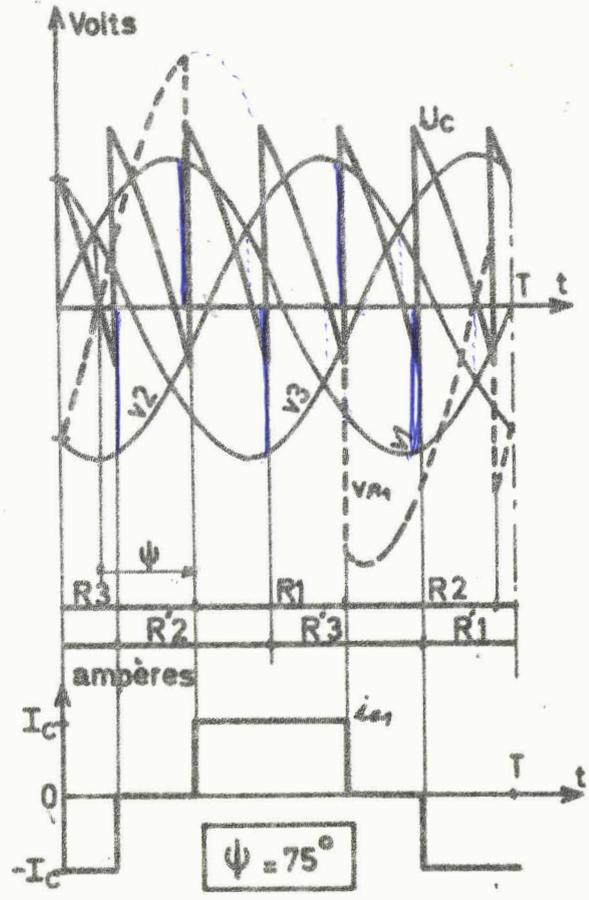
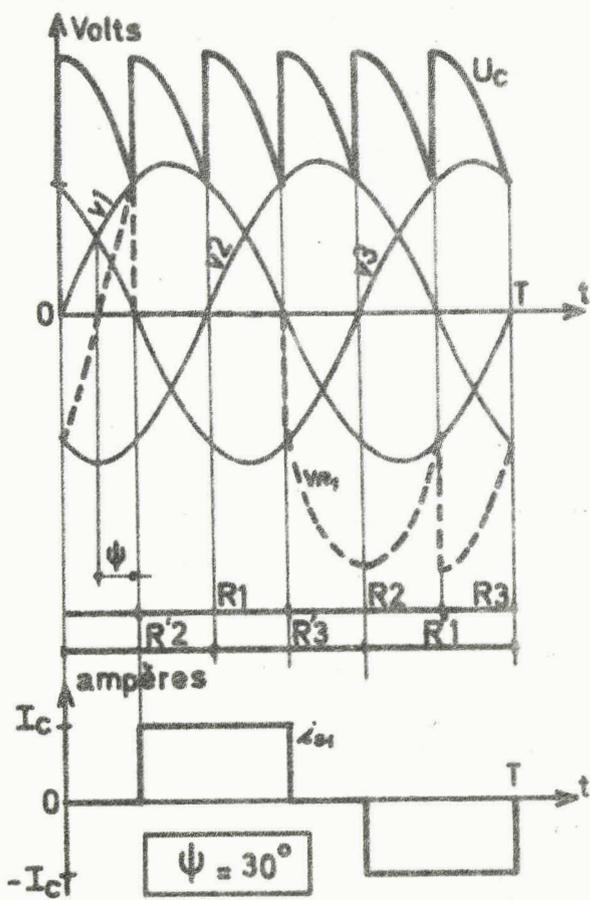


Figure 3. - Détermination des formes d'ondes des tensions u_c, v_{R1} et du courant i_{s1}

Cas du montage P.D. 3 tout thyristors débitant un courant constant I_c

(tracé effectué pour trois valeurs de l'angle ψ)

Les relations (6) donnent toujours la tension inverse maximale permettant le choix des thyristors.

Courants et facteurs de puissance

Comme pour tous les autres montages, chaque redresseur écoule le courant I_C pendant un $\frac{1}{q}$ de la période T . On a encore

$$i_{moy} = I_C/q$$

Mais les relations établies pour les courants secondaires et primaires cessent d'être applicables. En effet, chaque intervalle à tension nulle correspond au débit simultané de la diode et du thyristor réunis à la même borne secondaire; le passage de I_C dans le récepteur ne suppose plus l'existence de courants dans les enroulements. Les montages mixtes assurent donc une certaine diminution de I_S , I_P et J_P quand la tension redressée U_{C0} diminue.

Ainsi, en commutation parallèle double,

$$\begin{aligned} I_S &= I_C \sqrt{\frac{2}{q}}, \text{ pour } 0 < \psi < \pi - \frac{2\pi}{q} &) \\ I_S &= I_C \sqrt{1 - \frac{\psi}{\pi}}, \text{ pour } \pi - \frac{2\pi}{q} < \psi < \pi &) \end{aligned} \quad (23)$$

Les facteurs de puissance secondaire, primaire et en ligne diminuent moins vite que la tension redressée. Les expressions précédentes de I_S donnent pour le secondaire

$$\begin{aligned} f_S &= \frac{\sqrt{q}}{\pi} \sin \frac{\pi}{q} (1 + \cos \psi), \text{ si } 0 < \psi < \pi - \frac{2\pi}{q} & (24) \\ f_S &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} \sqrt{\frac{\pi}{\pi - \psi}} \sin \frac{\pi}{q} (1 + \cos \psi), \text{ si } \pi - \frac{2\pi}{q} < \psi < \pi \end{aligned}$$

Pour les montages à commutation série, les expressions générales de I_S et f_S sont un peu plus complexes. Mais pour $q = 3$, f_S est donné par la même relation que pour le montage P.D.3 ; pour les nombres de phases plus élevés on peut utiliser avec une bonne approximation les lois de variation établies pour q infini :

$$\begin{aligned} I_S &= \frac{I_C}{2} \sqrt{1 - \frac{\psi}{\pi}} \\ f_S &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{1 + \cos \psi}{\sqrt{1 - \frac{\psi}{\pi}}} \end{aligned}$$

Chute de tension

Si la chute de tension $\Delta_3 U_C$ dans les redresseurs est toujours donnée par

$$\Delta_3 U_C = 2 (u) I_C$$

les deux autres, $\Delta_1 U_C$ et $\Delta_2 U_C$ sont modifiées.

La chute inductive $\Delta_1 U_C$ diminue au fur et à mesure que U_{C0} se rapproche de zéro. Il en est de même de la chute ohmique $\Delta_2 U_C$ puisque, quand l'angle ψ augmente les rapports $\frac{I_s}{I_C}$, $\frac{I_p}{I_C}$ et $\frac{J_D}{I_C}$ diminuent.

C'est la diminution des courants dans les enroulements et en ligne accompagnant celle de la tension redressée qui constitue la principale supériorité des montages mixtes sur les montages tout thyristors.

A courant I_C donné, quand la puissance $U_{C0} I_C$ diminue, les pertes Joule du montage ne restent pas constantes mais sont elles aussi, réduites. Le rendement se détériore moins lorsqu'on réduit U_{C0} que pour les montages qui n'utilisent que des redresseurs à électrode de commande. Les montages mixtes, par ailleurs moins coûteux, mais dont l'étude est plus complexe, se révèlent les plus avantageux quand la réversibilité en tension n'est pas nécessaire. C'est à l'un deux, le P.D.3 mixte, que nous appliquerons les procédés généraux de correction des caractéristiques.

0.5. SIGNIFICATION DE L'HYPOTHESE DU COURANT REDRESSE CONSTANT

A la fin de son étude générale des montages redresseurs, G. SEGUIER [14] insiste sur les deux principales conséquences de l'hypothèse du courant redressé constant :

- la continuité de la conduction,
- l'unicité de la caractéristique statique.

Il montre dans quelles conditions on doit retoucher sérieusement les résultats obtenus en admettant cette hypothèse

0.5.1. La continuité de la conduction

Admettre que le courant redressé est constant, c'est surtout supposer que le courant i_c , qui sort par le point de jonction des cathodes ne s'annule jamais donc qu'il y a toujours un ou plusieurs redresseurs en conduction et que le montage débite en permanence.

L'appareil placé à la sortie du montage est alors continuellement relié au côté alternatif qui impose sans interruption la tension redressée. La continuité de la conduction permet au montage de toujours fournir la tension de sortie qu'il TEND à fournir.

Lorsque la conduction des redresseurs est, par intervalles, interrompue, c'est la description même du fonctionnement du montage qui doit être reprise. Les premières relations, relatives aux tensions à vide, doivent être modifiées.

0.5.2. L'unicité de la caractéristique $U_c(I_c)$

L'hypothèse de i_c constant permet pour un montage donné travaillant à ψ donné de tracer la forme d'onde des divers courants et d'établir LA relation liant chacun d'eux à I_c . On en déduit la valeur des diverses chutes de tension, ce qui permet de tracer une seule caractéristique statique $U_c(I_c)$. L'intersection avec celle-ci de la caractéristique $U_c(I_c)$ du récepteur donne le point de fonctionnement.

On procède comme pour une génératrice à courant continu à collecteur où l'on ne trace, pour chaque valeur du courant d'excitation, qu'une seule caractéristique ; la tension fournie par la machine étant supposée sans ondulation résiduelle, la forme d'onde du courant ne dépend pas de la nature du récepteur et la caractéristique tracée est utilisable pour tous les types de charges.

Or la tension à la sortie d'un montage redresseur n'est pas constante et, même si la conduction est continue, la nature du récepteur modifie le tracé de la caractéristique statique.

0.5.3. Importance des corrections à effectuer

La comparaison avec la dynamo à collecteur permet d'entrevoir dans quelles conditions les résultats obtenus dans l'étude générale, à courant redressé constant, pourront nécessiter des corrections notables. Moins la tension redressée tend à être ondulée moins la nature du récepteur intervient.

En commutation naturelle, lorsque l'ordre de la tension redressée est égal à 6 ou plus, l'ondulation est faible et l'on peut utiliser, avec une bonne approximation les résultats de l'étude générale surtout si le récepteur présente quelque inductance. Il n'y a que pour les montages d'ordre 3 (P.3) et surtout ceux d'ordre 2 (P.2 ou P.D.2) que l'influence de la nature du récepteur peut intervenir notablement.

En commutatrice retardée, il en est autrement. L'ondulation de la tension redressée que le montage tend à délivrer présente une ondulation qui croît rapidement quand la valeur moyenne U_{C_0} diminue. Plus la tension est d'ordre faible, plus U_{C_0} est relativement réduit et plus la réactance de l'appareil placé du côté continu est faible, plus les corrections à apporter à l'étude générale sont notables.

A la limite, nous pensons ici au travail de J. LESENNE [16] sur le pont à quatre thyristors alimenté en monophasé fonctionnant avec un angle ψ très voisin de 90° , on arrive à des résultats qui ne ressemblent presque plus à ceux de l'étude générale.

0.6. PLAN DE L'ETUDE EFFECTUEE

Désirant montrer l'influence de la nature du récepteur sur le fonctionnement des montages redresseurs et devant l'ampleur du problème soulevé il nous a semblé nécessaire de diviser notre travail en deux parties.

Dans la première, générale car applicable à tous les montages redresseurs polyphasés ⁽¹⁾, nous indiquerons les méthodes de correction des résultats de l'étude générale de ces montages, effectuée avec l'hypothèse du courant redressé constant.

Nous nous tiendrons le plus près possible de celle-ci en montrant en quoi chacune des étapes de cette étude est ou n'est pas affectée par la nature du récepteur.

Nous signalerons les résultats et les relations encore utilisables. Pour ceux qui ne le sont pas nous montrerons comment calculer les quelques coefficients de correction qui permettent de s'y référer.

Dans la seconde partie, nous appliquerons ces procédés au montage mixte triphasé en pont en raison de l'intérêt exceptionnel qu'il présente.

Nous envisagerons successivement les trois types classiques de récepteurs :

- récepteur purement résistant,
- récepteur résistant et inductif.
- récepteur comportant en série une résistance, une réactance et une force contre - électromotrice.

Il n'y a pas lieu de prévoir la marche en onduleur, avec force électromotrice du côté continu, puisque ce montage n'est pas réversible.

(1) Seul le montage monophasé simple alternance n'entre pas dans ce cadre. M. LECORGUILLIER [17] a consacré un de ses ouvrages à ce montage particulier qui a d'importantes applications mais ne sert guère pour la transformation alternatif - continu.

I. METHODES DE CORRECTION PERMETTANT DE TENIR
COMPTE DE LA NATURE DU RECEPTEUR

Lorsqu'un montage redresseur débite sur un récepteur dont on ne pourrait plus supposer infinie la réactance, il est possible d'utiliser les résultats obtenus en admettant cette hypothèse en affectant certains de coefficients de correction. Cette méthode évite de recommencer pour chaque montage et pour chaque type de charge la totalité des calculs.

Dans cette première partie, nous nous proposons d'établir les procédés généraux de correction applicables à tous les montages et d'indiquer quelques simplifications possibles.

Nous suivrons les étapes de l'étude classique en nous limitant aux trois premières :

- étude du fonctionnement et des tensions,
- relations entre courants,
- chutes de tension,

et en adoptant les mêmes hypothèses sauf celle de la constance du courant redressé.

Il est inutile de revenir sur le tracé de la caractéristique totale car plus on se rapproche du court - circuit moins la nature du récepteur intervient.

De même nous n'envisagerons pas le cas de la marche en onduteur parce qu'elle pose un certain nombre de problèmes particuliers et que nombre de montages redresseurs, montages à diodes et montages mixtes, ne permettent pas l'inversion du sens d'écoulement de la puissance active.

I.1 ETUDE DU FONCTIONNEMENT ET DES TENSIONS

Il est essentiel quel que soit le montage, de déterminer d'abord pour quelles valeurs des paramètres qui caractérisent le récepteur la conduction du montage cesse d'être continue.

I.1.1 Conduction continue ou discontinue

L'étude générale effectuée en supposant i_c constant donne la tension u_c que tend à fournir le montage.

Quand le courant redressé i_c est positif, la tension u'_c (1) est égale à u_c , la charge est réunie à la source des tensions alternatives par le débit d'un ou plusieurs redresseurs.

Durant les intervalles où supposer l'égalité de u'_c et de u_c conduirait à une valeur négative de i_c , le récepteur est séparé du montage redresseur et évolue suivant son régime libre. En effet, i_c sort par le point de jonction des cathodes et ne peut être que positif (débit de redresseurs) ou nul (tous les redresseurs bloqués).

Au cours de chacune des périodes $\frac{T}{n}$ de la tension u_c le schéma équivalent au montage peut être successivement celui des figures 4a et 4b (régime à conduction discontinue) ou toujours celui de la figure 4a (régime à conduction continue).

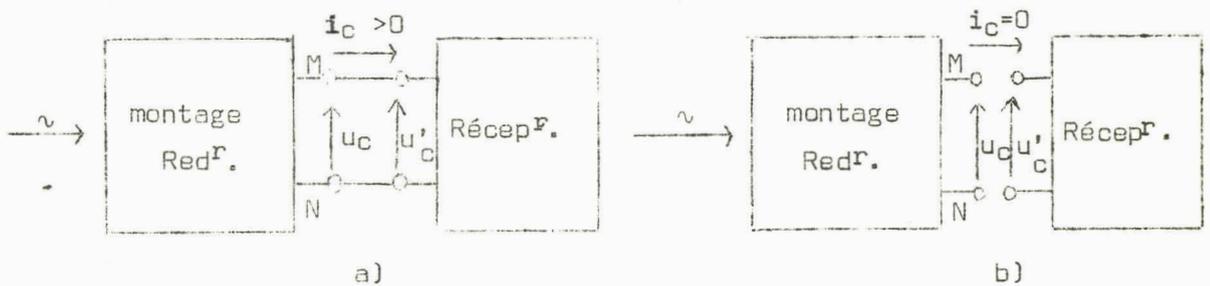


Figure 4. Représentation schématique des deux liaisons possibles entre un montage redresseur donné et un récepteur :
 a) lorsque le montage débite
 b) lorsque tous les redresseurs sont bloqués.

(1) Nous avons affecté d'un accent les lettres indiquant les grandeurs qui sont ou peuvent être modifiées par le fait que le récepteur n'a pas une réactance infinie.

Lorsque, suivant la valeur du ou des paramètres caractérisant le récepteur, il est possible d'obtenir l'un ou l'autre des régimes, il faut déterminer dès le départ la ou les caractéristiques limites de conduction continue.

Ainsi, pour un récepteur de résistance R et d'inductance L , on tracera la courbe $Q_{lim} = f(\psi)$ avec $Q = \frac{L\omega}{R}$. Lorsque Q est supérieur à Q_{lim} on est en conduction continue, lorsque Q est inférieur à Q_{lim} la conduction est intermittente.

Pour déterminer les caractéristiques limites, le procédé le plus simple est d'établir l'expression du courant i_c dans le cas de la conduction discontinue. Le courant cesse d'être nul pour $t = t_0$ et redevient nul pour $t = t_1$. La valeur du paramètre qui rend t_1 égal à $t_0 + \frac{T}{n}$ donne la limite.

Ainsi dans le cas du récepteur R, L , le courant i_c , nul pour $t < t_0$ est donné par $Ri_c + L \frac{di_c}{dt} = u_c$ à partir de l'instant t_0 ; son expression permet de calculer en fonction de Q la seconde valeur de t , soit $t = t_1$, qui annule i_c . En faisant $t_1 = t_0 + \frac{T}{n}$ dans la relation donnant t_1 , on trouve la valeur de Q_{lim} (figure 5).

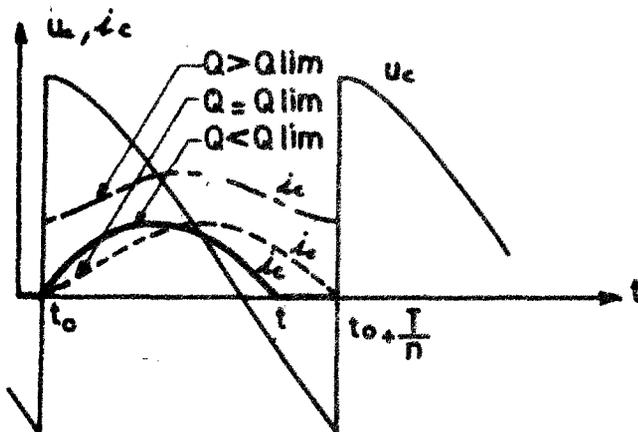


Figure 5. - Formes d'onde du courant dans un circuit R, L pour

- $Q < Q_{lim}$
- $Q = Q_{lim}$
- $Q > Q_{lim}$

I . 1 . 2. Fonctionnement en conduction continue

Lorsque i_c ne s'annule pas, le fonctionnement du montage est le même que lorsque i_c est constant.

- les intervalles de conduction des divers redresseurs sont les mêmes.

- la tension redressée a la même expression, la même valeur moyenne, le même taux d'ondulation.

$$\begin{aligned}u'_c &= u_c \\U'_{c0} &= U_{c0} \\K'_0 &= K_0\end{aligned}$$

- la tension aux bornes des redresseurs est la même et, en particulier :

$$v'_{imax} = v_{imax}$$

I.1.3. Fonctionnement en conduction discontinue

Pour tracer les caractéristiques donnant l'instant d'entrée en conduction, $t = t_0$ et l'instant marquant la fin de celle-ci, $t = t_1$, au cours d'une période de durée T/n , on remarque que :

- l'instant $t = t_0$, est tel que la tension u_c , inférieure à u'_c au cours de la phase de blocage, devient égale ou supérieure à cette tension.

$$(u_c)_{t_0} \geq (u'_c)_{t_0} \quad , \quad (25)$$

en prenant pour u'_c son expression durant l'intervalle où le montage ne débite pas.

- l'instant $t = t_1$, correspond au passage par zéro du courant i_c dont l'expression à partir de $t = t_0$ est déduite de la tension u_c , alors appliquée au récepteur.

$$(i_c)_{t_1} = 0 \quad (26)$$

Dans le cas d'un récepteur comportant des dérivations dont l'une au moins est inductive ou comprend une force contre-électromotrice, il est nécessaire de suivre l'évolution du régime du récepteur tout au long de la période $\frac{T}{n}$. Durant le blocage, il donne $u'_c(t)$ qui permet de déterminer t_0 ; durant la conduction, il donne $i_c(t)$ d'où t_1 .

La détermination de t_0 et t_1 est nettement simplifiée si le récepteur est un circuit simple, R ou R, L ou R, L, E. Le courant i_c nul correspond à une tension u'_c nulle (R ou R, L) ou constante (R,L,E), la détermination de l'instant $t = t_0$ est donc très aisée

$$(u_c)_{t_0} \geq 0 \text{ ou } E.$$

Le fait qu'il n'y ait aucun courant dans le récepteur pour $t < t_0$ facilite l'établissement de $i_c(t)$ pour $t > t_0$ et, par là, la détermination de t_1 .

La tension redressée u'_c , a, au cours de chacune de ses périodes, deux (ou trois) expressions successives.

- la première (ou les deux premières, cas des montages mixtes), correspond à l'intervalle de conduction où $u'_c = u_c$.
- la dernière à la phase de blocage où $u'_c \neq u_c$

$$U'_{c0} = \frac{N}{T} \left[\int_{t_0}^{t_1} u_c dt + \int_{t_1}^{t_0 + \frac{T}{n}} u'_c dt \right] \quad (27)$$

Il sera intéressant de montrer l'évolution de $\frac{U'_{c0}}{U_{c0}}$ en fonction des paramètres caractérisant le récepteur.

Puisque durant le blocage, la tension u'_c est supérieure à u_c , le rapport $\frac{U'_{c0}}{U_{c0}}$ est supérieur à l'unité, il se rapproche de celle-ci au fur et à mesure que l'on se rapproche de la conduction continue.

La détermination du facteur d'ondulation K'_0 de la tension redressée u'_c

$$K'_0 = \frac{u'_{cmax} - u'_{cmin}}{2 U'_{c0}}$$

dépend de la forme d'onde de u'_c durant l'intervalle où le courant i_c est nul. Pour la plupart des types de récepteurs, u'_c est alors décroissant ou constant (circuit sans dérivation) et c'est sur les portions de sinusoides où u'_c égale u_c que l'on pourra lire les extrema de la tension redressée (figure 6).

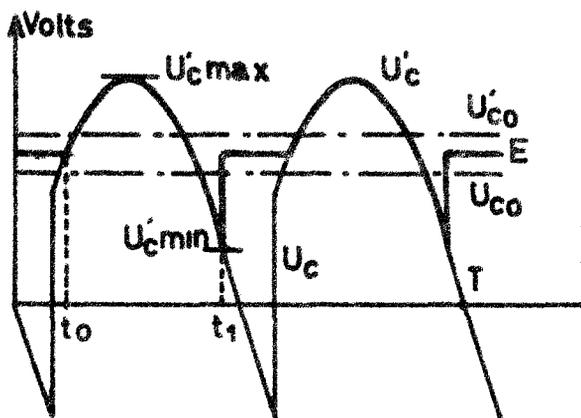


figure 6. Forme d'onde de la tension redressée u'_c lors du débit sur un récepteur R, L, E

La valeur maximale de la tension inverse dépend elle aussi des caractéristiques du récepteur, le fait que lors du blocage u'_c soit supérieur à u_c conduit à un $v_{i_{max}}$ plus grand que celui que donnerait la conduction continue.

I.2. ETUDE DES COURANTS

Que la conduction du montage redresseur soit ou non continue, abandonner l'hypothèse du courant redressé constant conduit à modifier les formes d'ondes de tous les courants.

On continuera toutefois à exprimer les valeurs de ceux-ci en fonction du courant redressé moyen I_c .

I.2.1. Courant redressé i_c

I.2.1.1. Expression et forme d'onde

En conduction continue, i_c est toujours positif ; son expression se déduit de celle de u_c . Pour les montages mixtes u_c ayant deux expressions successives par période T/n , il en est de même de i_c .

Si ce courant se déduit de u_c par une équation différentielle du premier ordre, la périodicité de i_c et le fait qu'il ne puisse subir de discontinuité donnent la constante d'intégration. Pour une équation différentielle du second ordre on utilise en plus la continuité de la dérivée première etc...

Il est intéressant de remarquer que, même pour le premier ordre, si $u_c(t)$ ne subit pas de discontinuité il en est de même de la dérivée de $i_c(t)$. La forme d'onde du courant redressé ne présente pas, dans ce cas, de point anguleux. Montrons le, par exemple, dans le cas du circuit R, L, E ; i_c est lié à u_c par

$$R i_c + L \frac{d i_c}{d t} = u_c - E$$

i_c ne peut être discontinu, si u_c ne l'est pas, il en sera de même de $\frac{d i_c}{d t}$.

Pour trouver les deux valeurs extrêmes de i_c , $i_{c_{max}}$ et $i_{c_{min}}$, il faudra chercher les deux instants où, à l'intérieur même de chacune de ses périodes, sa dérivée s'annule.

La figure 7 montre un exemple de forme d'onde tracée en tenant compte de cette remarque.

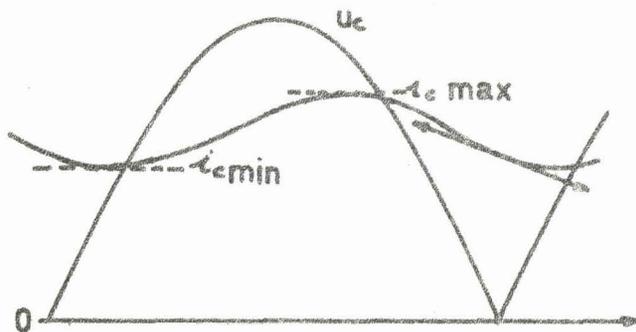


figure 7. Forme d'onde du courant i_c débité par un montage à diodes d'ordre 2 dans un récepteur résistant et inductif.

En conduction discontinue, i_c , différent de zéro entre les instants $t = t_0$ et $t = t_1$ est nul durant le reste de sa période T/n .

On déduit la ou les expressions de i_c pendant l'intervalle t_0, t_1 de celles donnant alors u_c . Suivant l'ordre de l'équation différentielle liant i_c à u_c , on utilisera la continuité de i_c , de i_c et de $\frac{di_c}{dt}$..., à l'instant $t = t_0$.

Si la tension aux bornes du récepteur ne présente pas de discontinuité à l'instant de l'entrée en conduction, la remarque précédente montre que, même pour un circuit du premier ordre, outre $(i_c)_{t_0} = 0$, on aura $\left(\frac{di_c}{dt}\right)_{t_0} = 0$

Ainsi dans le cas du circuit R, L, E, $\frac{di_c}{dt}$ s'annulera deux fois par période $\frac{T}{n}$ (pour $t = t_0$ et lors du passage de i_c par son maximum) ou une seule fois à l'instant permettant de calculer i_{cmax} . L'instant $t = t_1$ caractérisé par le fait que i_c s'annule mais non sa dérivée correspondra à une discontinuité de u_c' .

1.2.1.2. Valeurs moyenne et efficace

Pour calculer la valeur moyenne I_c du courant redressé, on peut partir de l'expression de i_c déduite de celle de u_c

$$I_c = \frac{n}{T} \int_{t_0}^{t_1} i_c dt.$$

Mais il est souvent possible d'éviter ce calcul et de déduire directement I_c de U'_{co} .

Pour un récepteur R, L, E par exemple pendant l'intervalle de conduction t_0, t_1 (avec t_1 inférieur ou égal à $t_0 + T/n$) i_c vérifie l'équation différentielle dont il est solution :

$$R i_c + L \frac{d i_c}{d t} = u'_c - E$$

En intégrant

$$R \int_{t_0}^{t_1} i_c dt + L \left[i_c \right]_{t_0}^{t_1} = \int_{t_0}^{t_1} u'_c dt - \int_{t_0}^{t_1} E dt$$

or $(i_c)_{t_0} = (i_c)_{t_1}$ quel que soit le mode de conduction

$$U'_{co} = \frac{n}{T} \int_{t_0}^{t_1} u'_c dt + \frac{n}{T} \int_{t_1}^{t_0 + \frac{T}{n}} E dt$$

D'où la valeur de I_c

$$I_c = \frac{U'_{co} - E}{R} \quad (28)$$

Un procédé analogue est applicable aux circuits régis par une équation différentielle du second ordre si $\frac{d i_c}{d t}$ a même valeur en début et en fin de conduction

$$a_1 i_c + a_2 \frac{d i_c}{d t} + a_3 \frac{d^2 i_c}{d t^2} = u'(t)$$

$$a_1 \int_{t_0}^{t_1} i_c dt + a_2 \left[i_c \right]_{t_0}^{t_1} + a_3 \left[\frac{d i_c}{d t} \right]_{t_0}^{t_1} = \int_{t_0}^{t_1} u'(t) dt$$

Puisque i_c et $\frac{d i_c}{d t}$ ont mêmes valeurs pour t_0 et t_1

$$I_c = \frac{n}{T} \int_{t_0}^{t_1} u'(t) dt$$

Le calcul de la valeur efficace I'_{ceff} du courant redressé

$$I'_{ceff} = \sqrt{\frac{n}{T} \int_{t_0}^{t_1} i_c^2 dt}$$

à partir de l'expression de i_c on peut conduire à des expressions très lourdes. Si i_c est la somme de j termes, il faut effectuer $\frac{j(j+1)}{2}$ intégrations.

Ici aussi il est souvent possible de procéder plus rapidement Reprenons le cas du récepteur R, L, E.

Durant l'intervalle t_0, t_1

$$R i_c + L \frac{di_c}{dt} = u'_c - E$$

Multiplions cette expression par sa solution $i_c(t)$ alors non nul :

$$R i_c^2 + L i_c \frac{di_c}{dt} = U'_c i_c - E i_c$$

et intégrons de t_0 à t_1

$$R \int_{t_0}^{t_1} i_c^2 dt + L \int_{t_0}^{t_1} i_c \frac{di_c}{dt} dt = \int_{t_0}^{t_1} (u'_c - E) i_c dt$$

$$\frac{T}{n} R I_{c \text{ eff}}^2 + \frac{L}{2} [i_c^2]_{t_0}^{t_1} = \int_{t_0}^{t_1} (u'_c - E) i_c dt$$

$$I_{c \text{ eff}}^2 = \frac{n}{TR} \int_{t_0}^{t_1} (u'_c - E) i_c dt \quad (29)$$

Dans le cas où l'expression de u_c est unique pendant T/n l'expression de i_c comporte 4 termes au lieu de dix intégrations de termes parfois compliqués, quatre intégrales simples suffiront.

Le facteur de forme du courant redressé,

$$f_F = \frac{I_{c \text{ eff}}}{I_c} \quad (30)$$

peut suffire à caractériser l'ondulation de i_c . Plus il est supérieur à l'unité plus on s'écarte d'un courant constant.

De toutes façons le calcul de f_F donne le coefficient de correction utilisable pour tous les courants secondaires, primaires, en ligne et donc pour la chute ohmique.

La puissance P'_c fournie au récepteur, qui servira à la détermination des facteurs de puissance, est donnée par

$$P'_c = \frac{n}{T} \int_{t_0}^{t_1} u'_c i_c dt, \quad (31)$$

on la calculera en même temps que la valeur efficace $I_{c \text{ eff}}$. La relation (29) qu'on aurait d'ailleurs pu établir à partir de la puissance, montre bien que

$$P'_c = R I_{c \text{ eff}}^2 \quad \text{pour } R, \text{ et } R, L$$

$$P'_c = R I_{c \text{ eff}}^2 + E I_c \quad \text{pour } R, L, E$$

1.2.1.3. Courant aux commutations

L'étude ultérieure de la chute de tension $\Delta_1 U'_c$ due aux réactances montrera qu'on peut, avec une bonne approximation, déduire $\Delta_1 U'_c$ du courant i_c à l'instant où débute un intervalle d'empiètement. En effet $\Delta_1 U'_c$ est sensiblement proportionnel au courant que l'entrée en conduction d'un nouveau redresseur doit transférer d'un enroulement secondaire au suivant.

Pour les montages où U'_c ne peut avoir qu'une expression par période T/n , il suffira donc dans l'expression de i_c de faire $t = t_0$ pour avoir $i_c(t_0)$, courant à l'entrée en débit d'un nouveau redresseur.

Le rapport $i_c(t_0) / I_c$ permettra de corriger l'expression de la chute inductive calculée en supposant i_c constant.

A noter que dans le cas de la conduction discontinue, $i_c(t_0)$ est nul.

Pour les montages mixtes, la tension u'_c peut présenter deux expressions successives par période T/n , quand au cours de cet intervalle deux redresseurs entrent successivement en conduction. Il est alors nécessaire de calculer deux valeurs instantanées de i_c .

Nous reviendrons sur ce cas dans l'application des méthodes exposées ici au montage en pont mixte triphasé.

1.2.2. Courant dans les redresseurs

Quel que soit le montage, chaque redresseur est chargé de l'écoulement du courant i_c durant la fraction $\frac{T}{q}$ de la période T des tensions d'alimentation.

$$\begin{aligned}
 i'_{\text{moy}} &= i_{\text{moy}} = \frac{I_c}{q} &) \\
 I' &= \frac{I'_c \text{ eff}}{\sqrt{q}} = f_F \frac{I_c}{\sqrt{q}} = f_F I &) \quad (31)
 \end{aligned}$$

Le rapport I' / I_c varie, quand i_c n'est pas constant, proportionnellement au facteur de forme f_F de ce courant.

I.2.3. Courant dans les enroulements secondaires

En commutation parallèle, chaque phase débite le même courant que redresseur réuni à son extrémité :

$$I'_s = \frac{I'_c \text{ eff}}{\sqrt{q}} = f_F I_s$$

En commutation parallèle double, pour les montages tout diodes ou tout thyristors, chaque enroulement est parcouru par i_c pendant $\frac{T}{q}$, par $-i_c$ pendant $\frac{T}{q}$.

$$I'_s = \sqrt{\frac{2}{q}} I'_c \text{ eff} = f_F I_s$$

En commutation série, pour les montages analogues, dans chaque enroulement il passe $\frac{i_c}{2}$ pendant une alternance - $\frac{i_c}{2}$ pendant l'autre si q est pair. Si q est impair, n est égal à $2q$ et non plus à q , il passe $\left| i_c \right| \frac{q-1}{2q}$ dans chaque phase pendant $\frac{n}{2} + 1$ intervalles de durée $\frac{T}{n}$ et $\left| i_c \right| \frac{q+1}{2q}$ durant les $\frac{n}{2} - 1$ autres. Que q soit pair ou impair on aura donc

$$I'_s = f_F I_s, \quad (32)$$

relation applicable à tous les montages redresseurs à l'exception des montages mixtes pour lesquels elle ne correspond qu'à certains régimes.

Pour les montages mixtes, en effet, il faut distinguer deux modes possibles de fonctionnement :

- pour les valeurs de l'angle ψ inférieurs à $\pi - \frac{2\pi}{q}$, deux redresseurs réunis à la même borne secondaire ne débitent jamais simultanément. Le courant i_c se répartit dans les enroulements comme lorsqu'on le supposait constant. On a encore

$$I'_s = f_F I_s$$

- pour les valeurs de ψ comprises entre $\pi - \frac{2\pi}{q}$ et π , i_c n'est fourni par les enroulements secondaires que par intermittence. Le rapport $\frac{i_s}{i_c}$ n'étant pas constant tout au long de la période $\frac{T}{n}$ du courant i_c , on ne peut déduire la valeur efficace du courant qui traverse le bobinage de celle du courant i_c , le rapport $\frac{I'_s}{I_s}$ n'a plus la même valeur que $\frac{I'_c \text{ eff}}{I_c}$

1.2.4. Courant primaire et en ligne

Les relations établies entre les valeurs instantanées des ampères - tours secondaires et primaires permettent de déduire les courants primaires de l'expression des courants secondaires et, par là, de celle du courant redressé.

Il faut examiner dans quelle mesure les relations entre valeurs efficaces qu'on en a déduites sont encore applicables.

1.2.4.1. Circuit magnétique monophasé

Le passage du secondaire au primaire s'opère à l'aide de l'égalité

$$n_1 i_p = \sum n_2 i_s$$

où $\sum n_2 i_s$ indique la somme des A.T. secondaires déduction faite de la valeur moyenne de cette somme s'il y en a une.

Pour les deux montages redresseurs alimentés en monophasé et industriellement utilisés, le montage redresseur double alternance P.2 et le montage en pont de Graëtz, la valeur moyenne des A.T. secondaires est nulle.

Dans le cas du montage P.2,

$$\text{pour } 0 < t < \frac{T}{2}, \quad \sum n_2 i_s = n_2 i_{s1} \text{ et } n_2 i_{s2} = 0$$

$$\text{pour } \frac{T}{2} < t < T, \quad \sum n_2 i_s = -n_2 i_{s2} \text{ et } n_2 i_{s1} = 0$$

or $n_2 i_{s2}$ a la même forme d'onde au décalage de $\frac{T}{2}$ près que $n_2 i_{s1}$.

Quelle que soit celle-ci, $\sum n_2 i_s$ a une valeur moyenne nulle et une valeur efficace égale à $n_2 I'_s \sqrt{2}$

$$\text{Donc } I'_p = \frac{n_2}{n_1} I'_s \sqrt{2}$$

Dans le cas du pont à quatre redresseurs, le courant i_s dans le secondaire unique est alternatif.

De $n_1 i_p = n_2 i_s$, on déduit, quelle que soit la forme d'onde de i_s

$$I'_p = \frac{n_2}{n_1} I'_s$$

1.2.4.2. Circuit magnétique triphasé

a) Relations générales

Dans le cas du circuit magnétique triphasé nous avons vu qu'il fallait distinguer les deux couplages possibles des bobines primaires.

Si le primaire est en triangle

$$n_1 i_{p1} = \sum_{N_1} n_2 i_s \quad n_1 i_{p2} = \sum_{N_2} n_2 i_s \quad n_1 i_{p3} = \sum_{N_3} n_2 i_s \quad (11)$$

- Lorsque le courant i_c est supposé constant la valeur efficace I_s d'un courant secondaire se déduit de celles des termes de son développement en série par

$$I_s = \sqrt{I_{s0}^2 + I_{s1}^2 + I_{s2}^2 + I_{s3}^2 + \dots}$$

Le développement en série de la somme $\sum_{N_1} n_2 i_s$ des A.T. secondaires du noyau 1 comprend les mêmes termes affectés de coefficients qui tiennent compte des nombres de tours et des décalages entre les diverses ondes d'A.T. ajoutées. La valeur efficace de cette somme est donc

$$\sqrt{(K_0 I_{s0})^2 + (K_1 I_{s1})^2 + (K_2 I_{s2})^2 + (K_3 I_{s3})^2 + \dots}$$

D'où la valeur du courant primaire qui ne comporte pas de terme moyen :

$$I_p = \frac{1}{n_1} \sqrt{(K_1 I_{s1})^2 + (K_2 I_{s2})^2 + (K_3 I_{s3})^2 + \dots}$$

et celle du courant en ligne qui, différence de courants décalés de $\frac{T}{3}$, ne peut comprendre de termes de pulsation 3ω ou multiple.

$$J_p = \frac{\sqrt{3}}{n_1} \sqrt{(K_1 I_{s1})^2 + (K_2 I_{s2})^2 + (K_4 I_{s4})^2 + \dots}$$

- Lorsque le courant redressé i_c n'est plus constant, la valeur des courants secondaires devient

$$I'_s = \sqrt{I'_{s0}{}^2 + I'_{s1}{}^2 + I'_{s2}{}^2 + I'_{s3}{}^2}$$

Les mêmes coefficients interviennent pour tenir compte des nombres de tours et du décalage entre les ondes de courants secondaires,

$$I'_p = \frac{1}{n_1} \sqrt{(K_1 I'_{s1})^2 + (K_2 I'_{s2})^2 + (K_3 I'_{s3})^2 + \dots}$$

$$J'_p = \frac{3}{n_1} \sqrt{(K_1 I'_{s1})^2 + (K_2 I'_{s2})^2 + (K_4 I'_{s4})^2 + \dots}$$

Pour que, quelle que soit la forme d'onde de i_c , le rapport $\frac{I'_p}{I'_s}$ égale $\frac{I_p}{I_s}$ il faut :

- que I'_{s0} et I_{s0} soient nuls.
- que les divers coefficients $K_1, K_2, K_3 \dots$

soient égaux.

Pour que $\frac{J'_p}{I'_s}$ égale $\frac{J_p}{I_s}$ il faut en outre

- que $I'_{s3}, I'_{s6} \dots$ et $I_{s3}, I_{s6} \dots$ soient nuls

Si le primaire est en étoile,

Les trois courants primaires sont donnés par des relations de la forme

$$n_1 i_{p1} = \frac{2}{3} (\sum N_1 n_2 i_s - \frac{1}{2} \sum N_2 n_2 i_s - \frac{1}{2} \sum N_3 n_2 i_s) \quad (13)$$

Les trois sommes d'ampères-tours secondaires par noyau ont même forme d'onde mais sont décalées de $\frac{T}{3}$. Leurs harmoniques de rang, 1, 4, 7... forment des systèmes équilibrés directs, ceux de rang 2, 5, 8... des systèmes équilibrés inverses, ceux de rang 3, 6, 9... des systèmes homopolaires.

Au courant secondaire I_s correspond un courant primaire I_p .

avec $I_s = \sqrt{I_{s0}^2 + I_{s1}^2 + I_{s2}^2 + I_{s3}^2 + \dots}$

$$I_p = \frac{1}{n_1} \sqrt{(K_1 I_{s1})^2 + (K_2 I_{s2})^2 + (K_4 I_{s4})^2 + \dots}$$

Au courant secondaire I'_s correspond I'_p tels que :

$$I'_s = \sqrt{I_{s0}^2 + I_{s1}^2 + I_{s2}^2 + I_{s3}^2 + \dots}$$

$$I'_p = \frac{1}{n_1} \sqrt{(K_1 I'_{s1})^2 + (K_2 I'_{s2})^2 + (K_4 I'_{s4})^2 + \dots}$$

Pour que $\frac{I'_p}{I'_s}$ soit égal à $\frac{I_p}{I_s}$ il faut que soient remplies les trois conditions mentionnées précédemment :

- pas de terme moyen I_{s0} ou I'_{s0} .
- égalité des divers coefficients $K_1, K_2, K_4 \dots$
- pas d'harmonique de rang trois et multiple dans le développement en série des courants secondaires.

Notons que la comparaison des expressions de I_p ou I'_p établies pour le couplage en triangle puis pour celui en étoile montrent bien que s'il n'y a pas d'harmonique de rang trois ou multiple, le même courant secondaire donne le même courant primaire. C'est d'ailleurs ce que signifie la condition

$$\sum_{N_1} n_2 i_s + \sum_{N_2} n_2 i_s + \sum_{N_3} n_2 i_s = 0 \quad (13')$$

b) Application aux montages usuels

Montage P.3

Les courants dans les trois bobines secondaires, une par noyau, ont une valeur moyenne non nulle. La relation permettant le passage de I_s à I_p dépend de la forme d'onde du courant secondaire.

Montage P.D.3

Les trois courants secondaires sont maintenant alternatifs ; de valeur moyenne nulle la condition (13') est satisfaite puisque à la phase débitant i_c correspond le retour de ce courant par une autre phase parcourue par i_c en sens inverse.

Quel que soit le couplage, il y a compensation des A.T. par noyau et

$$I'_p = \frac{n_2}{n_1} I'_s$$

Si le primaire est en triangle, la constance de $\frac{I'_p}{I'_s}$ entraîne celle de $\frac{J'_p}{I'_s}$ si le développement en série des courants

secondaires ne contient pas d'harmonique de rang 3 ou multiple de 3. Or, cette condition est satisfaite quelle que soit la forme d'onde du courant i_c pour la plupart des fonctionnements.

En commutation naturelle, i_c a pour période $\frac{T}{6}$.

Le courant i_{s1} (figure 8a) égale i_c pour $\frac{T}{12} < t < \frac{5T}{12}$ et $-i_c$ pour $\frac{7T}{12} < t < \frac{11T}{12}$. L'alternance négative de i_{s1} est identique, au signe et au décalage de près, à son alternance positive, le développement en série ne comporte que des harmoniques impairs.

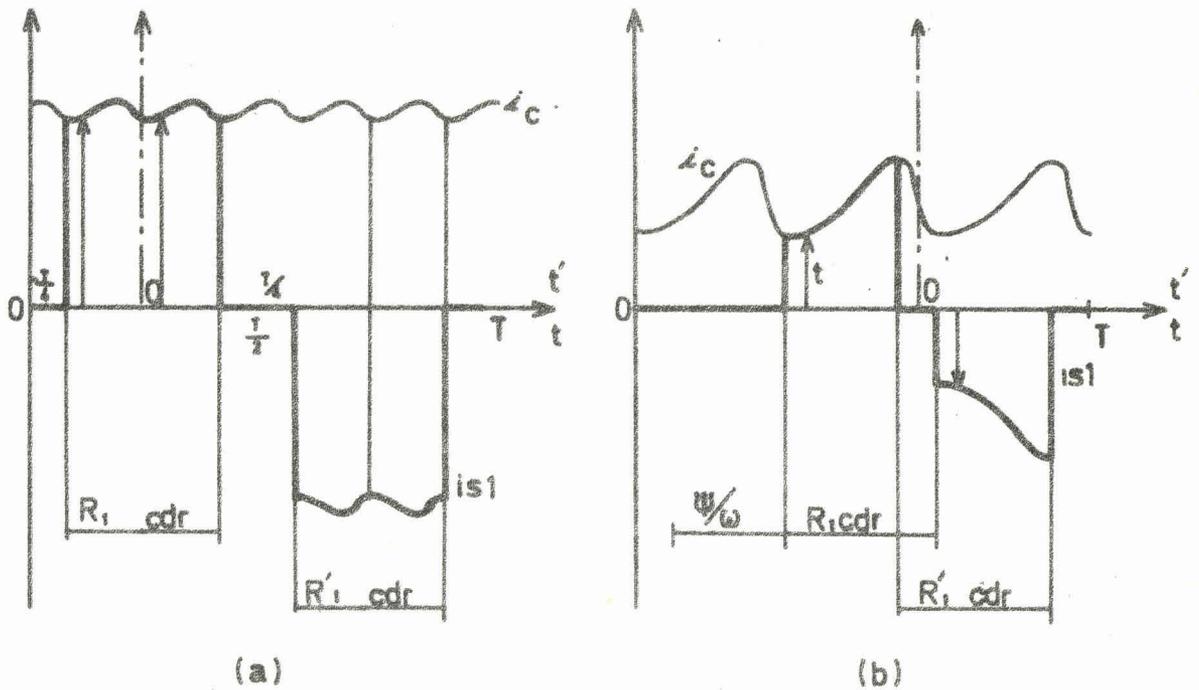


Figure 8 - forme d'onde des courants i_c et i_{s1}
 a) montage P.D.3 en commutation naturelle
 b) montage P.D.3 mixte ($\psi > 60^\circ$)

On peut donc calculer les deux composantes A_3 et B_3 de l'amplitude de l'harmonique trois à partir d'une seule alternance

$$A_3 = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i_{s1} \sin 3\omega t \, dt, B_3 = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i_{s1} \cos 3\omega t \, dt$$

Prenons comme nouvelle origine des temps,
l'instant $t = \frac{T}{4}$

$$A_3 = \frac{4}{T} \int_{-\frac{T}{4}}^0 i_{s1} \sin 3\omega t' dt' + \frac{4}{T} \int_0^{+\frac{T}{4}} i_{s1} \sin 3\omega t' dt'$$

$$B_3 = \frac{4}{T} \int_{-\frac{T}{4}}^0 i_{s1} \cos 3\omega t' dt' + \frac{4}{T} \int_0^{+\frac{T}{4}} i_{s1} \cos 3\omega t' dt'$$

$$\text{or } (i_{s1})_{t'} = (i_{s1})_{t' - \frac{T}{6}}$$

$$\sin 3\omega t' = -\sin 3\omega (t' - \frac{T}{6})$$

$$\cos 3\omega t' = -\cos 3\omega (t' - \frac{T}{6})$$

A chaque $i_s \sin 3\omega t' dt'$ de l'intervalle $0, \frac{T}{4}$ correspond une quantité égale et opposée durant l'intervalle $-\frac{T}{4}, 0$. Il en est de même pour le calcul de B_3 , A_3 et B_3 sont donc nuls.

$$\text{Puisque } \sin n\omega t' = -\sin n\omega (t' - \frac{T}{6})$$

$$\cos n\omega t' = -\cos n\omega (t' - \frac{T}{6})$$

Si n est impair et multiple de trois, tous les harmoniques correspondants ont une amplitude nulle.

En commutation retardée, la période de i_c reste égale à $\frac{T}{6}$, les intervalles de conduction sont simplement retardés de ψ/ω . Le développement en série des courants secondaires ne contient ni termes de rang pair, ni termes de rang impair multiple de 3.

Le montage mixte, donne une tension et un courant redressés d'ordre 3.

Si l'angle ψ est inférieur à $\pi/3$, les deux alternances du courant i_c ne correspondent pas à des formes d'ondes identiques au signe près.

Au contraire pour ψ compris entre $\frac{\pi}{3}$ et π (figure 8 b), si les deux alternances ne sont pas décalées entre elles de $\frac{T}{2}$, ce qui entraîne la présence d'harmoniques pairs, on retrouve cette identité au signe près. En prenant pour nouvelle origine des temps, le milieu d'un

intervalle à courant i_{s1} nul, on a :

$$(i_{s1})_{t'} = - (i_{s1})_{t' - \frac{T}{3}}$$

D'où les composantes de l'amplitude de l'harmonique

$$A_3 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^0 i_{s1} \sin 3\omega t' dt' + \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i_{s1} \sin 3\omega t' dt'$$

$$B_3 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^0 i_{s1} \cos 3\omega t' dt' + \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i_{s1} \cos 3\omega t' dt'$$

puisque

$$(i_{s1})_{t'} \sin 3\omega t' = - (i_{s1})_{t' - \frac{T}{3}} \sin 3\omega (t' - \frac{T}{3})$$

$$(i_{s1})_{t'} \cos 3\omega t' = - (i_{s1})_{t' - \frac{T}{3}} \cos 3\omega (t' - \frac{T}{3})$$

l'harmonique 3 a une amplitude nulle ; il en est de même pour les harmoniques 6, 9, 12....

Montages S.3

Ce montage donne lui aussi des courants secondaires de valeur moyenne nulle et la condition (13') est satisfaite. En effet, à chaque instant, une phase écoule $\frac{2}{3} i_c$ et les deux autres constituant la seconde voie sont parcourues par $-\frac{i_c}{3}$

Quel que soit le couplage du primaire

$$I'_p = \frac{n_2}{n_1} I'_s$$

La vérification de l'absence d'harmonique de rang 3 ou multiple de 3 qui assure la constance du rapport $\frac{J'_p}{I'_s}$ s'effectue comme pour le montage P.D.3

En commutation naturelle (figure 9 a), le fait que $(i_{s1})_t$ égale $(i_{s1})_{t + \frac{T}{2}}$ montre qu'il n'y a pas d'harmonique pair.

$$\text{De plus } (i_{s1})_t = (i_{s1})_{t + \frac{T}{3}} = \frac{1}{2} (i_{s1})_t + \frac{T}{6}$$

Le calcul de A_3 par

$$A_3 = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{6}} i_{s1} \sin 3\omega t dt + \frac{4}{T} \int_{\frac{T}{3}}^{\frac{T}{2}} i_{s1} \sin 3\omega t dt + \frac{4}{T} \int_{\frac{T}{3}}^{\frac{T}{6}} i_{s1} \sin 3\omega t dt$$

montre que A_3 est nul. Il en est de même de B_3 , A_9 et B_9 , etc...

L'absence de terme de rang 3 ou multiple de 3 est également obtenue avec le montage à 6 thyristors, il suffit de décaler les limites d'intégration de $\frac{\psi}{\omega}$.

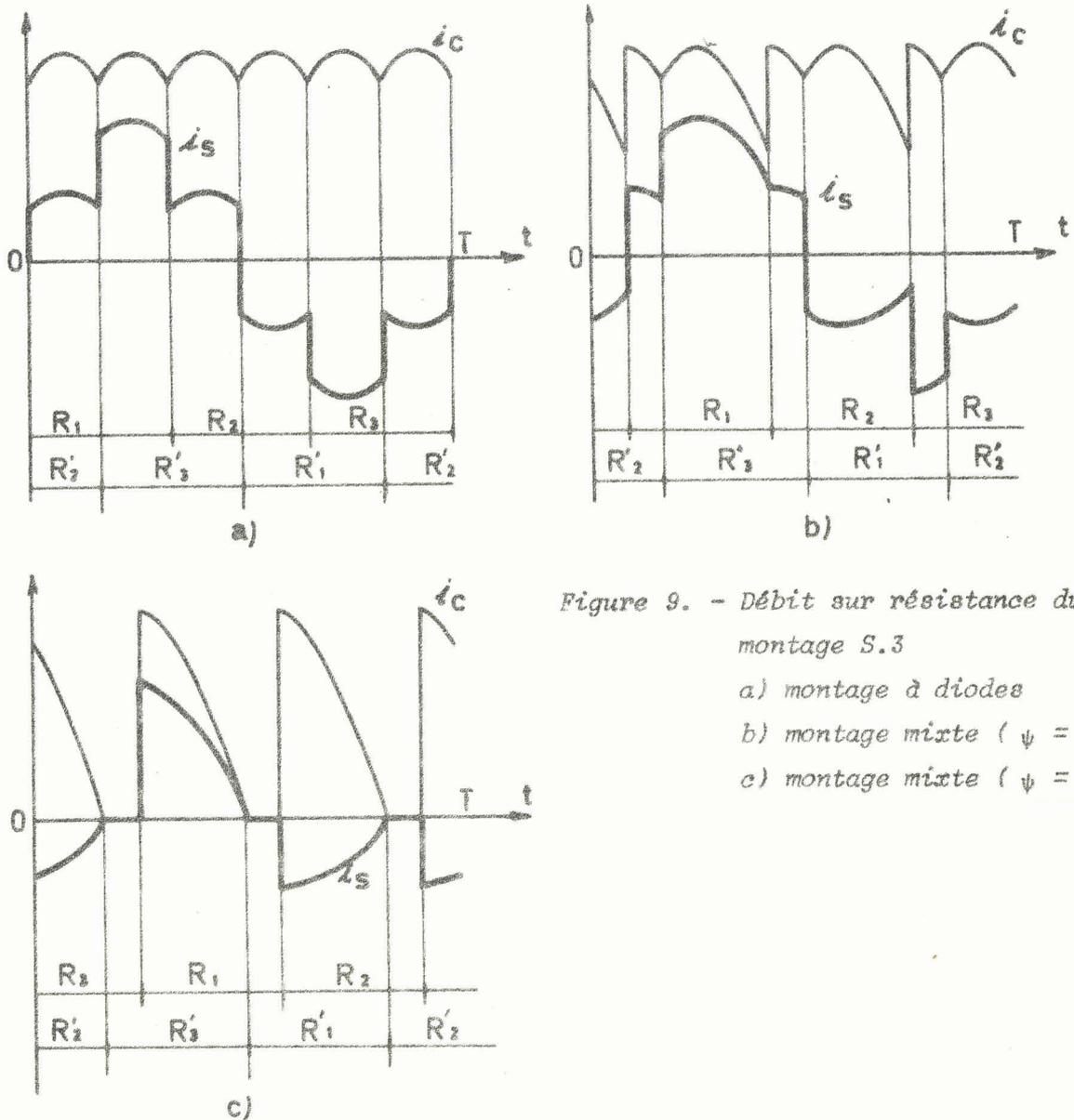


Figure 9. - Débit sur résistance du montage S.3

a) montage à diodes

b) montage mixte ($\psi = 30^\circ$)

c) montage mixte ($\psi = 90^\circ$)

Pour le montage mixte qui donne une tension et un courant redressés d'ordre 3, il n'est pas possible, ici encore, d'établir l'absence d'harmonique 3 lorsque l'angle de retard ψ est inférieur à $\pi/3$ (figure 9 b).

Mais pour les valeurs supérieures à cet angle (figure 9 c), quelle que soit la forme d'onde de i_c , à condition de prendre une origine des temps convenable, on a :

$$(i_{s1})_{t'} = -2 (i_{s1})_{t' + \frac{T}{3}} = -2 (i_{s1})_{t' + \frac{2T}{3}}$$

La valeur de A_3 et de B_3

$$A_3 = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{3}} i_{s1} \sin 3\omega t' dt' + \frac{2}{T} \int_{\frac{T}{3}}^{\frac{2T}{3}} i_{s1} \sin 3\omega t' dt' + \dots$$

$$\dots \frac{2}{T} \int_{\frac{2T}{3}}^T i_{s1} \sin 3\omega t' dt'$$

$$B_3 = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{3}} i_{s1} \cos 3\omega t' dt' + \frac{2}{T} \int_{\frac{T}{3}}^{\frac{2T}{3}} i_{s1} \cos 3\omega t' dt' + \dots$$

$$\dots \frac{2}{T} \int_{\frac{2T}{3}}^T i_{s1} \cos 3\omega t' dt'$$

est nulle puisque

$$(i_{s1})_{t'} \sin 3\omega t' = -(i_{s1})_{t' + \frac{T}{3}} \sin 3\omega (t' + \frac{T}{3}) = -(i_{s1})_{t' + \frac{2T}{3}} \sin 3\omega (t' + \frac{2T}{3})$$

$$(i_{s1})_{t'} \cos 3\omega t' = -(i_{s1})_{t' + \frac{T}{3}} \cos 3\omega (t' + \frac{T}{3}) = -(i_{s1})_{t' + \frac{2T}{3}} \cos 3\omega (t' + \frac{2T}{3})$$

Les harmoniques de rang 6, 9, 12... sont nuls pour la même raison.

1.2.4.3. Intérêt des relations établies. Vérifications

La possibilité de déduire directement la valeur efficace du courant primaire de celle du courant secondaire pour la plupart des montages importants se révèle extrêmement intéressante. Elle permet d'éviter l'un des calculs les plus longs de l'étude d'un montage, et que, sans les remarques précédentes, il aurait fallu reprendre pour chaque montage et pour chaque valeur des paramètres du récepteur.

Ainsi pour les montages P.2, P.D.2, P.D.3, S.3, ayant la valeur des rapports $\frac{I_s}{I_c}$, $\frac{I_p}{I_c}$ et $\frac{J_p}{I_c}$ lors du débit sur un récepteur inductif, il suffit de connaître les variations du facteur de forme

f_F du courant redressé pour obtenir directement, en fonction de I_C , les courants I'_s , I'_p et J'_p lors du débit sur un récepteur quelconque.

$$I'_s = f_F \frac{I_s}{I_C} I_C \quad ; \quad I'_p = f_F \frac{I_p}{I_C} I_C \quad ; \quad J'_p = f_F \frac{J_p}{I_C} I_C.$$

Pour le montage P.3, le procédé n'est applicable que pour le passage du côté continu au secondaire

$$I'_s = f_F \frac{I_s}{I_C} I_C$$

Pour les montages P.D.3 et S.3 mixtes rappelons à côté des diverses relations le domaine où elles sont utilisables

$$I'_s = f_F \frac{I_s}{I_C} I_C, \text{ pour } 0 < \psi < \frac{\pi}{3}$$

$$I'_p = \frac{n_2}{n_1} I'_s, \text{ quel que soit } \psi$$

$$J'_p = \sqrt{3} I'_p, \text{ pour } \psi = 0 \text{ et pour } \frac{\pi}{3} < \psi < \pi$$

Dans ce dernier cas, on peut avec une bonne approximation supposer J'_p égal à $\sqrt{3} I'_p$ quel que soit ψ .

Diverses séries de mesures ont permis de vérifier les relations que nous venons d'établir. Rappelons les résultats obtenus avec celles qui nous semblent les plus significatives.

a) Débit d'un montage P.2 sur un récepteur R,E

Un montage redresseur monophasé double alternance, alimenté sous tension constante, débite à travers une résistance R sur une force contre-électromotrice E (dynamo d'impédance interne négligeable devant R) (figure 10)

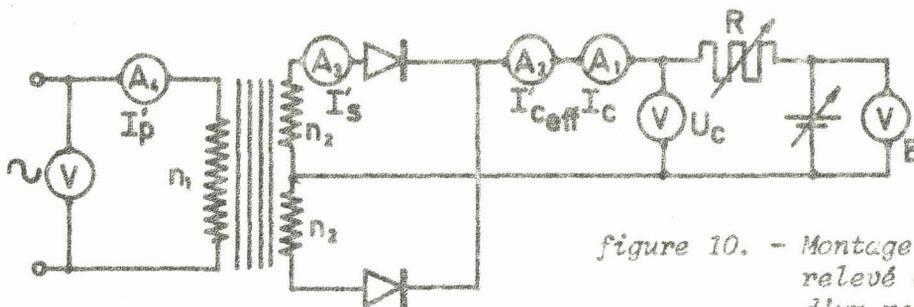


figure 10. - Montage utilisé pour le relevé des caractéristiques d'un redresseur monophasé double alternance débitant sur un récepteur R,E.

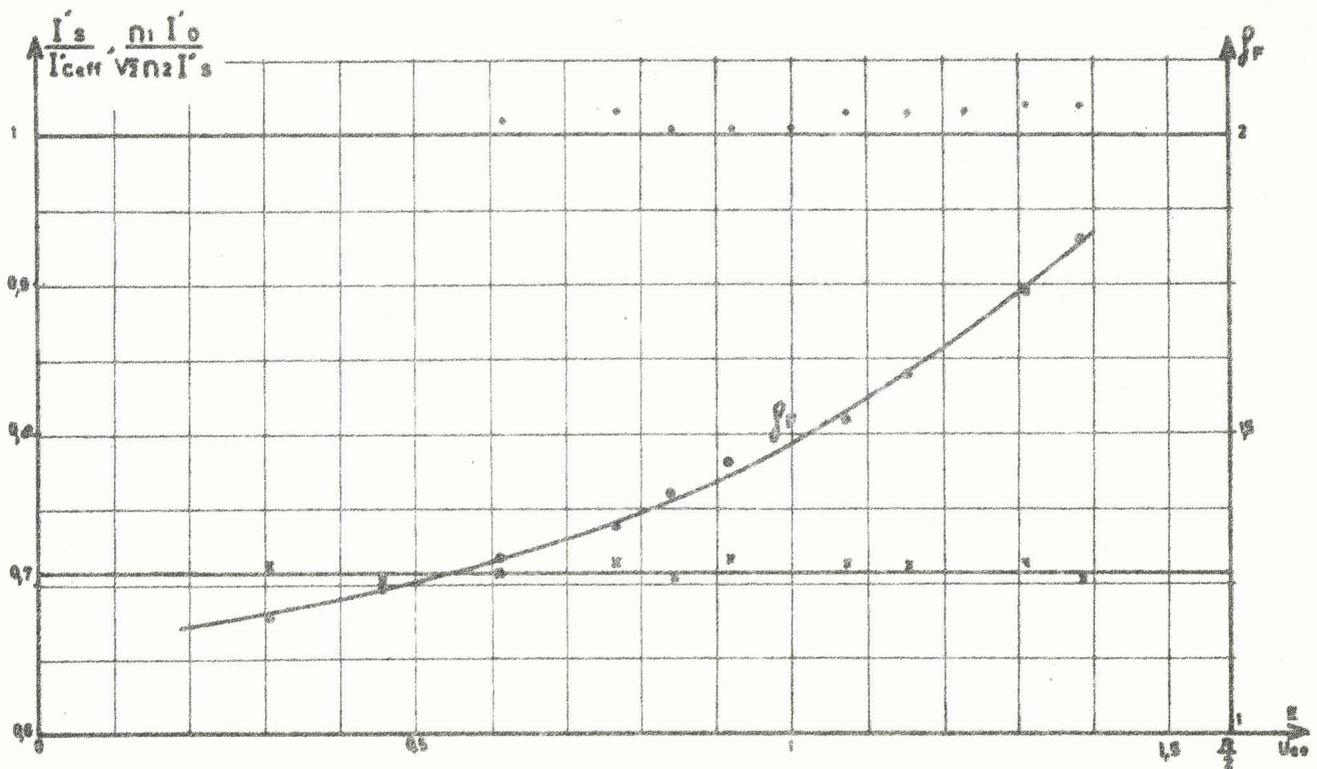


figure 11. - Courbes relevées à l'aide du montage de la figure 10. En fonction du rapport $\frac{E}{U_{co}}$, elles donnent le facteur de forme du courant redressé f_F , les rapports $\frac{I'_s}{I'_c \text{ eff}}$ et $\frac{n_1 I'_p}{\sqrt{2} n_2 I'_s}$

L'ampèremètre magnétoélectrique A_1 donne le courant redressé moyen I_c , les ampèremètres ferromagnétiques A_2, A_3, A_4 donnent respectivement les valeurs efficaces des courants redressé, secondaire et primaire. Par l'excitation de la dynamo on règle la f.c.e.m E , par la résistance R la valeur du courant redressé. Les courbes de la figure 11 donnent, en fonction du rapport $\frac{E}{U_{co}}$, les rapports $\frac{I'_c \text{ eff}}{I_c} = f_F$, $\frac{I'_s}{I'_c \text{ eff}}$ et $\frac{n_1 I'_p}{\sqrt{2} n_2 I'_s}$. Les essais ont été effectués à I_c constant.

Plus la tension croît, plus la durée de la phase de conduction de chaque redresseur diminue, ce qui correspond à un accroissement de f_F . Mais quelle que soit la valeur de ce facteur, les rapports $\frac{I'_s}{I'_c \text{ eff}}$ et $\frac{n_1 I'_p}{\sqrt{2} n_2 I'_s}$ doivent théoriquement rester constants et valoir respectivement $\frac{1}{\sqrt{2}}$ et 1.

L'examen des courbes relevées montre, qu'aux erreurs de mesure près, les relations établies sont parfaitement vérifiées. On note cependant une légère augmentation de I'_p due au courant magnétisant

b) Débit d'un montage P.D.3 mixte sur un récepteur résistant.

Pour vérifier les relations établies et la détermination de leur domaine de validité dans un cas plus complexe, nous avons relevé les caractéristiques du pont mixte triphasé débitant sur charge résistive (figure 12).

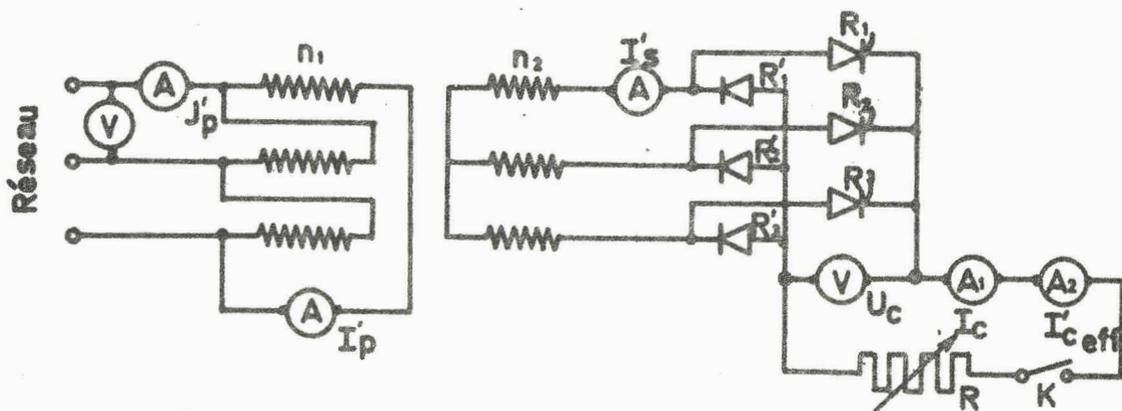


figure 12. - Schéma du montage utilisé pour la vérification des relations entre courants du pont redresseur triphasé mixte.

La tension triphasée d'alimentation est maintenue constante. Pour chaque valeur de l'angle de retard ψ , l'interrupteur K ouvert, on relève U'_{co} ; puis, ayant fermé K et donné, grâce à la résistance de charge, une valeur suffisante au courant redressé, on relève I_c , I'_c eff, I'_s , I'_p et J'_p .

D'après les calculs précédents,

- le rapport $\frac{U'_{co}}{U_{co}}$ est égal à $\frac{1 + \cos \psi}{2}$

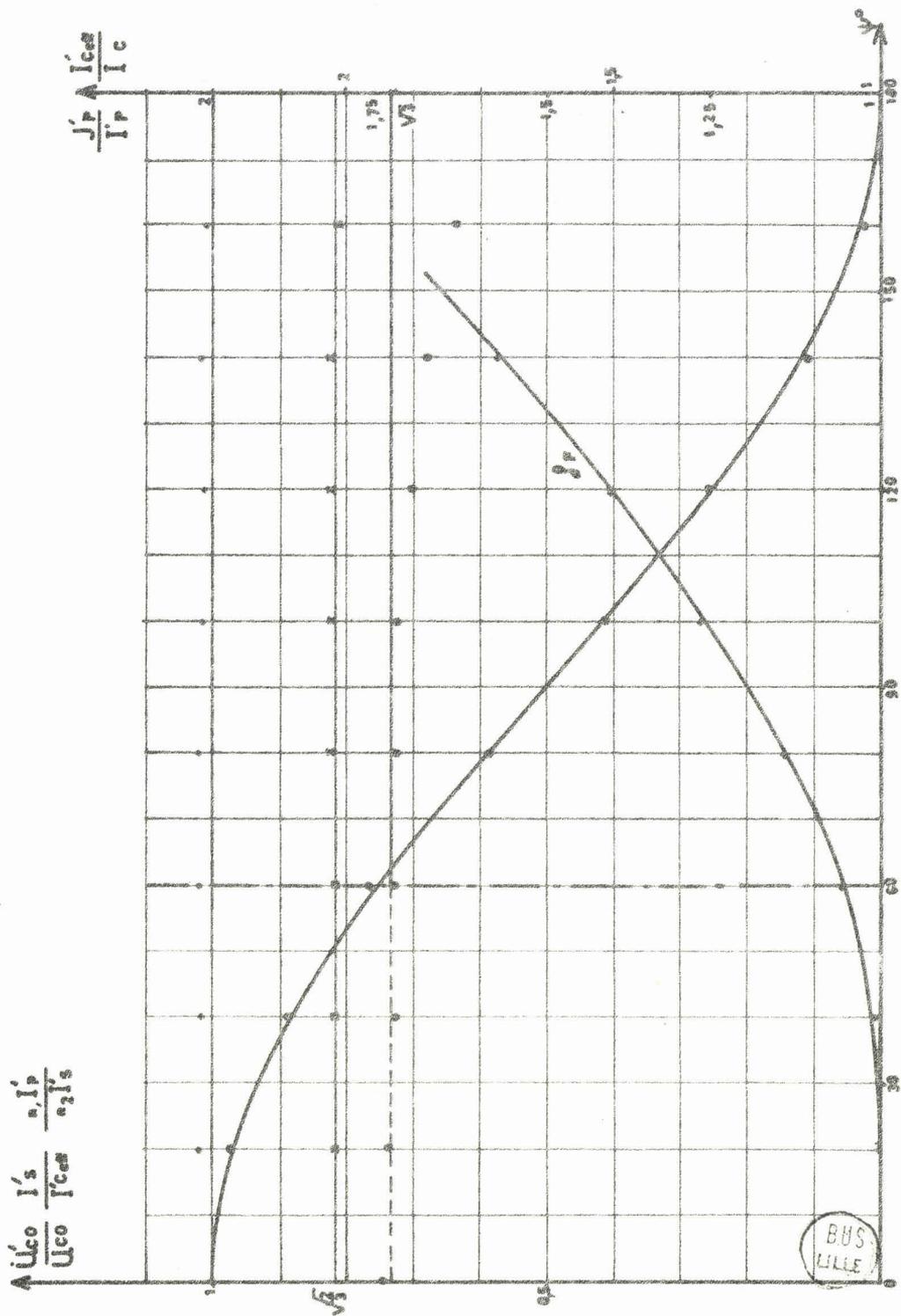


Figure 13. - Caractéristiques donnant en fonction de l'angle ψ , les variations des rapports

$$\frac{U'_{co}}{U_{co}}, \frac{I'_{ceff}}{I_c}, \frac{I'_s}{I'_{ceff}}, \frac{n_1 I'_p}{n_2 I'_s}, \frac{J'_p}{I'_p}.$$

(On a pointé les relevés expérimentaux à cause de leur proximité des courbes théoriques).

- le rapport $\frac{I'_{c \text{ eff}}}{i_c}$ doit augmenter avec ψ puisque le courant redressé est de plus en plus ondulé

- le rapport $\frac{I'_s}{I'_{c \text{ eff}}}$ doit rester égal à $\sqrt{\frac{2}{3}}$ quel que soit ψ , car les intervalles à recouvrement, où le courant i_c n'intéresse pas le secondaire, correspondent à des valeurs nulles de i_c (il n'en serait pas de même sur charge inductive).

- le rapport $\frac{n_1 I'_D}{n_2 I'_s}$ est égal à l'unité quel que soit ψ .

- le courant en ligne J'_p égale $\sqrt{3} I'_p$ pour ψ nul ou compris entre 60° et 180° ; nous avons proposé d'admettre en première approximation, cette relation pour $0 < \psi < 60^\circ$.

L'examen des courbes expérimentales relevées (figure 13) montre que la théorie est vérifiée compte tenu de la précision des appareils de mesure.

Pour les fortes valeurs de l'angle ψ , l'intervalle de passage du courant est très bref et le temps de montée et de descente de celui-ci, dû aux réactances, produit une diminution appréciable de la valeur efficace.

I.3. ETUDE DES CHUTES DE TENSION

Pour tracer le début de la caractéristique de tension U'_c (I_c), on procède comme dans le cas du récepteur infiniment inductif. On calcule séparément les chutes de tension dues aux trois causes

- $\Delta_1 U'_c$ chute due aux réactances
- $\Delta_2 U'_c$ chute due aux résistances
- $\Delta_3 U'_c$ chute due aux redresseurs conducteurs puis on les ajoute

pour obtenir la chute de tension totale

$$U'_c = U'_{c0} - \Delta_1 U'_c - \Delta_2 U'_c - \Delta_3 U'_c$$

Des trois chutes de tensions partielles la plus importante est, surtout pour les montages de forte puissance, celle qui tient compte de l'effet des réactances. C'est donc elle qu'il faut examiner le plus attentivement.

1.3.1. Chute de tension inductive $\Delta_1 U'_c$

Bien que pour tous les types de montages redresseurs on arrive au même procédé de correction de la chute de tension $\Delta_1 U'_c$ calculée en supposant i_c constant, il faut examiner successivement les cas suivants :

- montages à commutation parallèle
- montages à commutation parallèle double
- montages à commutation série.

Ayant alors dégagé la signification du coefficient de correction trouvé, on verra comment procéder pour les montages mixtes.

1.3.1.1. Montages à commutation parallèle

a) Cas de la conduction discontinue

Entre l'instant $t = t_0$ où le redresseur R_1 , diode ou thyristor, devient conducteur et celui $t = t_1$ où à nouveau il n'y a plus de redresseur passant, le schéma équivalent au montage est celui de la figure 14 a.

A cause de la réactance N_2 ramenée à chaque phase secondaire, le courant i_c , égal à i_{s1} durant cet intervalle, ne peut subir de discontinuité.

De la relation

$$U'_c = v_1 - N_2 \frac{di_c}{dt}$$

Il vient par intégration

$$\int_{t_0}^{t_1} u'_c dt = \int_{t_0}^{t_1} v_1 dt - N_2 [i_c]_{t_0}^{t_1}$$

Puisque $(i_c)_{t_0} = (i_c)_{t_1} = 0$, la valeur moyenne U'_c de la tension redressée n'est pas réduite par la présence de N_2 .

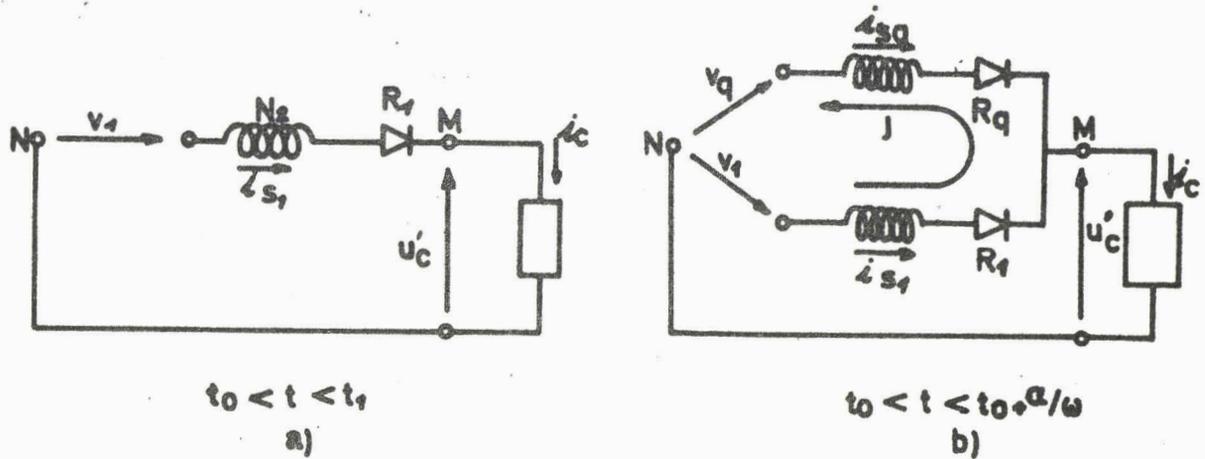


Figure 14. - Schémas utilisés pour l'étude de la chute inductive des montages à commutation parallèle.
 a) Conducteur discontinue : partie utile du montage pendant le débit d'une phase.
 b) Conduction continue : partie utile pendant un intervalle d'empiètement.

b) Cas de la conduction continue

A l'instant $t = t_0$ où R_1 devient conducteur, le courant i_{sq} qui passait par le redresseur précédemment en conduction ne peut s'annuler brusquement.

Pour $t_0 < t < t_0 + \frac{\alpha}{\omega}$, R_q et R_1 débitent simultanément (figure 14 b). R_q se bloquera quand i_{sq} sera nul et de $t = t_0 + \frac{\alpha}{\omega}$ à $t = t_0 + \frac{T}{q}$ R_1 débitera seul.

A cause de la réactance N_2 , ni i_{sq} , ni i_{s1} , ni leur somme i_c ne peut subir de discontinuité.

Durant l'intervalle $t_0, t_0 + \frac{\alpha}{\omega}$, la différence $v_1 - v_q$ fait circuler dans le circuit $N R_1 M R_q N$ un courant j dit courant de commutation.

Pendant cet intervalle, j se soustrait de i_c pour amener i_{sq} de $i_c(t_0)$ à 0, $i_{sq} = i_c - j$

j est égal au courant i_{s1} qu'il amène de 0 à i_c

$(t_0 + \frac{\alpha}{\omega})$

Pour trouver l'expression du courant de commutation, on remarque, pour $t_0 < t < t_0 + \frac{\alpha}{\omega}$,

$$\begin{cases} u'_c = v_q + N_2 \frac{d}{dt} (j - i_c) \\ u'_c = v_1 - N_2 \frac{dj}{dt} \end{cases}$$

On en déduit

$$u'_c = \frac{v_1 + v_q}{2} - \frac{N_2}{2} \frac{di_c}{dt} \quad (33)$$

et

$$v_1 - v_q = 2 N_2 \frac{dj}{dt} - N_2 \frac{di_c}{dt}$$

De cette seconde relation on déduit

$$\frac{dj}{dt} = \frac{1}{2} \frac{di_c}{dt} + \frac{v_1 - v_q}{2 N_2}$$

ou par intégration

$$j = A + \frac{i_c(t)}{2} + \frac{1}{2 N_2} \left[\int (v_1 - v_q) dt \right]_t$$

A l'instant $t = t_0$, début de la commutation, j est

nul. Donc :

$$A = \frac{-i_c(t_0)}{2} - \frac{1}{2 N_2} \left[\int (v_1 - v_q) dt \right]_{t_0}$$

D'où l'expression de j

$$j = \frac{1}{2} [i_c(t) - i_c(t_0)] + \frac{1}{2 N_2} \left[\int (v_1 - v_q) dt \right]_{t_0}^t$$

L'instant $t = t_0 + \frac{\alpha}{\omega}$ de fin de commutation est caractérisé par le fait que j atteint alors la valeur i_c

$$i_c(t_0 + \frac{\alpha}{\omega}) = \frac{1}{2} \left[i_c(t_0 + \frac{\alpha}{\omega}) - i_c(t_0) \right] + \frac{1}{2 N_2} \left[\int (v_1 - v_q) dt \right]_{t_0}^{t_0 + \frac{\alpha}{\omega}} \quad (34)$$

La chute de tension due aux réactances, tant par l'empiètement qu'elles provoquent que par la modification qu'elles font subir à u'_c hors de ces intervalles, s'obtient en comparant les valeurs moyennes de u'_c avec et sans réactances.

A cause des réactances,

pour $t_0 < t < t_0 + \frac{\alpha}{\omega}$, $u'_c = \frac{v_1 + v_q}{2} - \frac{N_2}{2} \frac{di_c}{dt}$, [relation (33)]

pour $t_0 + \frac{\alpha}{\omega} < t < t_0 + \frac{T}{q}$, $u'_c = v_1 - N_2 \frac{di_c}{dt}$

S'il n'y avait pas de réactance la tension moyenne serait

$$U'_{c0} = \frac{q}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \frac{T}{q}} v_1 dt$$

D'où la chute de tension

$$\Delta_1 U'_c = \frac{q}{T} \left\{ \int_{t_0}^{t_0 + \frac{T}{q}} v_1 dt - \int_{t_0}^{t_0 + \frac{\alpha}{\omega}} \frac{v_1 + v_q}{2} dt + \int_{t_0}^{t_0 + \frac{\alpha}{\omega}} \frac{N_2}{2} \frac{di_c}{dt} dt \dots \dots \dots \right. \\ \left. \dots + \int_{t_0 + \frac{\alpha}{\omega}}^{t_0 + \frac{T}{q}} v_1 dt + \int_{t_0 + \frac{\alpha}{\omega}}^{t_0 + \frac{T}{q}} N_2 \frac{di_c}{dt} dt \right\}$$

$$\Delta_1 U'_c = \frac{q}{T} \left\{ \int_{t_0}^{t_0 + \frac{\alpha}{\omega}} \frac{v_1 - v_q}{2} dt + \frac{N_2}{2} [i_c(t_0 + \frac{\alpha}{\omega}) - i_c(t_0)] \dots \dots \dots \right. \\ \left. \dots + N_2 [i_c(t_0) - i_c(t_0 + \frac{\alpha}{\omega})] \right\}$$

Or, d'après la relation (34),

$$\left[\int (v_1 - v_q) dt \right]_{t_0}^{t_0 + \frac{\alpha}{\omega}} = \frac{N_2}{2} [i_c(t_0) + i_c(t_0 + \frac{\alpha}{\omega})]$$

En reportant

$$\Delta_1 U'_c = \frac{q}{T} N_2 i_c(t_0)$$

ou

$$\Delta_1 U'_c = \frac{q}{2\pi} N_2 \omega i_c(t_0) \tag{35)p.}$$

On retrouve la même expression que dans l'étude générale [relation (15)] si ce n'est que I_c est remplacé par $i_c(t_0)$, courant redressé en début de commutation.

1.3.1.2. Montages à commutation parallèle double

Le phénomène de recouvrement des intervalles de conduction des redresseurs consécutifs de la série R_1, R_2, \dots, R_q produit la même réduction de $(v_M - v_0)_{moy}$ qu'en commutation parallèle.

Le même phénomène se déroule autour du point N pour faire passer i_c d'une borne à la suivante. La diminution de $(v_0 - v_N)_{moy}$ est la même.

$$\Delta_1 U'_c = \frac{q}{\pi} N_2 \omega i_c(t_0) \tag{35)P.D.}$$

Que la période de la tension u'_c , donc du courant i_c , soit $\frac{T}{q}$ ou $\frac{T}{2q}$ la valeur de i_c à l'instant d'entrée en conduction de chacune des $2q$ diodes ou de chacun des $2q$ thyristors est la même.

$i_c(t_0)$ est nul en conduction discontinue. En conduction continue, il faut remplacer dans la relation (15) relative à ce type de montage, la valeur moyenne I_c par la valeur instantanée $i_c(t_0)$.

1.3.1.3. Montages à commutation série

Comme dans l'étude générale, il faut distinguer le cas où le nombre de phases q est pair de celui où il est impair.

a) Nombre de phases pair

La tension u'_c et le courant i_c redressés ont pour période $\frac{T}{q}$. Les changements de redresseurs passant s'effectuent en même temps à la borne M et à la borne N. Les deux voies offertes au passage du courant i_c à l'intérieur du polygone sont toujours identiques, même nombre d'enroulements et même tension totale, il passe donc $\frac{i_c}{2}$ dans chacune d'elles.

A l'instant $t = t_0$ où le redresseur R_1 devient conducteur, le courant i_{s1} ne peut passer instantanément de $-\frac{1}{2} i_c(t_0)$ à $+\frac{1}{2} i_c(t_0)$

Pour $t_0 < t < t_0 + \frac{\alpha}{\omega}$, R_q et R_1 débitent simultanément mettant la phase 1 en court-circuit (figure 15). Le courant dans celle-ci s'inverse sous l'effet de la tension v_1 .

$$v_1 = N_2 \frac{d i_{s1}}{dt}$$

D'où le courant i_{s1}

$$i_{s1} = A + \frac{1}{N_2} \left[\int v_1(t) dt \right]_t$$

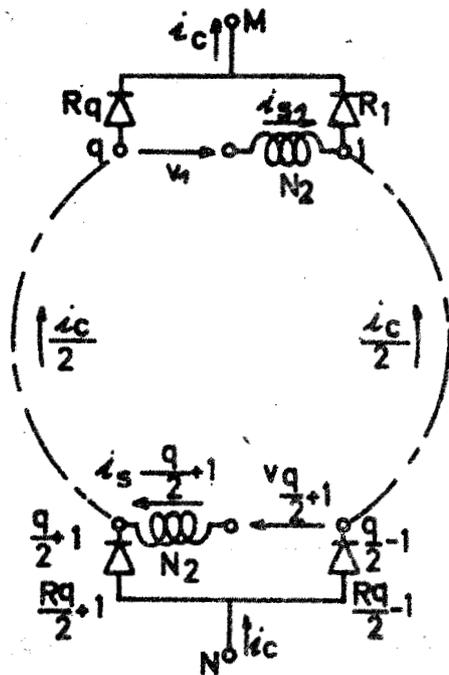


Figure 15. - Schéma simplifié d'un montage série à q paires durant l'intervalle $t_0, t_0 + \frac{\alpha}{\omega}$

ou, puisque $i_{s1} = \frac{-i_c(t_0)}{2}$ à l'instant $t = t_0$,

$$i_{s1} = \frac{-i_c(t_0)}{2} + \frac{1}{N_2} \left[\int_{t_0}^t v_1(t) dt \right]$$

A la fin de l'intervalle de commutation, i_{s1} atteint la valeur $\frac{1}{2} i_c(t_0 + \frac{\alpha}{\omega})$. D'où la relation donnant l'angle d'empîtement α

$$\frac{1}{2} i_c(t_0 + \frac{\alpha}{\omega}) = -\frac{i_c(t_0)}{2} + \frac{1}{N_2} \left[\int_{t_0}^{t_0 + \frac{\alpha}{\omega}} v_1(t) dt \right]$$

Pour calculer l'effet global des réactances, on

remarque que :

- pendant l'intervalle $t_0, t_0 + \frac{\alpha}{\omega}$, la tension redressée u'_c au lieu d'être égale à

$$\frac{v_{\frac{q}{2}+2} + \dots + v_q + v_1}{2}$$

a pour expression :

$$u'_c = \frac{v_{\frac{q}{2}+2} + \dots + v_q}{2} - \left(\frac{q}{2} - 1\right) \frac{N_2}{2} \frac{di_c}{dt}$$

- pendant l'intervalle $t_0 + \frac{\alpha}{\omega}, t_0 + \frac{\pi}{q}$, au lieu de

$$\frac{v_{\frac{q}{2}+2} + \dots + v_q + v_1}{2}$$

u'_c a pour valeur

$$u'_c = \frac{v_{\frac{q}{2}+2} + \dots + v_q + v_1}{2} - \frac{q}{2} \frac{N_2}{2} \frac{di_c}{dt}$$

D'où la chute de tension

$$\Delta_1 U'_c = \frac{q}{T} \left\{ \int_{t_0}^{t_0 + \frac{\alpha}{\omega}} v_1 dt + \frac{N_2 (q-2)}{4} \int_{t_0}^{t_0 + \frac{\alpha}{\omega}} \frac{di_c}{dt} dt \right. \\ \left. + \frac{N_2 q}{4} \int_{t_0 + \frac{\alpha}{\omega}}^{t_0 + \frac{T}{\epsilon \alpha q}} \frac{di_c}{dt} dt \right\}$$

ou puisque

$$\int_{t_0}^{t_0 + \frac{\alpha}{\omega}} v_1 dt = \frac{N_2}{2} [i_c(t_0 + \frac{\alpha}{\omega}) + i_c(t_0)]$$

$$\Delta_1 U'_c = \frac{q}{T} \left\{ \frac{N_2}{2} [i_c(t_0 + \frac{\alpha}{\omega}) + i_c(t_0)] + N_2 \frac{q}{4} \dots \dots \right. \\ \left. \dots [i_c(t_0 + \frac{\alpha}{\omega}) - i_c(t_0) + i_c(t_0) - i_c(t_0 + \frac{\alpha}{\omega})] - \frac{N_2}{2} [i_c(t_0 + \frac{\alpha}{\omega}) - i_c(t_0)] \right\} \\ \Delta_1 U'_c = \frac{q}{2\pi} N_2 \omega i_c(t_0) \quad \text{35(S)}$$

Cette relation est identique à celle trouvée en supposant i_c constant au remplacement de I_c par $i_c(t_0)$ près.

b) Nombre de phases impair

La période de u'_c et de i_c est maintenant égale à $\frac{T}{2q}$. Les changements de redresseur conducteur à la borne M et à la borne N sont décalés de $\frac{T}{2q}$.

Examinons ce qui se passe au cours d'une période de u'_c , en supposant que l'angle α est inférieur à $\frac{\pi}{q}$ (figure 16).

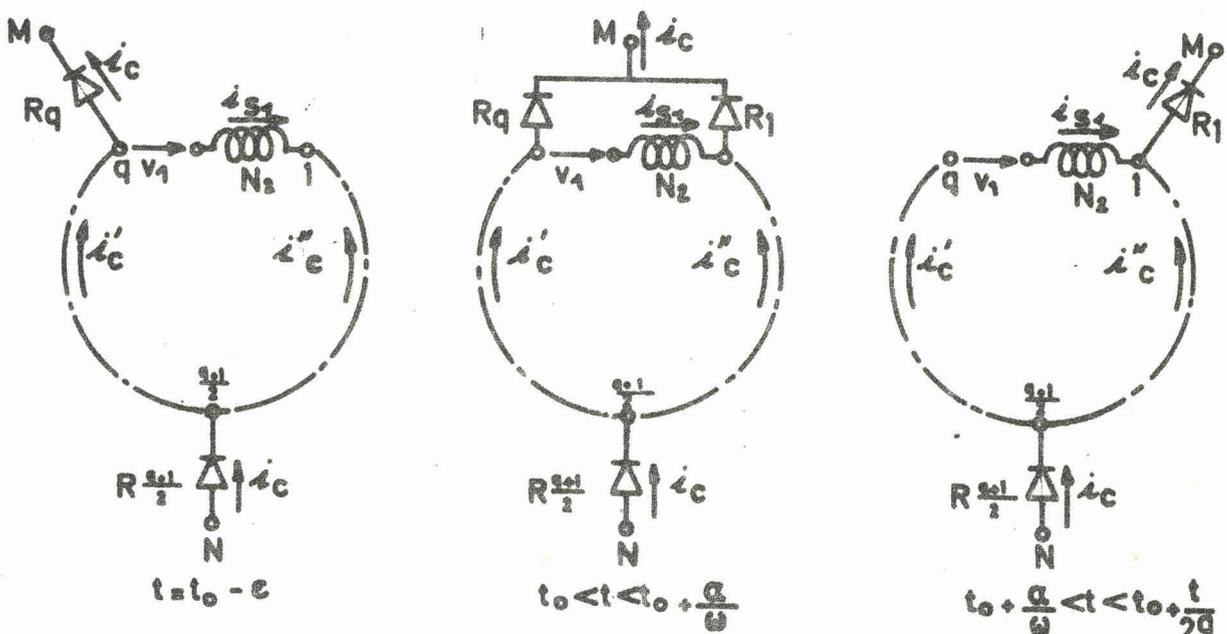


Figure 16. - Schéma équivalent à un montage série à q impair, avant, pendant et après le court-circuit de la phase 1.

Pour $t_0 < t < t_0 + \frac{\alpha}{\omega}$, l'enroulement secondaire de rang 1 est en court-circuit.

$$v_1 = N_2 \frac{d i_{s1}}{dt}$$

$$i_{s1} = A + \frac{1}{N_2} \left[\int v_1 dt \right]_t$$

or $i_{s1}(t_0) = -i''_c(t_0)$ en indiquant par i''_c la fraction de i_c qui passe par les enroulements de la seconde voie.

$$D'où A = -i''_c(t_0) - \frac{1}{N_2} \left[\int v_1 dt \right]_{t_0}$$

$$\text{et } i_{s1} = -i''_c(t_0) + \frac{1}{N_2} \left[\int v_1 dt \right]_{t_0}^t$$

A la fin du court-circuit

$$i_{s1} = i'_c(t_0 + \frac{\alpha}{\omega}),$$

en désignant par i'_c le courant dans l'autre voie ($i_c = i'_c + i''_c$).

La relation donnant l'angle est donc

$$i'_c(t_0 + \frac{\alpha}{\omega}) = -i''_c(t_0) + \frac{1}{N_2} \left[\int v_1 dt \right]_{t_0}^{t_0 + \frac{\alpha}{\omega}}$$

Pendant l'intervalle $t_0, t_0 + \frac{\alpha}{\omega}$, la tension redressée a pour expressions

$$u'_c = v_{\frac{q+3}{2}} + \dots + v_q - \frac{q-1}{2} N_2 \frac{di'_c}{dt}$$

$$= v_{\frac{q+1}{2}} + \dots - v_2 - \frac{q-1}{2} N_2 \frac{di''_c}{dt}$$

$$\text{Puisque } \frac{di'_c}{dt} + \frac{di''_c}{dt} = \frac{di_c}{dt}$$

$$\text{et } v_{\frac{q+3}{2}} + \dots + v_q + v_1 = -v_2 - \dots - v_{\frac{q+1}{2}}$$

$$u'_c = v_{\frac{q+3}{2}} + \dots + v_q + \frac{v_1}{2} - \frac{q-1}{4} N_2 \frac{di_c}{dt}$$

Pendant l'intervalle $t_0 + \frac{\alpha}{\omega}, t_0 + \frac{T}{2q}$, des deux expressions de u'_c

$$u'_c = v_{\frac{q+3}{2}} + \dots + v_q + v_1 - \frac{q+1}{2} N_2 \frac{di_c}{dt}$$

$$u'_c = - \frac{V_{q+1}}{2} - \dots - V_2 - \frac{q-1}{2} N_2 \frac{di''_c}{dt}$$

On en déduit

$$u'_c = \frac{V_{q+3}}{2} + \dots + V_q + V_1 - \frac{q-1}{4} N_2 \frac{di_c}{dt} \dots - \frac{1}{2} N_2 \frac{di'_c}{dt}$$

S'il n'y avait pas de réactance de t_0 à $t_0 + \frac{T}{2q}$, u'_c serait égal à $\frac{V_{q+3}}{2} + \dots + V_q + V_1$. D'où la valeur de la chute de tension.

$$\Delta_1 U'_c = \frac{2q}{T} \left\{ \int_{t_0}^{t_0 + \frac{\alpha}{\omega}} \frac{V_1}{2} dt + \int_{t_0}^{t_0 + \frac{\alpha}{\omega}} \frac{q-1}{4} N_2 \frac{di_c}{dt} dt + \dots + \int_{t_0 + \frac{\alpha}{\omega}}^{t_0 + \frac{T}{2q}} \frac{q-1}{4} N_2 \frac{di_c}{dt} dt + \int_{t_0 + \frac{\alpha}{\omega}}^{t_0 + \frac{T}{2q}} \frac{N_2}{2} \frac{di'_c}{dt} dt \right\}$$

Ou, après avoir remplacé la première intégrale,

$$\Delta_1 U'_c = \frac{2q}{T} \left\{ \frac{N_2}{2} [i'_c(t_0 + \frac{\alpha}{\omega}) + i''_c(t_0)] + \frac{q-1}{4} N_2 [i_c(t_0 + \frac{T}{2q}) - i_c(t_0)] + \frac{N_2}{2} [i'_c(t_0 + \frac{T}{2q}) - i'_c(t_0 + \frac{\alpha}{\omega})] \right\}$$

$$\text{Or } i_c(t_0 + \frac{T}{2q}) = i_c(t_0)$$

$$i'_c(t_0 + \frac{T}{2q}) = i''_c(t_0)$$

$$\Delta_1 U'_c = \frac{2q}{T} N_2 i''_c(t_0)$$

$$\text{ou } \Delta_1 U'_c = \frac{q}{\pi} N_2 \omega i''_c(t_0)$$

Cette relation montre bien que la chute de tension est proportionnelle au courant dans la phase en commutation à l'instant où commence le phénomène.

Ce n'est qu'en supposant que, hors des intervalles d'empiètement, le courant se répartit entre les deux voies comme dans l'étude générale, c'est-à-dire dans le rapport inverse du nombre de phases que compte chacune d'elles, qu'on peut écrire :

$$i''_c(t_0) = i'_c(t_0) \frac{q-1}{q+1} = i_c(t_0) \frac{q-1}{2q}$$

$$\text{et } \Delta_1 U'_c = \frac{q-1}{2\pi} N_2 \omega i_c(t_0) \quad (35)_s$$

Le coefficient de correction est alors encore

$$\frac{i_c(t_0)}{I_c}$$

1.3.1.4. Interprétation des relations obtenues

Toutes les relations (35) peuvent se mettre sous la forme

$$\Delta_1 U'_c = \frac{n}{T} N_2 \Delta i(t_0)$$

En indiquant par

. n, le nombre de commutations à effectuer par période T, soit q pour les montages P., 2q pour les montages P.D. et S.

. $\Delta i(t_0)$, la valeur initiale de la variation de courant que la commutation doit engendrer dans la bobine secondaire intéressée. Pour les montages P. et P.D., il faut faire passer i_c dans une phase où le courant était nul, donc $\Delta i(t_0) = i_c(t_0)$. Pour les montages S. il faut faire passer un enroulement d'une voie dans l'autre, donc $\Delta i(t_0) = i''_c(t_0)$.

Les relations (35) ont pu être établies sans avoir à expliciter l'expression de la tension $u(t)$ qui produit le changement de courant dans l'enroulement en commutation. Quel que soit le montage

$$\int_{t_0}^{t_0 + \frac{\alpha}{\omega}} u(t) = N_2 [i_{s1}(t_0 + \frac{\alpha}{\omega}) - i_{s1}(t_0)]$$

avec $u(t) = v_1 - v_q$ pour les montages P. et P.D.

$u(t) = v_1$ pour le montage S.

Cette interprétation des résultats permet seule d'obtenir une expression approximative de la chute inductive dans le cas plus compliqué des montages mixtes.

1.3.1.5. Montages mixtes à commutation parallèle double

Pour les montages mixtes, les entrées en conduction des redresseurs ne se font plus deux par deux (q pair) tous les $\frac{T}{q}$, ou un par un (q impair) à des intervalles de temps réguliers de $\frac{T}{2q}$. De plus pour $\psi > \pi - \frac{2\pi}{q}$, même en négligeant l'empiètement, apparaît le phénomène du débit simultané du thyristor et de la diode réunis à la même borne secondaire, ce débit met le récepteur en court-circuit.

Suivons, dans le cas du montage P.D.3 mixte par exemple (figure 17), l'évolution du schéma équivalent au montage au cours d'une période $\frac{T}{3}$ de u'_c et de i_c , en tenant compte de l'empiètement, d'abord pour $\psi < \frac{\pi}{3}$ puis pour $\psi > \frac{\pi}{3}$

$t = t_0$ indique l'instant de déblocage du thyristor R_1

$t = t'_0$ celui de la première entrée en conducteur

d'une diode suivant $t = t_0$

α_1 l'angle d'empiètement des thyristors consécutifs

α_2 l'angle d'empiètement des diodes.

Pour $0 < \psi < \frac{\pi}{3}$ (figure 17 a)

Le diagramme des conductions est le même que pour un montage tout diodes ou tout thyristors, si ce n'est que l'intervalle t_0, t'_0 n'est plus égal à $\frac{T}{6}$ mais à $\frac{T}{6} - \frac{\psi}{\omega}$. La valeur du courant $i_c(t_0)$ à commuter à la borne M n'est plus forcément le même que celui $i_c(t'_0)$ qu'il faut faire passer à la borne N d'une phase à la suivante.

. De $t = t_0$ à $t = t_0 + \frac{\alpha_1}{\omega}$, la tension $v_1 - v_3$ doit faire passer le courant i_{s1} de zéro à $i_c(t_0 + \alpha_1)$ et i_{s3} de $i_c(t_0)$ à zéro.

. De $t = t'_0$ à $t = t'_0 + \frac{\alpha_2}{\omega}$, la différence $v_2 - v_3$ doit faire varier i_{s2} de $-i_c(t'_0)$ à zéro et i_{s3} de zéro à $-i_c(t'_0 + \frac{\alpha_2}{\omega})$

D'où la chute inductive

$$\Delta_1 U'_c = \frac{q}{2\pi} N_2 \omega i_c [i_c(t_0) - i_c(t'_0)] \quad (36)$$

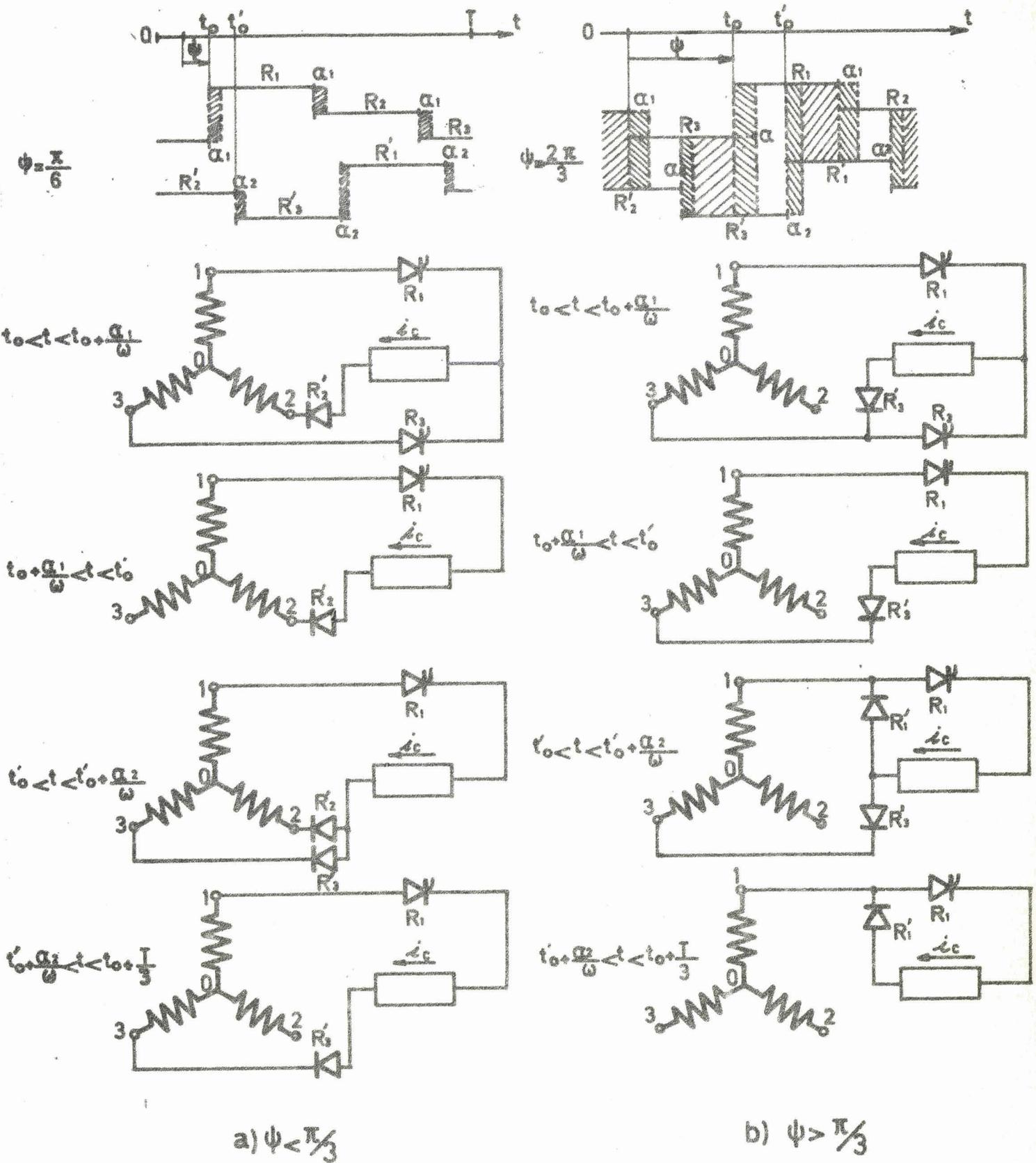


Figure 17. - Evolution du schéma du montage P.D.3 mixte au cours d'une période $\frac{T}{3}$.
(Seuls les redresseurs conducteurs sont représentés).

La figure 17a montre toutefois que dès que $\psi + \alpha_1$ dépasse $\pi/3$ apparaissent des intervalles où il y a débit simultané des deux redresseurs réunis à la même borne secondaire.

Pour $\frac{\pi}{3} \leq \psi \leq \pi$ (figure 17b)

Même en négligeant l'empiètement, il y a recouvrement des intervalles de conduction de R_1 et R'_1 , de R_2 et R'_2 , de R_3 et R'_3 .

A l'instant $t = t_0$ alors que tous les courants secondaires sont nuls, le déblocage de R_1 permet à i_{s1} de passer sous l'effet de $v_1 - v_3$, de zéro à $i_c(t_0 + \frac{\alpha_1}{\omega})$ et par là de décharger R_3 pour le conduire au blocage.

De même durant l'intervalle $t'_0, t'_0 + \frac{\alpha_2}{\omega}$, la tension $v_3 - v_1$ doit amener le courant dans R'_3 de $i_c(t'_0)$ à zéro et par là provoquer l'extinction de cette diode.

La chute inductive est encore donnée par la relation (36).

1.3.1.6. Montages mixtes à commutation série

Comme pour les montages mixtes à commutation parallèle double, les intervalles à tensions u'_c nulle apparaissent dès que $\psi + \alpha_1$ excède $\pi - \frac{2\pi}{q}$.

On peut calculer la chute inductive par

$$\Delta_1 U'_c = \frac{q}{2\pi} N_2 \omega [i''_c(t_0) + i'_c(t'_0)] \quad (37)$$

en indiquant par

. $i''_c(t_0)$ le courant dans une phase au moment où elle est mise en court-circuit par le débit simultané des thyristors réunis à ses deux extrémités.

. $i'_c(t'_0)$ le courant dans une phase quand elle est mise en court-circuit par le débit simultané de deux diodes.

La figure 18 représente pour le montage S.3 les quatre schémas équivalents correspondant à une période $T/3$. Le cas envisagé est celui où l'angle ψ dépasse $\frac{\pi}{3}$, le diagramme des conductions est le même que celui de la figure 17b.

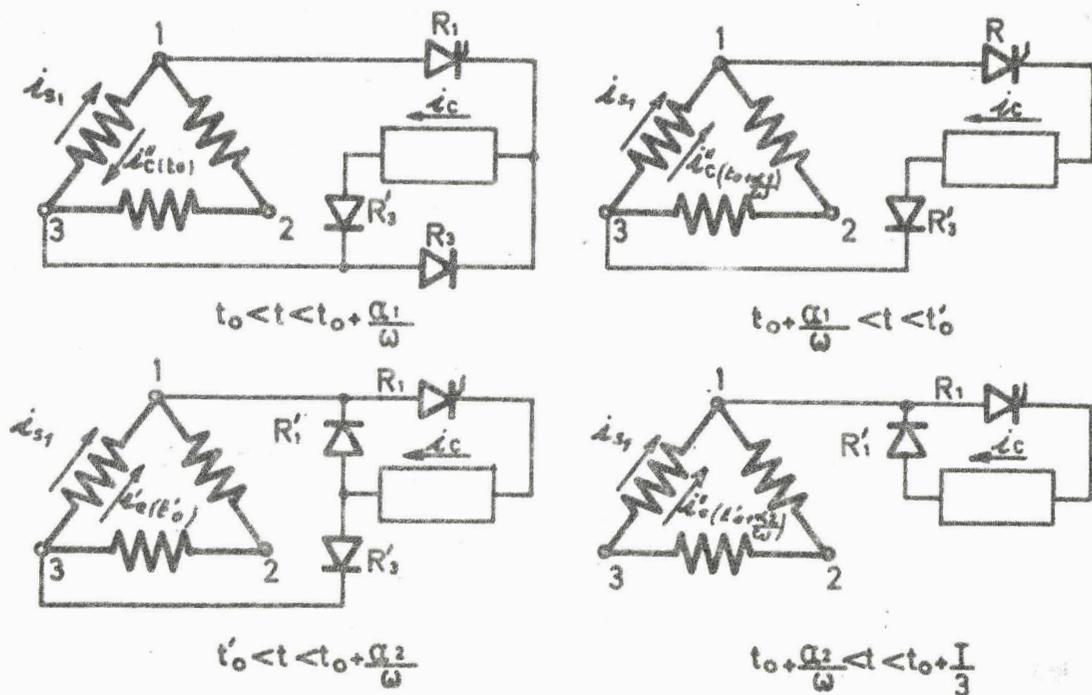


Figure 18. - Schémas équivalents au montage S.3 mixte au cours d'une période de la tension u'_c . (cas où $\psi > \frac{\pi}{3}$). Seuls les redresseurs passants sont représentés.

On a indiqué les valeurs $i''_c(t_0)$ et $i'_c(t'_0)$ du courant dans l'enroulement 1 au début des deux intervalles de commutation t_0 , $t_0 + \frac{\alpha_1}{\omega}$ et t'_0 , $t'_0 + \frac{\alpha_2}{\omega}$, ainsi que les valeurs $i''_c(t_0 + \frac{\alpha_1}{\omega})$ et $i'_c(t'_0 + \frac{\alpha_2}{\omega})$ qui caractérisent la fin de ces intervalles.

1.3.1.7. Remarques sur les relations donnant $\Delta_1 U'_c$ et leur utilisation

La valeur de $\Delta_1 U'_c$ que nous venons d'établir a pour but de retoucher la valeur de la tension redressée moyenne U'_{c0} , calculée en négligeant l'effet des réactances.

a) Elle utilise la description du fonctionnement effectuée en négligeant ces réactances et les résultats ainsi établis, notamment :

- la valeur des instants d'entrée en conduction et de blocage des redresseurs (et par là la valeur de U'_{c0}).
- l'expression du courant redressé i_c .

Or, il ne fait pas de doute que les réactances modifient tout ou partie de ces résultats. Cependant, et nous avons insisté beaucoup

sur ce point dans l'introduction, il est nécessaire dans chaque étape d'utiliser les résultats de l'étape précédente sinon, même l'étude du régime apparemment le plus simple, conduit à des calculs extrêmement compliqués et les résultats sont d'une utilisation très limitée.

Pour concrétiser cette première remarque, considérons le plus simple des problèmes ; celui du montage P.2. à diodes débitant sur une résistance pure (figure 19).

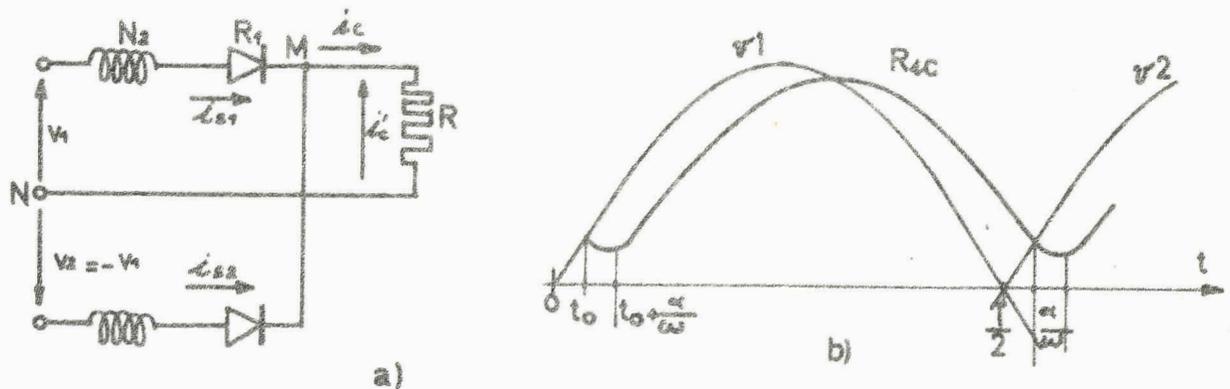


Figure 19. - Montage monophasé double alternance débitant sur une résistance :

a) schéma du montage

b) forme d'onde de i_c si on tient compte de N_2 .

Dans la première étape (N_2 négligé) on suppose que R_1 devient conducteur pour $t = 0$, que de $t = 0$ à $t = \frac{T}{2}$, $i_c = i_{s1} = \frac{V_1}{R}$; que R_2 devient conducteur pour $t = \frac{T}{2}$ et que, de $t = \frac{T}{2}$ à $t = T$, on a $i_c = i_{s2} = \frac{V_2}{R}$.

Les commutations s'effectuent alors lorsque le courant i_c est nul, ce qui, avec les relations établies, donne des valeurs de α et de $\Delta_1 U_c$ nulles.

Or, si on tient compte maintenant des réactances on voit que, lorsque R_1 est conducteur, N_2 ralentit la croissance de i_c puis retarde sa décroissance. La tension v_2 atteint la valeur $R_1 i_c$ après l'instant $t = \frac{T}{2}$, la diode R_2 entre en conduction pour $t = \frac{T}{2} + t_0$. De plus à cet instant, i_{s1} n'est pas encore nul, donc il y a empiètement. L'introduction des réactances modifie tous les résultats de la première étape de l'étude.

Il nous a semblé intéressant (voir Appendice) de déterminer la caractéristique $U_c(I_c)$ du montage de la figure 19a en tenant compte, dès le départ, des réactances. Cette étude montre :

- que les calculs sont très compliqués et ne peuvent être effectués qu'à l'aide d'un ordinateur,

- que, en début de caractéristique (entre la marche à vide et celle qui lors d'un débit sur self infinie correspond à une chute inductive de l'ordre de 5 %), la chute inductive est bien négligeable.

Les vérifications expérimentales ont confirmé cette conclusion.

b) L'utilisation des relations donnant la chute de tension $\Delta_1 U_c$ ne soulève pas de difficulté lorsque la forme d'onde du courant i_c établie au paragraphe I.2.1. ne présente pas de discontinuité.

On lit $i_c(t_0)$ lorsqu'un redresseur entre en conduction ; $i_c(t_0)$ est nul en cas de conduction discontinue. Pour les montages mixtes deux lectures sont nécessaires, l'une ou l'autre pouvant être nulle (figure 20).

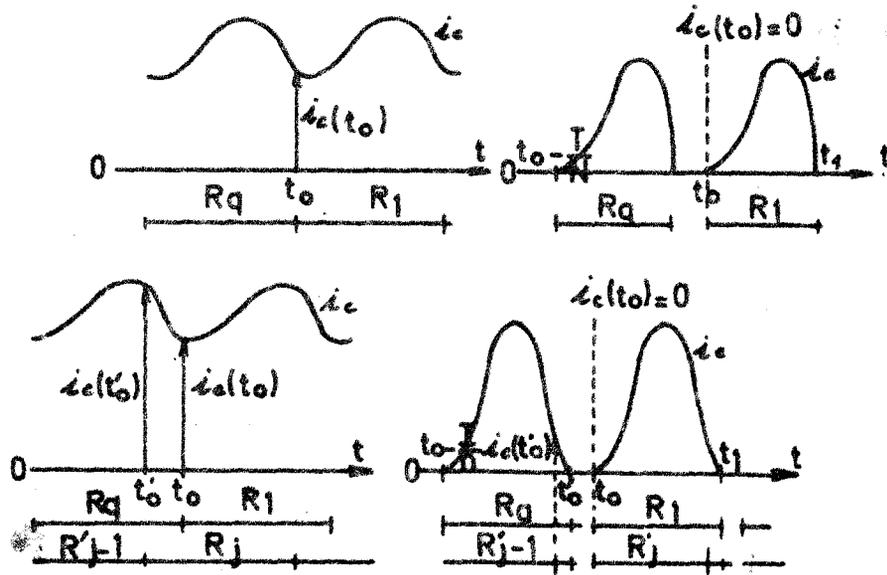


Figure 20. - Lecture des valeurs de i_c intervenant dans le calcul de $\Delta_1 U'_c$.

La forme d'onde théorique de i_c présente une discontinuité lorsqu'on suppose nulle l'inductance du récepteur. La réactance N_2 venant en amont des redresseurs empêche les brusques variations des courants dans les enroulements secondaires, donc de i_c qui se déduit de ces derniers par une combinaison linéaire.

La chute inductive $\Delta_1 U'_c$ étant proportionnelle au courant en début de commutation, sur la forme d'onde simplifiée il faut lire $i_c(t_0)$ juste avant la discontinuité (figure 21).

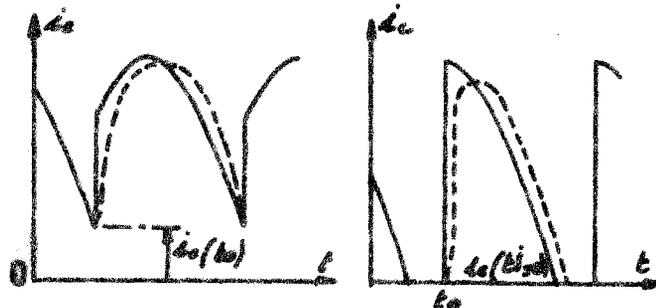


Figure 21. - Lecture de $i_c(t_0)$ lors du débit d'un montage redresseur sur un récepteur sans réactance. (en traits interrompus, modification de $i_c(t)$ due aux inductances N_2).

1.3.2. Chute de tension ohmique $\Delta_2 U'_c$

Pour calculer la chute de tension redressée moyenne due aux résistances, il est commode de passer par les pertes Joule.

$$p'_j = q r_2 I'_s{}^2 + q_1 r_1 I'_p{}^2 + q_1 r'_1 J_p{}^2,$$

comme on l'avait fait lorsque le courant redressé était supposé constant (voir § 03 et 04).

Pour la majorité des montages industriellement utilisés (P.2, P.D.2, P.D.3, S.3...) lorsque tous les redresseurs sont des diodes ou tous des thyristors, nous avons vu que

$$\frac{I'_s}{I_s} = \frac{I'_p}{I_p} = \frac{J'_p}{J_p} = \frac{I'_c \text{ eff}}{I_c} = f_F$$

$$\text{donc } p'_j = p_j f_F^2$$

Puisqu'on désigne par R_c , la résistance totale du montage, ramenée du côté continu, $R_c = \frac{P_s}{I_c^2}$, la chute de tension due aux résistances au lieu de

$$\Delta_2 U_c = R_c I_c$$

deviendra

$$\Delta_2 U'_c = f_F^2 R_c I_c \quad (38)$$

Cette relation s'applique aussi aux montages mixtes P.D.3 ou S.3 tant que ψ est inférieur à $\pi - \frac{2\pi}{q}$

Lorsque l'égalité entre tous les rapports $\frac{J'_p}{J_p}$, $\frac{I'_p}{I_p}$, $\frac{I'_s}{I_s}$ et $\frac{I'_c \text{ eff}}{I_c}$ n'est pas assurée, la connaissance de leurs variations, en fonction de ψ et des paramètres caractéristiques du récepteur, suffit à déterminer les divers courants, donc les pertes Joule et la chute ohmique.

$$\Delta_2 U'_c = \frac{1}{I_c} (q r_2 I'_s{}^2 + q_1 r_1 I'_p{}^2 + q_1 r'_1 J_p{}^2)$$

ou

$$\Delta_2 U'_c = \frac{1}{I_c} \left[q r_2 I_s^2 \left(\frac{I'_s}{I_s} \right)^2 + q_1 r_1 I_p^2 \left(\frac{I'_p}{I_p} \right)^2 + q_1 r'_1 J_p^2 \left(\frac{J'_p}{J_p} \right)^2 \right]$$

(39)

L'étude de la chute ohmique découle donc directement de celle des courants.

1.3.3. Chute de tension due aux redresseurs $\Delta_3 U'_c$

Suivant le schéma adopté, le courant i_c passe dans un redresseur (montages P.) ou deux redresseurs conducteurs en série (montages P.D. ou S.).

La chute de tension interne des redresseurs au silicium dépend peu du courant direct qui les traverse. Si on la suppose constante, on pourra prendre :

$$\Delta_3 U'_c = (u)_{I_c} \quad \text{ou} \quad \Delta_3 U'_c = 2 (u)_{I_c} \quad (40)$$

comme si le courant i_c était constamment égal à sa valeur moyenne.

Lorsqu'on veut obtenir une précision supérieure, on prend comme caractéristique des redresseurs passants une droite d'équation:

$$u = u_0 + a i_c$$

Le courant i_c a pour période $\frac{T}{n}$; chaque redresseur écoule une ($n = q$) ou deux ($n = 2q$) périodes de i_c durant chaque intervalle T .

Si la conduction est continue,

$$\begin{aligned} \Delta_3 U'_c &= (1 \text{ ou } 2) \frac{n}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \frac{T}{n}} (u_0 + a i_c) dt = (1 \text{ ou } 2)(u_0 + a I_c) \\ &= (1 \text{ ou } 2) (u)_{I_c} \end{aligned}$$

on retrouve les valeurs données par les relations (40)

Si la conduction est discontinue

$$\begin{aligned} \Delta_3 U'_c &= (1 \text{ ou } 2) \frac{n}{T} \int_{t_0}^{t_1} (u_0 + a i_c) dt \\ &= (1 \text{ ou } 2) \left[u_0 \frac{t_1 - t_0}{T/n} + a I_c \right] \\ &= (1 \text{ ou } 2) \left[(u)_{I_c} - u_0 \left(1 - \frac{t_1 - t_0}{T/n} \right) \right] \quad (41) \end{aligned}$$

A I_c donné $\Delta_3 U'_c$ diminue au fur et à mesure que la conduction est plus discontinue.

I.3.4. Vérifications expérimentales

La détermination de la chute de tension $\Delta U'_c$ à l'aide des relations que nous venons d'établir repose sur un grand nombre d'hypothèses :

- addition des chutes partielles évaluées séparément,
- emploi des valeurs des courants trouvées dans l'étude simplifiée,
- extension à tous les cas de la proportionnalité de $\Delta U'_c$ au courant à commuter.

Il est donc important de vérifier que :

- $\Delta U'_c$ ainsi évalué est plus voisin de la réalité que la chute de tension ΔU_c calculé en supposant toujours i_c constant,
- $\Delta U'_c$ donne la chute de tension au début de la caractéristique $U'_c (I_c)$ avec une approximation suffisante.

Le débit du montage mixte P.D. 3 sur un récepteur purement résistant nous a semblé particulièrement intéressant pour cette vérification car :

- le calcul de la chute de tension est aisé puisque la forme d'onde de i_c est bien définie,
- quelques complications possibles **interviennent** :
 - . fonctionnement suivant deux modes différents,
 - . nécessité de lire deux valeurs de i_c à chaque période,
 - . discontinuité dans la forme d'onde théorique de i_c .

Le tableau de la page 70 rappelle les caractéristiques principales du montage P.D. 3 débitant sur un récepteur résistant, en fonction de .

Le montage expérimental est le même que celui déjà présenté à la figure 12.

Nous avons pointé (fig. 22) les valeurs relevées $\Delta U'_c - \Delta U_3 U'_c$ pour les valeurs $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ de l'angle ψ . Pour chacune nous avons tracé (droite en trait continu) la caractéristique calculée par les procédés correctifs, la caractéristique (droite en traits mixtes) donnée par les relations établies en supposant i_c constant.

Compte tenu de la faiblesse de $\Delta U'_c$ nous avons pu la mesurer avec une meilleure précision par différence avec une alimentation stabilisée digitale. permettant une lecture sur les faibles calibres du voltmètre.

Quand ψ est égal à 60° et 90° la courbe obtenue par l'étude correctrice ne tient compte que des chutes obliques, on peut remarquer l'influence

ψ	0°	60°	180°
$U_{co} = R I_c$		$\frac{3 \sqrt{3} V_m}{2 \pi} (1 + \cos \psi)$	
I'_{ceff}	$\frac{V_m}{R} \sqrt{\frac{3}{2} + \frac{9 \sqrt{3} (1 + \cos 2\psi)}{8 \pi}}$	$\frac{3 V_m}{2R} \sqrt{1 - \frac{\psi}{\pi} + \frac{\sin 2\psi}{2 \pi}}$	
f_F	$\frac{\sqrt{4 \pi^2 + 3\pi \sqrt{3} (1 + \cos 2\psi)}}{3 \sqrt{2} (1 + \cos \psi)}$	$\frac{\sqrt{2 \pi^2 - 2\pi \psi + \pi \sin 2\psi}}{\sqrt{2} (1 + \cos \psi)}$	
$i_c (t_0)$	$\sqrt{3} \frac{V_m}{R} \sin \left(\frac{2\pi}{3} + \psi \right)$		0
$i_c (t'_0)$	$\frac{3 V_m}{2R}$		0
$I'_s = \frac{n_1}{n_2} I'_p$	$\frac{V_m}{R} \sqrt{1 + \frac{3 \sqrt{3} (1 + \cos 2\psi)}{4 \pi}}$	$\frac{V_m}{R} \sqrt{\frac{3}{2} - \frac{3\psi}{2\pi} + \frac{3 \sin 2\psi}{4 \pi}}$	
$\Delta_1 U'_c$	$\frac{3 \sqrt{3}}{2\pi} \frac{N_2 \omega}{R} \left[\sin \left(\frac{2\pi}{3} + \psi \right) + \frac{\sqrt{3}}{2} \right] V_m$		0
$\Delta_2 U'_c$	$\frac{3}{I_c} \left[r_1 I_p'^2 + r_2 I_s'^2 + r'_1 J_p'^2 \right]$		
$\Delta_3 U'_c$	$[u_1]_{I_c} + [u_2]_{I_c}$		

Caractéristiques du montage P.D.3 débitant sur une résistance.

plus notable du facteur f_F quand on passe de 60° à 90° malgré la dispersion des points relevés, on vérifie bien qu'ils sont plus près de la droite obtenue par correction des relations classiques. Quand i_c est relativement important, à cause de l'empiétement, la chute de tension est encore plus faible que celle prévue par l'étude corrective.

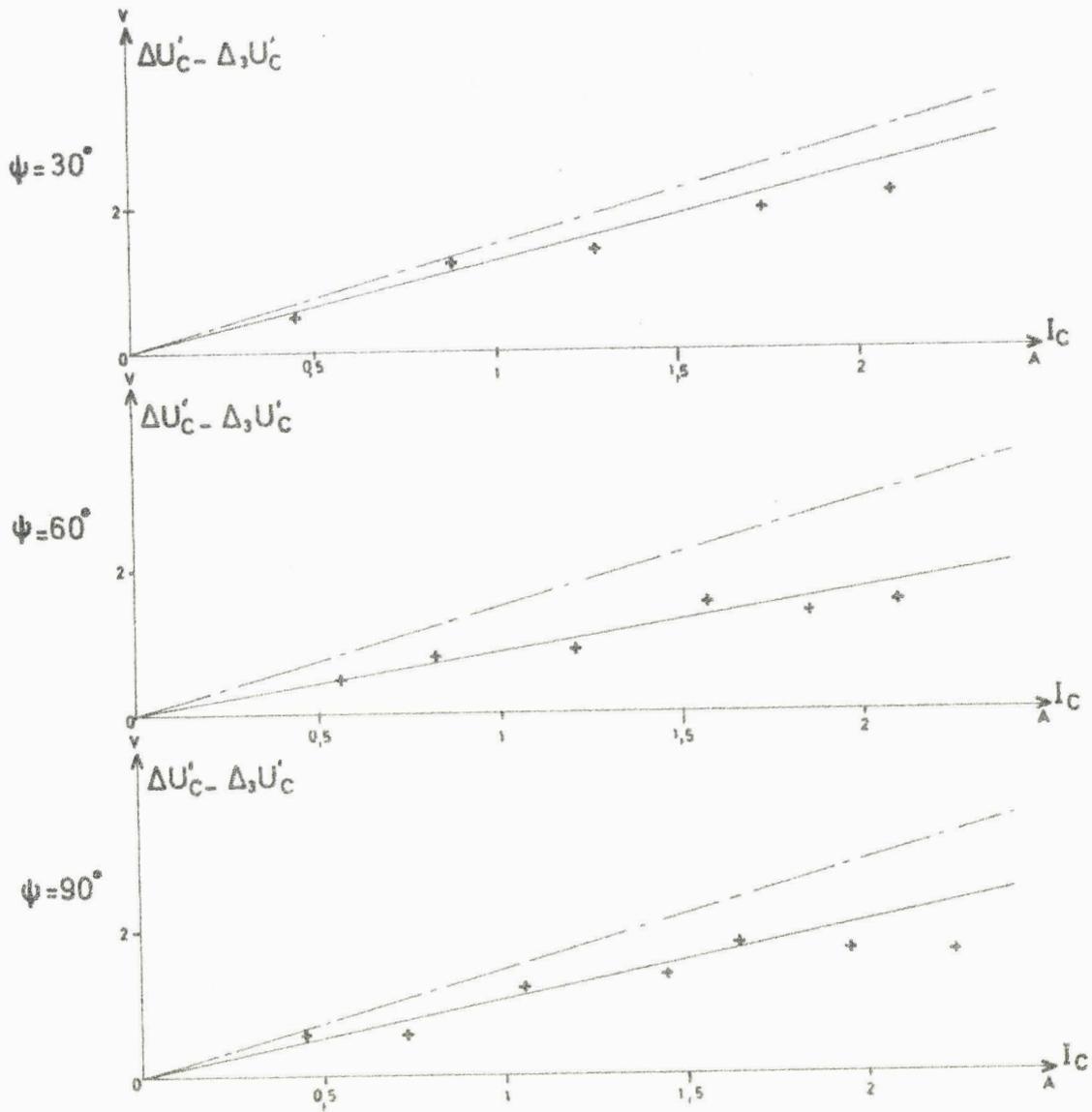


Figure 22. - Courbes $\Delta U'_C - \Delta_3 U'_C$ (supposé égal à 1,2 V) relevées sur un montage mixte P.D.3 débitant sur résistance.

I.4. BILAN DE L'ETUDE DES PROCEDES DE CORRECTION

Pour déterminer les diverses caractéristiques d'un montage redresseur, lorsque l'hypothèse du courant redressé constant, utilisée dans l'étude générale, ne peut être retenue, nous proposons de suivre le même plan que celui de cette étude générale en corrigeant chaque fois que c'est nécessaire, les résultats donnés par celle-ci.

Après avoir examiné les étapes successives qui permettent de déterminer le fonctionnement et les tensions à chute de tension négligeable, les courants et les chutes de tension en charge, nous avons pu montrer que :

a) pour chaque type de récepteur, l'étude du fonctionnement doit tenir compte simultanément du courant i_c et de la tension u'_c redressés. En fonction du ou des paramètres caractérisant la charge, on calcule l'intervalle de conduction, la valeur moyenne et l'ondulation de u'_c , les valeurs moyenne et efficace de i_c et son ondulation.

b) pour la plupart des montages, la connaissance de u'_c et de i_c suffit pour obtenir tous les autres résultats. On peut en effet reprendre pour les courants dans les diodes, dans les bobines secondaires et primaires du transformateur et dans la ligne d'alimentation, les relations de l'étude générale en les corrigeant à l'aide du facteur de forme de i_c . De même connaissant i_c , on peut corriger immédiatement les diverses causes de chute de tension.

On voit l'intérêt de la méthode proposée ; elle permet d'éviter, pour chaque valeur des paramètres caractérisant le récepteur, de reprendre les parties les plus délicates de l'étude d'un montage redresseur. A partir du simple examen du courant i_c qu'une tension de forme d'onde connue débite dans la charge, on obtient toutes les caractéristiques du montage.

Nous avons en outre proposé une méthode générale pour l'étude du courant redressé i_c et indiqué diverses simplifications allégeant le calcul des valeurs moyenne et efficace de ce courant.

II. CARACTERISTIQUES DU MONTAGE REDRESSEUR MIXTE EN PONT TRIPHASE

Il nous a semblé intéressant de choisir, pour appliquer les procédés généraux que nous venons d'établir, le pont triphasé mixte à trois diodes et trois thyristors, en raison du grand intérêt pratique qu'il présente. En outre, il représente un des cas les plus compliqués : la tension redressée présente deux expressions différentes au cours de chacune de ses périodes, le passage du courant redressé aux courants secondaires s'opère différemment suivant la valeur de l'angle ψ .

Pour faciliter l'utilisation de l'ensemble des résultats obtenus dans cette deuxième partie, nous indiquerons dès le départ les caractéristiques qu'il convient de déterminer et que nous regrouperons à la fin du texte explicatif.

2.1. PLAN DE L'ETUDE

La figure 23 représente le montage en pont mixte débitant sur un récepteur sans dérivation résistive, inductif et présentant une force contre-électromotrice ; elle rappelle également les notations adoptées.

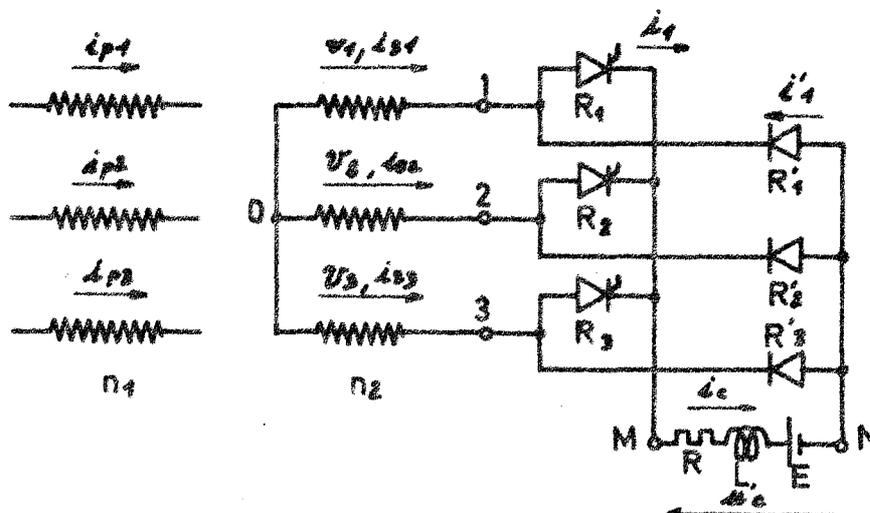


Figure 23. - Montage mixte triphasé débitant sur un récepteur R, L, E .

Le fonctionnement du montage dépend de l'angle de retard ψ , compté par rapport à l'instant où $v_1 = V_m \sin \omega t$ devient supérieur à v_3 .

$$R_1 \text{ devient conducteur pour } t_0 = \frac{T}{12} + \frac{\psi}{\omega}$$

$$R_2 \text{ et } R_3 \text{ pour } t_0 + \frac{T}{3} \text{ et } t_0 + \frac{2T}{3}$$

$$R'_1 \text{ devient conducteur pour } t = \frac{7T}{12}$$

$$R'_2 \text{ et } R'_3 \text{ pour } \frac{11T}{12} \text{ et } \frac{3T}{12}$$

Le récepteur est caractérisé par deux paramètres

$$Q = \frac{L \omega}{R} \text{ et } m = \frac{E}{V_m}$$

Nous envisagerons successivement les quatre cas suivants :

. Récepteur infiniment inductif (paragraphe 2.2.) :

$$Q = \infty, m = 0$$

Si Q est infini, la nature du récepteur n'intervient pas, la conduction est toujours continue. Toutefois le montage ne peut débiter sur une f.e.m. E que si U_{c0} est supérieur à E .

Ce bref rappel de l'étude générale nous permettra de tracer les courbes :

$\frac{U_{c0}}{(U_{c0})_{\psi=0}}$	= f (ψ)	}	
K_0	= f (ψ)	}	
v_{imax}	= f (ψ)	}	planche I
$\frac{I_s}{I_c}$	= f (ψ)	}	
f'_s	= f (ψ)	}	

. Récepteur purement résistif (paragraphe 2.3.) :

$$Q = 0, m = 0$$

Le courant i_c a la même forme d'onde que la tension redressée u_c ; à partir de $\psi = \frac{\pi}{3}$ apparaissent des intervalles à tension et courant nuls.

Nous tracerons les courbes :

$f_F = \frac{I'_{ceff}}{I_c}$	= f (ψ)	}	
f'_s	= f (ψ)	}	
$\frac{R_{ic}(t_0)}{V_m}$	= f (ψ)	}	planche II
$\frac{R_{ic}(t'_0)}{V_m}$	= f (ψ)	}	

. Récepteur résistant et inductif (paragraphe 2.4.) :

$$\underline{Q \neq 0, m = 0}$$

Quelle que soit la valeur des paramètres Q et ψ , nous montrerons que la conduction ne peut être que continue et donc que la tension redressée reste celle précédemment déterminée. Chaque grandeur variant en fonction de ψ doit maintenant être déterminée pour diverses valeurs de Q ; nous tracerons les courbes pour $Q = 0,1$; $Q = 0,3$; $Q = 1$; $Q = 3$; $Q = 10$. Les paragraphes 2.2. et 2.3. donnent les caractéristiques limites correspondant à $Q = 0$ et $Q = \infty$.

Nous tracerons les familles de courbes donnant :

$K = \frac{i_{cmax} - i_{cmin}}{2 I_C} = f(\psi)$	Planche III
$f_F = \frac{I'_{ceff}}{I_C} = f(\psi)$	Planche IV
$\frac{Ric(t_0)}{V_m} = f(\psi)$	Planche V
$\frac{Ric(t'_0)}{V_m} = f(\psi)$	Planche VI
$\frac{I'_s}{I_C} = f(\psi)$	Planche VII
$f'_s = f(\psi)$	Planche VIII

. Récepteur résistant, inductif et présentant une f.c.e.m.

(paragraphe 2.5.) : $Q \neq 0, m \neq 0$

La tension aux bornes du récepteur, quand le montage redresseur est bloqué, n'est plus nulle mais égale à E . La tension redressée U'_{CO} peut maintenant être affectée par la nature du récepteur, de plus il faut s'assurer qu'à l'instant du déblocage des thyristors ils entrent effectivement en conduction.

Après avoir présenté les différents modes de fonctionnement possibles du montage nous justifierons l'intérêt de l'étude de la conduction continue à laquelle nous nous limiterons. La liaison avec l'étude précédente permettra, à partir de l'ondulation du courant redressé débité sur le circuit R, L , de déterminer pour chaque valeur du paramètre Q la courbe limitant la zone où les paramètres m et ψ assurent la conduction continue du montage. On tracera alors pour $Q = 0$; $Q = 0,1$; $Q = 0,3$; $Q = 10$ et $Q = \infty$ la famille des courbes : $m_{lim} = f(\psi)$ Planche IX.

L'étude du courant redressé étant étroitement liée à celle du paragraphe précédent on pourra déduire de celui-ci quelques résultats. On déterminera ensuite les familles de caractéristiques indiquées dans le tableau suivant et correspondant aux valeurs : 0,5 - 0,75 - 1 - 1,25 - 1,5 du paramètre m , chacune d'elles n'étant valable que dans les limites déjà trouvées de la conduction continue.

m	0,5	0,75	1	1,25	1,5
$f_F = f(\psi)$	P1.X	P1. XI	P1.XII	P1. XIII	P1. XIV
$\frac{I'_s}{I_c} = f(\psi)$	P1.XV	P1. XVI	P1.XVII	P1. XVIII	P1. XIX
$f'_s = f(\psi)$	P1.XX	P1. XXI	P1.XXII	P1. XXIII	P1. XXIV

Il faut remarquer que, plus m est fort, plus étroite est la plage de valeurs possibles de l'angle ψ .

Les relations établies au cours de cette étude permettraient de tracer les courbes intermédiaires dans le domaine où l'on voudrait suivre plus finement l'influence de Q ou de m .

L'étude des récepteurs infiniment inductif, purement résistif, puis résistif et inductif, ne constitue que l'examen des cas particuliers de l'étude du récepteur R, L, E. Il nous a semblé préférable de les examiner au préalable pour ne pas aborder immédiatement des calculs relativement lourds et compliqués et faire apparaître au plus tôt les caractéristiques communes à tout régime de conduction continue. Nous n'avons pas cru devoir traiter séparément le cas de la charge R, E ($Q = 0, m \neq 0$) car elle n'est pas indispensable dans la progression de cette étude.

2.2. ETUDE DU MONTAGE P.D.3 DEBITANT SUR UN RECEPTEUR INFINIMENT INDUCTIF

Le cas du débit sur un récepteur infiniment inductif correspond à l'étude générale classique, puisque le courant redressé ne peut s'annuler et rend le fonctionnement indépendant de la nature du récepteur. Ce sont les résultats de cette étude qui seront corrigés par des coefficients calculés lors du débit sur d'autres types de récepteurs selon les procédés proposés au paragraphe I.

La figure 24 représente le montage triphasé en pont mixte débitant sur un récepteur infiniment inductif.

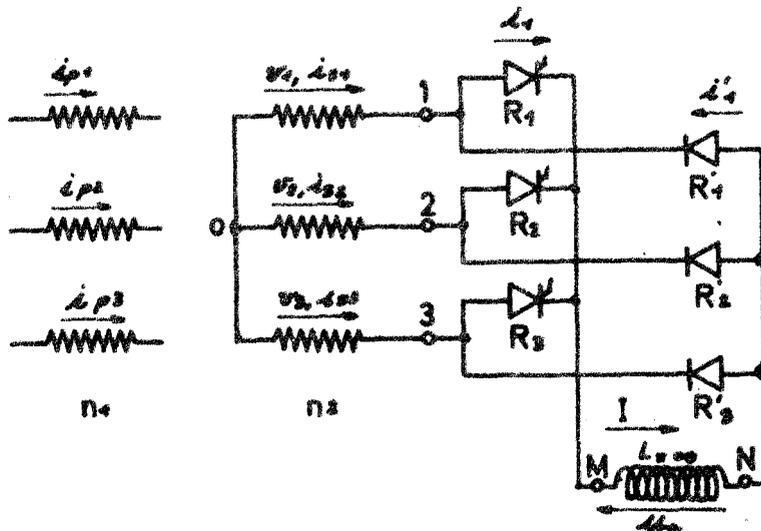


Figure 24. - Montage mixte triphasé débitant sur un récepteur $L = \infty$

2.2.1. Etude des tensions

Dans cette étude préliminaire on fera les hypothèses simplificatives suivantes :

- le système redresseur de la figure 24 est supposé alimenté par une source triphasé parfaitement équilibrée et une ligne sans impédance.

- Les temps d'établissement de la tension et de recouvrement aux bornes des redresseurs peuvent être négligés.
- Les redresseurs sont parfaits et sans chute de tension interne.
- Le système a atteint son régime permanent.

2.2.1.1. Etude de la tension redressée

Le débit se faisant sur une self infinie, le courant redressé ne peut s'annuler ; les diodes R'_1 sont alors commandées par leur tension inverse et les redresseurs R_1 par l'instant d'application entre leur gachette et leur cathode de la tension d'amorçage. Le montage débite la différence entre les tensions $(v_M - v_0)$ fournie par un commutateur + positif, formé par les redresseurs à cathode commune, et $(v_N - v_0)$ fournie par un commutateur + négatif, formé par les diodes à anode commune. Le fonctionnement du montage dépend de l'angle ψ de retard à l'amorçage des redresseurs.

2.2.1.1.1. Etude de la forme d'onde de la tension redressée

Selon que le redresseur et la diode reliés à une même phase ne sont jamais ou sont parfois conducteurs en même temps on rencontre deux formes d'ondes différentes. Cependant dans les deux cas la tension redressée est de période $\frac{T}{3}$.

Ainsi la tension redressée u_c :

- Pour $0^\circ \leq \psi < 60^\circ$ - ne peut s'annuler, est formée de deux portions de sinusoïde.
- Pour $60^\circ \leq \psi < 180^\circ$ s'annule à certains instants de sa période, est formée d'une seule portion de sinusoïde.
- Pour $\psi > 180^\circ$ u_c est constamment nul.

La figure 25 donne un exemple de chaque type de fonctionnement ; on a indiqué les redresseurs assurant la conduction et tracé les formes d'ondes de la tension u_c et des tensions aux bornes de R_1 et R'_1 .

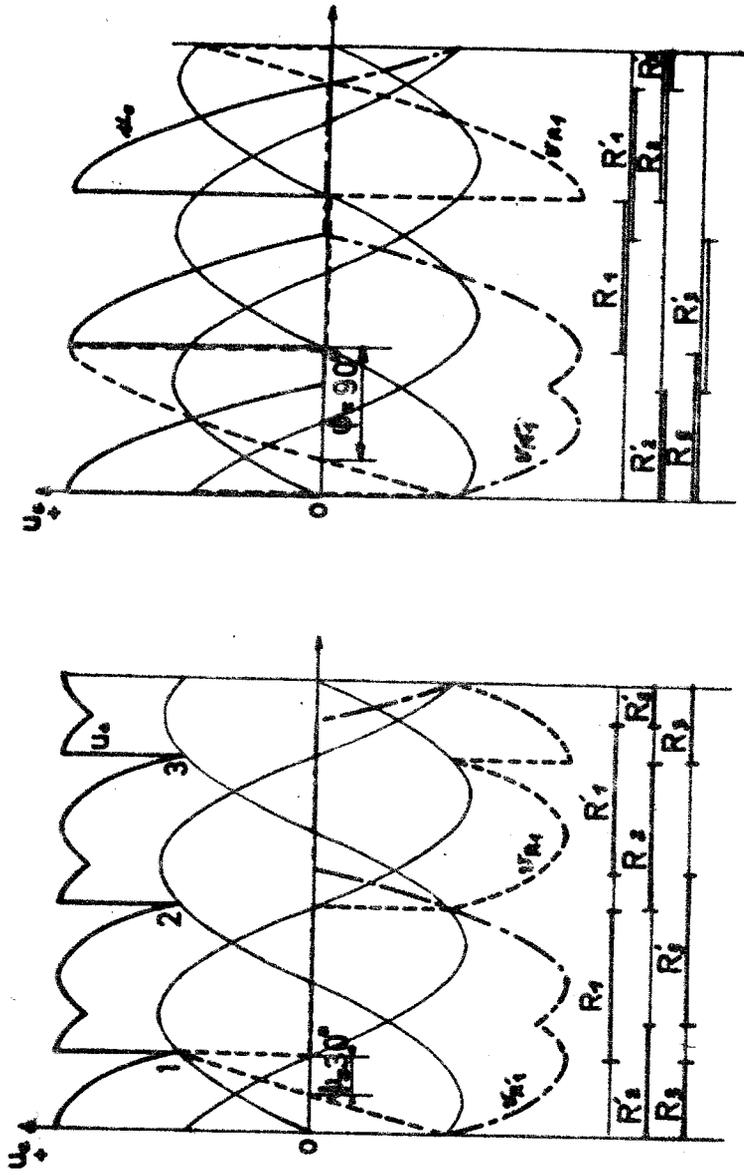


Figure 25. - Fonctionnement type pour $\psi = 30^\circ$ et $\psi = 90^\circ$.

- Valeur instantanée de la tension redressée

Pendant l'intervalle de durée $\frac{T}{3}$ qui suit l'entrée en conduction du redresseur R_1 , la tension u_c a pour expressions :

• Pour $0^\circ \leq \psi < \frac{\pi}{3}$

Pour $\frac{\pi}{6\omega} + \frac{\pi}{\omega} \leq t \leq \frac{\pi}{2\omega}$, R_1 et R'_2 conducteurs
 $u_c = \sqrt{3} V_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{6})$
 Pour $\frac{\pi}{2\omega} \leq t \leq \frac{5\pi}{6\omega} + \frac{\psi}{\omega}$, R_1 et R'_3 conducteurs
 $u_c = \sqrt{3} V_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{6})$

• Pour $\frac{\pi}{3} \leq \psi \leq \pi$

Pour $\frac{\pi}{6\omega} + \frac{\psi}{\omega} \leq t \leq \frac{7\pi}{6\omega}$, R_1 et R'_3 conducteurs
 $u_c = \sqrt{3} V_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{6})$
 Pour $\frac{7\pi}{6\omega} \leq t \leq \frac{5\pi}{6\omega} + \frac{\psi}{\omega}$, $u_c = 0$

- Valeur maximale et minimale de la tension redressée

Les expressions de la valeur instantanée de u_c permettent de dresser aisément le tableau suivant donnant, pour chaque valeur de l'angle ψ , les valeurs maximale et minimale de la tension redressée.

ψ	0°	60°	90°	180°
$u_c \text{ max}$	$\sqrt{3} V_m$		$\sqrt{3} V_m \sin \psi$	
$u_c \text{ min}$	$\sqrt{3} V_m \sin \left(\frac{2\pi}{3} + \psi\right)$		0	

(42)

On peut remarquer que $u_{c\text{min}}$ est toujours nul quand ψ est supérieur à 60° ce qui correspond au débit simultané du redresseur et de la diode reliés à la même phase. $u_{c\text{max}}$ est atteint deux fois au cours d'une période de u_c pour $0^\circ < \psi < 30^\circ$ et une seule fois pour $\psi > 30^\circ$.

2.2.1.1.2. Valeur moyenne de la tension redressée

Compte tenu de la périodicité de la tension redressée et de ses expressions, on calcule sa valeur moyenne U_{CO} pour ψ inférieur à 60° puis pour ψ supérieur à cette limite.

$$\begin{aligned}
 & \cdot 0 < \psi < \frac{\pi}{3} \\
 U_{CO} &= \frac{3 \sqrt{3} V_m}{2\pi} \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{3}-\psi} \sin \left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) d\theta + \int_0^{\frac{\pi}{3}+\psi} \sin \left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) d\theta \right\}
 \end{aligned}$$

Soit en intégrant :

$$U_{CO} = \frac{3 \sqrt{3} V_m}{2\pi} \left\{ \left[-\cos \left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \right]_0^{\frac{\pi}{3}-\psi} + \left[-\cos \left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \right]_0^{\frac{\pi}{3}+\psi} \right\}$$

Ce qui donne :

$$U_{CO} = \frac{3 \sqrt{3} V_m}{2\pi} (1 + \cos \psi)$$

$$\cdot \frac{\pi}{3} < \psi < \pi$$

$$U_{CO} = \frac{3 \sqrt{3} V_m}{2\pi} \int_0^{\pi-\psi} \sin \theta d\theta = \frac{3 \sqrt{3} V_m}{2\pi} \left[\cos \theta \right]_{\pi-\psi}^0 = \frac{3 \sqrt{3} V_m}{2\pi} (1 + \cos \psi)$$

Quelle que soit la valeur de l'angle ψ la valeur moyenne de la tension redressée est donnée par la formule classique :

$$\boxed{U_{CO} = \frac{3 \sqrt{3} V_m}{2\pi} (1 + \cos \psi)} \quad (43)$$

Cette formule montre le résultat prévisible que la tension redressée moyenne diminue au fur et à mesure que l'angle de retard à l'amorçage ψ augmente. La planche I donne la courbe $\frac{U_{CO}}{(U_{CO})_{\psi=0}}$ en fonction de ψ .

2.2.1.1.3. Taux d'ondulation de la tension redressée

Le rapprochement des différentes formules (42) et de la formule (43) permet de dresser le tableau donnant, en fonction de ψ , le taux d'ondulation de la tension redressée.

ψ	0°	60°	90°	180°
K_0	$\frac{\pi (2 - \sqrt{3} \cos \psi + \sin \psi)}{6 (1 + \cos \psi)}$	$\frac{\pi}{3 (1 + \cos \psi)}$	$\frac{\pi \sin \psi}{3 (1 + \cos \psi)}$	

(44)

Ce tableau permet de tracer en fonction de ψ les variations du taux d'ondulation K_0 de la tension redressée à vide (cf planche I). Ce rapport croît, sans discontinuité, de 0,07 à $+\infty$ quand ψ passe de 0 à 180°.

2.2.1.2. Etude de la tension inverse aux bornes des redresseurs et des diodes.

2.2.1.2.1. Tension inverse aux bornes des diodes

Les diodes à anodes communes (cf figure 24) forment un commutateur "plus négatif" fonctionnant en commutation naturelle. Quelle que soit la valeur de l'angle ψ la tension inverse aux bornes d'une diode a toujours même forme d'onde (cf $v_{R'1}$ à la figure 25) puisqu'elle correspond à la différence entre une tension et chacune des tensions des phases conductrices.

On voit que la tension inverse aux bornes d'une diode est formée de deux portions de tensions composées et que la valeur maximale est égale à la valeur de crête d'une tension composée ; soit $\sqrt{3} V_m$, atteinte deux fois au cours d'une période T (instants $\frac{T}{6}$ et $\frac{T}{3}$ dans le cas de la diode $R'1$).

Les diodes d'un pont mixte triphasé doivent donc être choisies pour pouvoir supporter une tension inverse égale à la valeur de crête d'une tension entre phases.

$$v_{i\max} = 2 V_m \cos \frac{\pi}{6} = \sqrt{3} V_m \quad (45)$$

2.2.1.2.2. Tension inverse aux bornes des redresseurs

Les redresseurs à cathode commune (cf figure 24) forment un commutateur "plus positif" mais ne fonctionnent pas en commutation

naturelle. Selon la valeur de l'angle ψ , la tension aux bornes des redresseurs peut prendre des valeurs positives pendant la phase de blocage et subir des discontinuités (cf figure 25) néanmoins la forme d'onde de la tension inverse aux bornes des redresseurs (cf v_{R1} à la figure 25) est encore formée de portions de tensions composées.

L'étude de la forme d'onde de la tension inverse montre qu'on doit considérer deux cas (cf figure 25):

. $0^\circ \leq \psi < 90^\circ$

La tension aux bornes du redresseur est positive avant l'amorçage du redresseur et elle est maximale à l'instant du déblocage. La tension blocable dans le sens direct sera alors :

$$v_{Bmax} = \sqrt{3} V_m \sin \psi \quad (46)$$

A la fin de la phase conductrice, la tension aux bornes du redresseur devient négative. Quelle que soit la valeur de ψ la tension inverse maximale est égale à la valeur de crête d'une tension composée soit :

$$v_{imax} = \sqrt{3} V_m \quad (47)$$

. $90^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$

La tension aux bornes du redresseur est positive avant l'amorçage mais le maximum se produit avant l'instant de commande du redresseur. Ce maximum est indépendant de ψ et a pour valeur :

$$v_{Bmax} = \sqrt{3} V_m \quad (46)'$$

A la fin de la conduction la tension devient négative en prenant sa valeur maximale qui vaut alors :

$$v_{imax} = \sqrt{3} V_m \sin \psi \quad (47)'$$

Les formules (46) et (47) montrent, que lorsque ψ va de 0 à π , v_{imax} varie de la même façon que v_{Bmax} lorsque ψ varie de π à 0.

Le tableau résumé suivant permet de tracer la courbe $\frac{v_{imax}}{\sqrt{3} V_m} = f(\psi)$ de la planche I.

ψ	0°	90°	180°
tension directe maximale	$\sqrt{3} V_m \sin \psi$		$\sqrt{3} V_m$
tension inverse maximale	$\sqrt{3} V_m$		$\sqrt{3} V_m \sin \psi$

(46)

(47)

Les redresseurs d'un pont triphasé mixte destiné à travailler à toutes les valeurs de l'angle ψ doivent être choisis de façon à supporter dans le sens direct comme dans le sens inverse une tension égale à la valeur de crête d'une tension composée du réseau d'alimentation.

2.2.2. Etude des courants

2.2.2.1. Etude du courant redressé

- Forme d'onde, facteur de forme

L'équation du courant redressé, lorsque le montage débite sur une self infinie, est :

$$u_c = L \frac{di_c}{dt}$$

D'après ce qui précède on sait que u_c est borné, donc $\frac{di_c}{dt}$ est nul ; le courant redressé est constant, et, donc, égal à sa valeur moyenne I_c , à sa valeur efficace I_{ceff} , à son maximum et à son minimum :

$i_c = I_c = I_{ceff} = i_{cmax} = i_{cmin} = \text{constante}$	(48)
---	------

Le facteur de forme du courant redressé, égal au quotient de sa valeur efficace par sa valeur moyenne, est évidemment égal à l'unité :

$f_F = 1$	(49)
-----------	------

- Variation du courant lors des commutations

Le courant redressé étant constant, lors des commutations aux bornes des redresseurs ou des diodes, la variation de courant est égale à I_c . Ce résultat sert au calcul de la chute de tension due aux réactances amont.

$\Delta i = i_c(t_0); i_c(t'_0) = I_c$	(50)
--	------

2.2.2.2. Etude du courant dans les redresseurs

2.2.2.2.1. Relations générales applicables quel que soit ψ et quel que soit le récepteur

L'étude des courants, étant menée en négligeant les réactances placées en amont des redresseurs, (cf § I.2.2.) peut conduire à des discontinuités, tant pour le courant en ligne que pour les courants dans les redresseurs, puisqu'on néglige le phénomène d'empêtement ; on n'a toujours alors que deux redresseurs passants à la fois, le courant étant acheminé par un seul redresseur et par une seule diode.

Chaque redresseur et chaque diode étant conducteurs pendant un tiers de la période T, les courants i et i' sont égaux au courant i_c pendant un tiers de la période T. La valeur moyenne du courant dans un redresseur ou une diode est égale au tiers de la valeur moyenne du courant redressé I_c :

$$i_{\text{moy}} = i'_{\text{moy}} = \frac{I_c}{3} \quad (51)$$

La valeur efficace du courant I dans un redresseur ou I' dans une diode est donc $\sqrt{3}$ fois plus faible que la valeur efficace du courant redressé $I_{c\text{eff}}$.

$$I = I' = \frac{I_{c\text{eff}}}{\sqrt{3}} \quad (52)$$

Chaque redresseur ou diode acheminant i_c pendant $\frac{T}{3}$ donc pendant un motif complet de i_c , la valeur maximale du courant dans les redresseurs ou les diodes est égale à la valeur maximale du courant redressé $i_{c\text{max}}$.

$$i_{\text{max}} = i'_{\text{max}} = i_{c\text{max}} \quad (53)$$

2.2.2.2.2. Cas du débit sur self infinie

Puisque dans le cas étudié i_c est constamment égal à I_c :

- Valeur moyenne : $i_{\text{moy}} = i'_{\text{moy}} = \frac{I_c}{3}$
- valeur efficace : $I = I' = \frac{I_c}{\sqrt{3}}$ (54)
- valeur maximale : $i_{\text{max}} = i'_{\text{max}} = I_c$

2.2.2.3. Etude du courant et de la puissance au secondaire du transformateur

2.2.2.3.1. Relations générales applicables, quel que soit le récepteur, pour ψ inférieur à 60°

Quand ψ est inférieur à 60° le redresseur et la diode relié à une même phase ne débitant pas simultanément, chaque redresseur et chaque diode acheminant i_c pendant une durée égale à sa période $T/3$, chaque phase secondaire débite $+ i_c$ pendant $\frac{T}{3}$ par l'intermédiaire du redresseur et $- i_c$ par l'intermédiaire de la diode pendant $\frac{T}{3}$. On en déduit aisément les valeurs du courant secondaire :

. La valeur maximale du courant secondaire est égale à celle de i_c :

$$i'_{smax} = i_{cmax} \quad (55)$$

. La valeur moyenne du courant dans la ligne secondaire est nulle

$$i'_{smoy} = 0 \quad (56)$$

. La valeur efficace du courant secondaire est liée de façon simple à celle du courant redressé :

$$I'_s = I'_{ceff} \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (57)$$

Dans le cas où ψ est inférieur à 60° les remarques précédentes permettent de déduire directement le rapport $\frac{I'_s}{I_c}$ du facteur de forme du courant redressé.

$$\frac{I'_s}{I_c} = f_F \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (58)$$

Dans le cas où ψ est inférieur à 60° les valeurs moyennes et efficaces des courants dans les redresseurs et en ligne se déduisent très facilement de celle du courant redressé.

2.2.2.3.2. Application au débit sur self infinie pour ψ inférieur à 60°

Comme i_c est constamment égal à I_c :
- la valeur moyenne du courant secondaire est $i_{smoy} = 0$.

- la valeur efficace du courant secondaire est

$$I_s = I_c \sqrt{\frac{2}{3}} \text{ d'où } \frac{I_s}{I_c} = \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (59)$$

- le facteur de puissance secondaire est :

$$f_s = \frac{\sqrt{2} U_{Co} I_c}{3 V_m I_s} = \frac{\sqrt{2} \cdot 3 \sqrt{3} V_m (1 + \cos \psi) \sqrt{3}}{3 \cdot 2 \pi V_m \sqrt{2}} = \frac{3 (1 + \cos \psi)}{2 \pi} \quad (60)$$

2.2.2.3.3. Etude du courant et de la puissance secondaire quand $60^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$

Lorsque ψ est supérieur à 60° ,

le redresseur et la diode reliés à la même borne j (cf figure 26), sont, par intervalles, simultanément conducteurs, la charge est alors court-circuitée par R_j et R'_j et réunie à la seule borne j. Le courant constant I_c débité ne peut s'annuler, de plus il ne peut être acheminé par la phase j qui en assurerait alors à la fois le départ et le retour. Le courant I_c se ferme donc sur la charge par l'intermédiaire de la diode R'_j et du redresseur R_j placés en série et tous deux conducteurs.

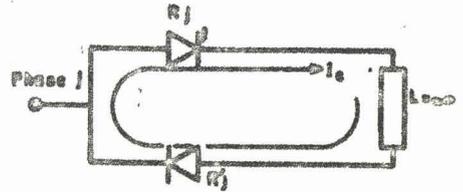


Figure 26.

Lorsque $60^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$, le courant secondaire est égal à $+ I_c$ pendant $\frac{\pi - \psi}{\omega}$ et à $- I_c$ pendant $\frac{\pi - \psi}{\omega}$.

On en déduit :

. La valeur moyenne du courant secondaire

$$i_{s\text{moy}} = 0$$

. La valeur efficace du courant secondaire

$$I_s = I_c \sqrt{\frac{2 (\pi - \psi)}{2 \pi}} = I_c \sqrt{1 - \frac{\psi}{\pi}}$$

d'où le rapport $\frac{I_s}{I_c} = \sqrt{1 - \frac{\psi}{\pi}} \quad (59)'$

. La valeur du facteur de puissance secondaire :

$$f_s = \frac{\sqrt{2} U_{Co} I_c}{3 V_m I_s} = \frac{3 \sqrt{2} \sqrt{3} V_m I_c (1 + \cos \psi)}{3 \cdot 2 \pi V_m I_c \sqrt{1 - \frac{\psi}{\pi}}} = \frac{\sqrt{3} (1 + \cos \psi)}{\sqrt{2 \pi (\pi - \psi)}} \quad (60)'$$

On peut donc dresser un tableau récapitu-

latif:

ψ	0°	60°	180°
$\frac{I_s}{I_c}$		$\sqrt{\frac{2}{3}}$	$\sqrt{1 - \frac{\psi}{\pi}}$
f_s		$\frac{3 (1 + \cos \psi)}{2 \pi}$	$\frac{\sqrt{3} (1 + \cos \psi)}{\sqrt{2 \pi (\pi - \psi)}}$

(59)

(60)

Les variations de ces rapports ont été représenté à la planche I. Les deux courbes montrent l'intérêt du pont mixte :

- diminution de I_s , à I_c constant, quand la tension redressée diminue.

- dégradation de f_s moins grande que si le facteur de puissance était proportionnel à $\frac{U_{co}}{(U_{co})_{\psi=0}}$.

2.3. ETUDE DU MONTAGE P.D.3 DEBITANT SUR UN RECEPTEUR PUREMENT RESISTANT

Dans ce cas les paramètres caractéristiques du circuit prennent les valeurs $Q = 0$, $m = 0$

2.3.1. Etude du fonctionnement du montage. Tensions

Le récepteur étant une résistance pure, le courant redressé, débité par le montage, à même forme d'onde que la tension redressée ; cela conduirait à envisager deux modes de fonctionnement suivant les valeurs de l'angle ψ :

. $0 \leq \psi < 60^\circ$: la tension u_C que tend à délivrer le montage ne s'annule jamais, il en est de même du courant i_C , la conduction est continue et le montage délivre effectivement la tension qu'il tend à fournir au récepteur.

. $60^\circ \leq \psi < 180^\circ$: la tension u_C que tend à délivrer le montage est, par intervalles, positive. Durant le reste de la période elle est nulle, le courant redressé i_C s'annule alors et reste nul car le récepteur ne peut engendrer de régime libre. Le courant et la tension gardent donc à chaque instant la même forme d'onde et le montage délivre effectivement la tension qu'il tend à fournir, on dira que la conduction est continue avec des intervalles à i_C nul.

On voit donc, que dans le cas du débit sur une résistance pure, le montage fonctionne en conduction continue quelle que soit la valeur de l'angle ψ ; la tension qu'il délivre est continuellement celle qu'il tend à fournir et dont l'étude a déjà été faite au paragraphe 2.2.1.1. ($U'_{CO} = U_{CO}$).

Les autres tensions du montage (tensions inverses etc) se déduisant directement de la tension redressée on pourra utiliser les expressions et les relations établies sur charge infiniment inductive.

2.3.2. Etude des courants

2.3.2.1. Etude du courant redressé

Puisque i_C égale $\frac{u_C}{R}$, la forme d'onde de R_{iC} est celle tracée pour u_C à la figure 25.

2.3.2.1.1. Valeur moyenne du courant redressé

La valeur moyenne du courant redressé se calcule selon la méthode exposée au paragraphe 1.2.1.2. par la formule (28) dont l'application est facilitée par le fait que la valeur moyenne U'_{CO} de la tension redressée a une expression unique quel que soit l'angle ψ .

$$I_C = \frac{U_{CO}}{R} \quad \text{donne} \quad \boxed{I_C = \frac{3 \sqrt{3} V_m}{2 \pi R} (1 + \cos \psi)} \quad (61)$$

On voit que le rapport $\frac{I_C}{(I_C)_{\psi=0}}$ est égal à $\frac{U_{CO}}{(U_{CO})_{\psi=0}}$ dont les variations sont représentées à la planche I. De même le taux d'ondulation K du courant redressé est égal à celui de la tension K_0 .

2.3.2.1.2. Valeur efficace du courant redressé

Selon les valeurs de ψ , les deux expressions donnant i_C au cours de sa période $\frac{T}{3}$ étant différentes, on doit encore distinguer deux cas.

. $0^\circ \leq \psi < 60^\circ$

Le courant i_C a la forme d'onde représentée à la figure 25 a.

Puisque :

$$i_C = \frac{\sqrt{3} V_m}{R} \sin \left(\theta + \frac{\pi}{6} \right) \quad \text{pour} \quad \frac{\pi}{6} + \psi \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

$$i_C = \frac{\sqrt{3} V_m}{R} \sin \left(\theta - \frac{\pi}{6} \right) \quad \text{pour} \quad \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{6} + \psi$$

Le courant i_C a pour valeur efficace

$$I'_{\text{ceff}} = \sqrt{\frac{3}{2} \int_{\frac{\pi}{6} + \psi}^{\frac{5\pi}{6} + \psi} i_C^2 d\theta}$$

ce qui donne :

$$I'_{\text{ceff}} = \frac{V_m}{R} \sqrt{\frac{3}{2} + \frac{9 \sqrt{3} (1 + \cos 2\psi)}{8 \pi}} \quad (62)$$

• $60^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$

Le courant i_c a la forme d'onde représentée à la figure 25 b.

Puisque :

$$i_c = \frac{\sqrt{3} V_m}{R} \sin \left(\theta - \frac{\pi}{6} \right) \text{ pour } \frac{\pi}{6} + \psi \leq \theta \leq \frac{7\pi}{6}$$

$$i_c = 0 \text{ pour } \frac{7\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{6} + \psi$$

La valeur efficace du courant redressé i_c est :

$$I'_{ceff} = \frac{3 V_m}{2R} \sqrt{1 - \frac{\psi}{\pi} + \frac{\sin 2\psi}{2\pi}} \quad (62)'$$

2.3.2.1.3. Facteur de forme du courant redressé

Le rapprochement des formules (61) et (62) permet de calculer le facteur de forme $f_F = \frac{I'_{ceff}}{I_c}$ du courant redressé. Ses variations en fonction de l'angle ψ (cf planche II) montrent que ce facteur croît rapidement quand ψ augmente, ce qui a conduit à adopter une échelle différente à partir de $\psi = 120^\circ$.

Le tableau suivant donne les expressions de I'_{ceff} et de f_F pour les différentes valeurs de ψ .

ψ	0°	60°	180°
I'_{ceff}	$\frac{V_m}{R} \sqrt{\frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}(1 + \cos 2\psi)}{8\pi}}$	$\frac{3 V_m}{2R} \sqrt{1 - \frac{\psi}{\pi} + \frac{\sin 2\psi}{2\pi}}$	(62)
f_F	$\frac{\sqrt{4\pi^2 + 3\pi\sqrt{3}(1 + \cos 2\psi)}}{3\sqrt{2}(1 + \cos \psi)}$	$\frac{\sqrt{2\pi^2 - 2\pi\psi + \pi\sin 2\psi}}{\sqrt{6}(1 + \cos \psi)}$	(63)

2.3.2.2. Etude du courant lors des commutations

Comme on l'a démontré au paragraphe I c'est le courant à commuter qui intervient dans le calcul de la chute de tension due à l'effet des réactances. Selon la valeur de l'angle ψ et selon qu'il s'agit d'un redresseur ou d'une diode (on se référera à la figure 25 puisque le courant a la forme d'onde de la tension) on peut dresser le tableau donnant la valeur du courant à commuter.

ψ	0°	60°	180°
$i_c(t_0)$	$\sqrt{3} \frac{V_m}{R} \sin\left(\frac{2\pi}{3} + \psi\right)$	0	0
$i_c(t'_0)$	$\frac{3 V_m}{2 R}$	0	0

(64)

(65)

On a représenté à la planche II les variations de $\frac{R_{ic}(t_0)}{V_m}$ et $\frac{R_{ic}(t'_0)}{V_m}$ en fonction de l'angle ψ .

2.3.2.3. Etude du courant et de la puissance au secondaire

2.3.2.3.1. Remarques préliminaires

Dans le cas $0^\circ \leq \psi < 60^\circ$ le redresseur et la diode reliés à une même phase ne sont jamais simultanément en conduction, on peut donc appliquer au courant secondaire les remarques du paragraphe 2.2.2.3.

Dans le cas où $60^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$, lorsque le redresseur et la diode d'une même phase sont passant en même temps, ils **font** transiter un courant nul (cf paragraphe 2.3.1.) puisque le montage délivre alors une tension nulle sur une résistance pure. En ce qui concerne le courant secondaire, tout se passe comme si R_i et R'_i ne débitaient jamais ensemble ; donc, exceptionnellement dans le cas du débit sur une résistance pure, on peut étendre pour $60^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$ les remarques du paragraphe 2.2.2.3.1.

Cette remarque souligne la différence entre la conduction continue avec intervalles à courant nul et la conduction discontinue. Elle facilite aussi l'étude des autres ponts mixtes.

2.3.2.3.2. Courant au secondaire

Compte tenu des remarques précédentes, l'application des formules (55) à (58) et (62) permet de dresser directement, en fonction de l'angle ψ , le tableau des caractéristiques du courant secondaire.

ψ	0°	60°	180°
i'_{smax}	$\sqrt{3} V_m$	$\sqrt{3} V_m \sin \psi$	(66)
i'_{smoy}	0	0	
$I'_s = I'_{ceff} \sqrt{\frac{2}{3}}$	$\frac{V_m}{R} \sqrt{1 + \frac{3\sqrt{3}(1 + \cos 2\psi)}{4\pi}}$	$\frac{V_m}{R} \sqrt{\frac{3}{2} - \frac{3\psi}{2\pi} + \frac{3 \sin 2\psi}{4\pi}}$	(67)
$\frac{I'_s}{I_c} = f_F \sqrt{\frac{2}{3}}$	$\frac{\sqrt{4\pi^2 + 3\pi\sqrt{3}(1 + \cos 2\psi)}}{3\sqrt{3}(1 + \cos \psi)}$	$\frac{\sqrt{2\pi^2 - 2\pi\psi + \pi \sin 2\psi}}{3(1 + \cos \psi)}$	(68)

Sachant que $\sqrt{\frac{2}{3}} = 0,8165$ les variations en fonction de ψ de $\frac{I'_s}{I_c}$ se déduisent directement de la courbe $f_F = f(\psi)$ de la planche II.

2.3.2.3.3. Facteur de puissance secondaire

Le courant i_c n'étant plus constant, la puissance active débitée par le montage n'est plus $U_{CO} I_c$, elle comprend en plus les puissances qui correspondent aux harmoniques de u_c et de i_c

Ici puisque $i_c = \frac{u_c}{R}$, $P_c = (u_c i_c)_{moy} = R I_{ceff}^2$

De $f'_s = \frac{\sqrt{2} R I_{ceff}^2}{3 V_m I'_s}$ et de $\frac{I_{ceff}}{I'_s} = \sqrt{\frac{3}{2}}$

on déduit le tableau donnant la valeur du facteur de puissance secondaire f'_s de l'angle ψ .

ψ	0°	60°	180°
f'_s	$\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}(1 + \cos 2\psi)}{8\pi}}$	$\frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{1 - \frac{\psi}{\pi} + \frac{\sin 2\psi}{2\pi}}$	(69)

Les variations de f'_s en fonction de ψ sont représentées à la planche II.

2.4. ETUDE DU MONTAGE P.D.3. DEBITANT SUR UN RECEPTEUR RESISTANT ET INDUCTIF

Dans ce cas les paramètres caractéristiques du circuit sont tels que $Q \neq 0$, $m = 0$.

2.4.1. Etude du fonctionnement du montage. Tensions

A priori selon les valeurs de l'angle ψ et du paramètre Q du récepteur on doit envisager que le montage redresseur puisse fonctionner en conduction continue ou en conduction discontinue.

. $0^\circ \leq \psi < 60^\circ$

Dans ce cas la tension redressée u_c est toujours positive, l'addition de la self a seulement pour effet de réduire les fluctuations du courant redressé fourni à la résistance.

Quelle que soit la valeur du paramètre Q la conduction est continue. On se souvient d'ailleurs pour les deux cas limites $Q = \infty$ et $Q = 0$ précédemment étudiée (§ II 2 et II 3) la conduction étant également continue.

. $60^\circ < \psi < 180^\circ$

Dans ce cas pendant $\frac{\psi}{\omega} - \frac{\pi}{3\omega}$ le redresseur et la diode d'une même phase sont simultanément conducteurs mettant le récepteur en court-circuit. Le courant dans le récepteur évolue alors suivant le régime libre du circuit R, L , avec condition initiale.

Le courant et la tension sont, à chaque instant, liés par la relation.

$$i_c(\theta) + Q \left(\frac{di_c}{d\theta} \right) = \frac{u_c(\theta)}{R} \quad (70)$$

Le régime permanent étant supposé établi on étudiera successivement les hypothèses de la conduction continue et de la conduction discontinue.

Cas de la conduction continue

. Le régime permanent étant établi, le courant i_c prend la même valeur i_{c0} aux instants 0 et $\frac{2}{3} \frac{\pi}{\omega}$.

Il prend une valeur $i_{c1} > i_{c0}$ à l'instant $\frac{\pi - \psi}{\omega}$ puis décroît exponentiellement jusqu'à la valeur i_{c0} .

i_{c1} étant supérieur à i_{c0} , i_{c0} ne peut être nul puisqu'une exponentielle décroissante ayant une condition initiale positive ne peut s'annuler qu'à l'infini et que $\frac{\psi}{\omega} - \frac{\pi}{3\omega}$ est fini.

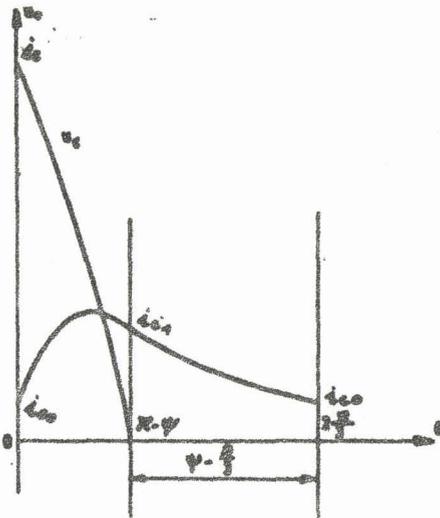


Figure 27. - Formes d'onde de la tension redressée et du courant ($60^\circ < \psi < 180^\circ$).

. Cas de la conduction discontinue

Le régime permanent étant établi, le courant i_c a une valeur initiale i_{c0} nulle, à l'instant où on débloque un redresseur, la tension à ses bornes est positive et la tension u_c est alors appliquée au récepteur, le courant i_c croît puisque u_c est positif.

Cherchons s'il existe un instant $\frac{\theta_2}{\omega}$ où i_c redevienne nul, pour cela il faut que :

$$Q \left(\frac{di_c}{d\theta} \right)_{\theta_2} = \frac{u_c(\theta_2)}{R}$$

Puisque i_c était précédemment positif, il faut que $\left(\frac{di_c}{d\theta} \right)_{\theta_2}$ soit négatif. L'instant $\frac{\theta_2}{\omega}$ se situe donc après $t = \frac{\pi - \psi}{\omega}$. Lorsque $t = \frac{\pi - \psi}{\omega}$, le courant i_c étant encore positif, la diode qui doit entrer en conduction se substitue à la précédente et court-circuite le récepteur. Le courant i_c évolue à partir de sa valeur à cet instant suivant le régime libre et ne peut donc s'annuler à l'instant $\frac{2\pi}{3\omega}$.

Il n'est pas possible, même en supposant un courant i_{c0} nul, de pouvoir retrouver une valeur nulle de i_c au bout d'un intervalle de durée $\frac{T}{3}$. La conduction discontinue est impossible en régime établi.

Quelles que soient les valeurs de ψ ($0^\circ < \psi < 180^\circ$) et du paramètre Q du récepteur, le montage P.D.3 mixte, débitant sur un récepteur résistif et inductif, fonctionne toujours en conduction continue. Le cas limite $Q = 0$ correspond à un fonctionnement en conduction continue avec des intervalles à courant nul.

Le montage fonctionnant toujours en conduction continue, le montage débite en permanence et on peut reprendre l'ensemble de l'étude des tensions faite au paragraphe 2.2.1. On trouvera sur la planche I les variations de $\frac{U'_{CO}}{(U'_{CO})_{\psi=0}}$, $v_{i_{max}}$ et K_0 en fonction de l'angle ψ .

2.4.2. Etude des courants

2.4.2.1. Etude du courant redressé

2.4.2.1.1. Valeur moyenne du courant redressé

La valeur moyenne du courant redressé se calcule selon la méthode exposée au paragraphe 1.2.4.2. par la formule (28) dont l'application est facilitée par le fait que l'étude des tensions a déjà été faite au paragraphe 1.2.1.

$$I_c = \frac{U'_{CO}}{R} \text{ soit } \boxed{I'_c = \frac{3\sqrt{3} V_m (1 + \cos \psi)}{2\pi R}} \quad (71)$$

On voit qu'ici encore on peut lire la valeur de $\frac{I'_c}{(I'_c)_{\psi=0}}$ sur la courbe $\frac{U'_{CO}}{(U_{CO})_{\psi=0}} = f(\psi)$ de la planche I.

2.4.2.1.2. Etude de la valeur instantanée du courant redressé.

Les formes d'onde de la tension redressée u_c étant totalement différentes, selon que ψ est inférieur ou supérieur à 60° , on fera une étude particulière de chacun de ces deux cas.

2.4.2.1.2.1. Cas où $0^\circ \leq \psi < 60^\circ$

La tension u_c appliquée au récepteur R, L, a une forme d'onde dont l'allure a été représentée à la figure (25 a).

$$\text{Posons } \phi = \text{Arc tg. } Q \quad (72)$$

et étudions le courant pour les deux expressions de la tension u_c

$$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3} - \psi$$

La tension appliquée au circuit R, L est alors :

$$u_c = \sqrt{3} V_m \sin \left(\frac{\pi}{3} + \psi + \theta \right) \quad (73)$$

Dans cet intervalle le courant est solution de l'équation différentielle :

$$i_c + Q \frac{di_c}{d\theta} = \frac{\sqrt{3} V_m}{R} \sin \left(\frac{\pi}{3} + \psi + \theta \right) \quad (74)$$

La solution générale est de la forme

$$i_c = A e^{-\frac{\theta}{Q}} + \frac{\sqrt{3} V_m}{R \sqrt{1 + Q^2}} \sin \left(\frac{\pi}{3} + \psi - \phi + \theta \right)$$

A l'instant $t_0 = 0$ le courant redressé vaut $i_c(t_0)$, si on pose $\frac{\sqrt{3} V_m}{R \sqrt{1 + Q^2}} = i_m$ on a alors

$$i_c(t_0) = A + i_m \sin \left(\frac{\pi}{3} + \psi - \phi \right) \text{ d'où } A = i_c(t_0) - i_m \sin \left(\frac{\pi}{3} + \psi - \phi \right)$$

Dans l'intervalle le courant a donc pour expression

$$i_c(\theta) = \left[i_c(t_0) - i_m \sin \left(\frac{\pi}{3} + \psi - \phi \right) \right] e^{-\frac{\theta}{Q}} + i_m \sin \left(\frac{\pi}{3} + \psi - \phi + \theta \right) \quad (75)$$

A l'instant t'_0 tel que $\theta = \frac{\pi}{3} - \psi$ le courant redressé vaut

$$i_c(t'_0) = \left[i_c(t_0) - i_m \sin \left(\frac{\pi}{3} + \psi - \phi \right) \right] e^{-\frac{\pi}{3Q}} e^{\frac{\psi}{Q}} + i_m \sin \left(\frac{2\pi}{3} - \phi \right) \quad (75)$$

$$\cdot \frac{\pi}{3} - \psi \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3}$$

Pour ne pas alourdir les expressions du courant on fera le changement d'origine $\theta' = \theta + \psi - \frac{\pi}{3}$

Dans ce cas l'expression analytique de la tension u_c appliquée au circuit R, L est

$$u_c = \sqrt{3} V_m \sin \left(\frac{\pi}{3} + \theta' \right) \quad (77)$$

Le courant est alors solution de l'équation différentielle

$$i_c + Q \frac{di_c}{d\theta'} = \frac{\sqrt{3} V_m}{R} \sin \left(\frac{\pi}{3} + \theta' \right) \quad (78)$$

L'expression du courant est alors de la forme :

$$i_c = B e^{-\frac{\theta'}{Q}} + i_m \sin \left(\frac{\pi}{3} - \phi + \theta' \right)$$

Quand θ' est nul, le courant i_c est égal à $i_c(t'_0)$.

$$i_c(t'_0) = B + i_m \sin \left(\frac{\pi}{3} - \phi \right)$$

$$\text{Donc } B = i_c(t'_0) - i_m \sin\left(\frac{\pi}{3} - \phi\right)$$

L'expression du courant peut alors s'écrire :

$$i_c(\theta') = \left[i_c(t'_0) - i_m \sin\left(\frac{\pi}{3} - \phi\right) \right] e^{-\frac{\theta'}{Q}} + i_m \sin\left(\frac{\pi}{3} - \phi + \theta'\right) \quad (79)$$

A l'instant $\frac{\theta'}{\omega} = \frac{\pi}{3\omega} + \frac{\psi}{\omega}$, le régime permanent étant supposé établi, le courant est égal à $i_c(t_0)$

On en déduit $i_c(t_0)$

$$i_c(t_0) = \left[i_c(t'_0) - i_m \sin\left(\frac{\pi}{3} - \phi\right) \right] e^{-\frac{\pi}{3Q}} e^{-\frac{\psi}{Q}} + i_m \sin\left(\frac{2\pi}{3} + \psi - \phi\right)$$

ou, en remplaçant $i_c(t'_0)$ par sa valeur en fonction de $i_c(t_0)$ donnée par la relation (76)

$$i_c(t_0) = \left\{ \left[i_c(t_0) - i_m \sin\left(\frac{\pi}{3} + \psi - \phi\right) \right] e^{-\frac{\pi}{3Q}} e^{-\frac{\psi}{Q}} + i_m \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \phi\right) \dots \dots \right. \\ \left. - i_m \sin\left(\frac{\pi}{3} - \phi\right) \right\} e^{-\frac{\pi}{3Q}} e^{-\frac{\psi}{Q}} + i_m \sin\left(\frac{2\pi}{3} + \psi - \phi\right)$$

Soit en développant

$$i_c(t_0) \left(1 - e^{-\frac{2\pi}{3Q}} \right) = i_m \left\{ \left[\sin\phi - \left(\sin\left(\frac{\pi}{3} + \psi - \phi\right) e^{-\frac{\pi}{3Q}} e^{-\frac{\psi}{Q}} \right] \times \dots \dots \right. \right. \\ \left. \left. - \sin\left(\frac{2\pi}{3} + \psi - \phi\right) \right\}$$

D'où l'expression de $i_c(t_0)$

$$i_c(t_0) = \frac{i_m}{1 - e^{-\frac{2\pi}{3Q}}} \left\{ \sin\phi e^{-\frac{\pi}{3Q}} e^{-\frac{\psi}{Q}} - \sin\left(\frac{\pi}{3} + \psi - \phi\right) e^{-\frac{2\pi}{3Q}} + \right. \\ \left. + \sin\left(\frac{2\pi}{3} + \psi - \phi\right) \right\} \quad (80)$$

Cette expression permet de calculer $i_c(t'_0)$ et donc d'obtenir, à partir des relations (75) et (79), les expressions successives du courant redressé i_c qu'on ne reproduira pas à cause de leur complexité.

2.4.2.1.2.2. Cas où $60^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$

La tension u_c appliquée au récepteur R, L a une forme d'onde ayant l'allure représentée à la figure (25 b).

Dans ce cas, comme dans le précédent, on doit étudier le courant pour les deux expressions successives de la tension u_c .

$$\bullet \underline{0 \leq \theta \leq \pi - \psi}$$

La tension u_c appliquée au circuit R, L

est alors

$$u_c = \sqrt{3} V_m \sin (\psi + \theta) \quad (81)$$

Dans cet intervalle le courant est solution de l'équation

$$i_c (\theta) + Q \frac{di_c}{d\theta} = \frac{\sqrt{3} V_m}{R} \sin (\psi + \theta) \quad (82)$$

La solution générale est de la forme

$$i_c (\theta) = A e^{-\frac{\theta}{Q}} + \frac{\sqrt{3} V_m}{R \sqrt{1 + Q^2}} \sin (\psi - \phi + \theta)$$

A l'instant $t_0 = 0$ le courant vaut $i_c (t_0)$

en posant $i_m = \frac{\sqrt{3} V_m}{R \sqrt{1 + Q^2}}$ il vient alors :

$$i_c (t_0) = A + i_m \sin (\psi - \phi) \text{ d'où } A = i_c (t_0) - i_m (\psi - \phi)$$

Dans l'intervalle le courant a donc pour expression

$$i_c (\theta) = \left[i_c (t_0) - i_m \sin (\psi - \phi) \right] e^{-\frac{\theta}{Q}} + i_m \sin (\psi - \phi + \theta) \quad (83)$$

A l'instant t'_0 tel que $\theta = \pi - \psi$ le courant

redressé vaut :

$$i_c (t'_0) = \left[i_c (t_0) - i_m \sin (\psi - \phi) \right] e^{-\frac{\pi}{Q}} e^{\frac{\psi}{Q}} + i_m \sin \phi \quad (84)$$

$$\bullet \underline{\pi - \psi \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3}}$$

Prenons encore $\theta' = \theta + \psi - \pi$

La tension redressée u_c appliquée au récepteur est alors nulle, le courant redressé est solution de l'équation :

$$i_c (\theta') + Q \frac{di_c}{d\theta'} = 0 \quad (85)$$

Le courant évolue donc suivant le régime libre du circuit R, L

$$i_c (\theta') = B e^{-\frac{\theta'}{Q}}$$

A l'instant t'_0 tel que $\theta' = 0$ le courant vaut $i_c (t'_0)$ d'où l'expression du courant

$$i_c (\theta') = i_c (t'_0) e^{-\frac{\theta'}{Q}} \quad (86)$$

Le régime permanent étant supposé établi à l'instant tel que $\theta' = \psi - \frac{\pi}{3}$ le courant vaut $i_c(t_0)$, on peut donc écrire la formule donnant $i_c(t_0)$.

$$i_c(t_0) = i_c(t'_0) e^{-\frac{\pi}{3Q}} e^{-\frac{\psi}{Q}} \quad (87)$$

Soit en remplaçant $i_c(t'_0)$ par sa valeur en fonction de $i_c(t_0)$ donnée par la formule (84)

$$i_c(t_0) = \left[\left[i_c(t_0) - i_m \sin(\psi - \phi) \right] e^{-\frac{\pi}{Q}} e^{-\frac{\psi}{Q}} + i_m \sin \phi \right] e^{-\frac{\pi}{3Q}} e^{-\frac{\psi}{Q}}$$

Soit en développant

$$i_c(t_0) \left(1 - e^{-\frac{2\pi}{3Q}} \right) = i_m \left\{ \sin \phi e^{-\frac{\pi}{3Q}} e^{-\frac{\psi}{Q}} - \sin(\psi - \phi) e^{-\frac{2\pi}{3Q}} \right\}$$

D'où l'expression de $i_c(t_0)$

$$i_c(t_0) = \frac{i_m}{1 - e^{-\frac{2\pi}{3Q}}} \left\{ \sin \phi e^{-\frac{\pi}{3Q}} e^{-\frac{\psi}{Q}} - \sin(\psi - \phi) e^{-\frac{2\pi}{3Q}} \right\} \quad (88)$$

Cette expression permet de calculer $i_c(t'_0)$ et donc d'obtenir à partir des formules (83) et (86) les deux expressions du courant i_c au cours de l'une de ses périodes.

2.4.2.1.3. Etude de l'ondulation du courant redressé

Connaissant l'expression du courant i_c tout au long de sa période, on peut calculer les valeurs maximales et minimales de i_c et les instants correspondants.

On peut remarquer que, puisque le récepteur est inductif :

$\frac{di_c}{dt} = \frac{u_c}{L} - \frac{Ri_c}{L}$, la dérivée du courant ne peut subir de discontinuité que lorsque la tension u_c en subit une elle-même, donc à l'instant d'amorçage des redresseurs. Au contraire le changement de diode conductrice ne se traduit pas par un changement de pente.

Dès que ψ est suffisant, l'à-coup de tension dû à l'amorçage d'un redresseur correspond à l'inversion du signe de la dérivée du courant qui est alors minimum. C'est en particulier le cas, quelle que soit la valeur de Q , quand ψ est supérieur à 60° .

Les courbes de la planche III donnent, pour $Q = 0 - 0,1 - 0,3 - 1 - 3 - 10$, les variations du taux d'ondulation K du

courant redressé en fonction de l'angle ψ . Leur comparaison avec la caractéristique tracée pour $Q = 0$ montre comment diminue K lorsque Q augmente. On voit que pour $Q = 10$, même pour les fortes valeurs de ψ , l'ondulation du courant redressé est négligeable.

2.4.2.1.4. Valeur efficace et facteur de forme du courant redressé

On doit faire le calcul pour les deux expressions du courant rencontrées précédemment.

2.4.2.1.4.1. $0^\circ \leq \psi < 60^\circ$

Ni le courant redressé i_c ni la tension u_c ne s'annulent au cours d'une période du courant, on peut appliquer la méthode définie au paragraphe I par la formule (29), d'où :

$$I_{c\text{eff}}^2 = \frac{3}{2\pi R} \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{3} - \psi} u_c(\theta) i_c(\theta) d\theta + \int_0^{\frac{\pi}{3} + \psi} u_c(\theta') i_c(\theta') d\theta' \right\} \quad (89)$$

I II

$u_c(\theta)$ et $i_c(\theta)$ sont respectivement donnés par les formules (73) et (75)

$u_c(\theta')$ et $i_c(\theta')$ par les formules (77) et (79).

Pour alléger les calculs, posons :

$$i_c(t_0) = i_m F \quad (90)$$

$$i_c(t'_0) = i_m G \quad (91)$$

F et G étant des fonctions de Q et de ψ que l'on déduit directement des relations (76) et (80).

Après avoir reporté dans (89) et effectué tous les calculs et regroupements de termes, on arrive finalement aux résultats suivants

$$I = \frac{\sqrt{3} V_m i_m}{2} \left\{ \left[F - \sin\left(\frac{\pi}{3} + \psi - \phi\right) \right] \frac{Q}{(1+Q^2)} \left\{ (Q - \sqrt{3}) e^{\frac{3\psi - \pi}{3Q}} + \dots \right. \right. \\ + (Q + \sqrt{3}) \cos \psi + (1 - Q\sqrt{3}) \sin \psi \left. \right\} + \left(\frac{\pi}{3} - \psi\right) \cos \phi + \frac{1}{2} \left\{ \sin\left(\frac{\pi}{3} - \phi\right) + \dots \right. \\ \left. \left. + \sin\left(\frac{2\pi}{3} + 2\psi - \phi\right) \right\} \right\}$$

$$\begin{aligned}
 \text{II} = \frac{\sqrt{3} V_m i_m}{2} \left\{ \left[G - \sin \left(\frac{\pi}{3} - \phi \right) \right] \frac{Q}{(1+Q)^2} \left\{ (Q - \sqrt{3}) \cos \psi + \dots \right. \right. \\
 \left. \left. + (1 + Q \sqrt{3}) \sin \psi \right\} e^{-\frac{\pi - 3\psi}{3Q} + Q + \sqrt{3}} + \left(\frac{\pi}{3} + \psi \right) \cos \phi + \frac{1}{2} \left\{ \sin \left(\frac{2\pi}{3} - \phi \right) + \right. \right. \\
 \left. \left. + \sin \left(\frac{\pi}{3} + 2\psi - \phi \right) \right\} \right\} \quad (92)
 \end{aligned}$$

D'où

$$I'_{ceff} = \sqrt{\frac{3}{2 \pi R} (I + II)} \quad (93)$$

Compte tenu de la valeur de i_m ,

I'_{ceff} peut être mis sous la forme

$$I'_{ceff} = \frac{V_m}{R} H \quad \text{où } H = f(Q, \psi) \quad (94)$$

Le facteur de forme du courant

redressé peut donc s'écrire :

$$f_F = \frac{I'_{ceff}}{I_C} = \frac{V_m H 2 \pi R}{R 3 \sqrt{3} V_m (1 + \cos \psi)}$$

Soit :

$$f_F = \frac{2 \pi H}{3 \sqrt{3} (1 + \cos \psi)} \quad (95)$$

2.4.2.1.4.2. $60^\circ \leq \psi < 180^\circ$

Dans ce cas la tension u_C étant nulle après l'instant $\frac{\pi - \psi}{\omega}$, durant le régime libre du courant, on peut à l'aide du même principe que celui utilisé pour établir la relation générale (29), montrer facilement que le courant efficace est donné par :

$$I'_{ceff} = \frac{3}{2 \pi} \frac{1}{R} \int_0^{\pi - \psi} u_C(\theta) i_C(\theta) d\theta \quad (96)$$

$u_C(\theta)$ et $i_C(\theta)$ sont respectivement donnés par les formules (81) et (83)

En posant $i_C(t_0) = i_m F_1$ (97)

et $i_C(t'_0) = i_m G_1$ (98) où F_1 et G_1 sont des fonctions de Q et de ψ ; tous calculs effectués, on trouve :

$$\begin{aligned}
 I'_{ceff,2} = \frac{3 \sqrt{3} V_m i_m}{2 \pi R} \left\{ \left[F_1 - \sin(\psi - \phi) \right] \frac{Q}{1+Q^2} \left\{ Q e^{-\frac{\pi + \psi}{Q}} + Q \cos \psi + \sin \psi \right\} + \dots \right. \\
 \left. + \frac{(\pi - \psi)}{2} \cos \phi + \frac{1}{4} \left\{ \sin \phi + \sin(2\psi - \phi) \right\} \right\} = \frac{3}{2 \pi R} \text{ III} \quad (99)
 \end{aligned}$$

Compte tenu de l'expression de i_m ,

I'_{ceff} peut être mis sous la forme :

$$I'_{ceff} = \frac{V_m}{R} H_1 \quad (100)$$

$$\text{où } H_1 = f(Q, \psi)$$

Le facteur de forme du courant redressé peut être mis sous une forme semblable à la formule (100)

$$f_F = \frac{2 \pi H_1}{3 \sqrt{3} (1 + \cos \psi)} \quad (101)$$

On a représenté sur la planche IV les variations de f_F en fonction de l'angle ψ pour les valeurs $Q = 0,1$; $Q = 0,3$; $Q = 1$; $Q = 3$; $Q = 10$ et rappelé (courbe en traits interrompus) les valeurs correspondant à $Q = 0$.

Comme prévu le facteur de forme est d'autant plus voisin de l'unité que Q est grand et ψ plus éloigné de 180° . Pour Q égal à 3 on pourra confondre I_C et I'_{ceff} à 1 pour cent près tant que ψ est inférieur à 140° .

2.4.2.2. Etude du courant lors des commutations

L'étude de la valeur instantanée du courant redressé donne la valeur du courant lors des commutations des redresseurs ($i_C(t_0)$) et des diodes ($i_C(t'_0)$) à partir des formules (76) et (80) d'une part, (87) et (88) d'autre part.

On a tracé sur les planches V et VI les variations de $\frac{Ric(t_0)}{V_m}$ et $\frac{Ric(t'_0)}{V_m}$ en fonction de l'angle ψ pour les valeurs $Q = 0,1$; $Q = 0,3$; $Q = 1$; $Q = 3$; $Q = 10$ ainsi que pour Q nul et Q infini.

On voit que lorsque Q augmente, l'ondulation du courant diminuant, la valeur du courant lors des commutations des redresseurs et des diodes tend vers la valeur du courant redressé ($Q = \infty$).

On voit aussi qu'à ψ donné et à V_m et R donnés, une même valeur du courant redressé moyen I_C correspond à une chute inductive d'autant plus forte que Q est plus élevé.

2.4.2.3. Etude du courant et de la puissance au secondaire

2.4.2.3.1. Etude du courant au secondaire

• $0^\circ < \psi < 60^\circ$

La valeur efficace du courant secondaire se déduit aisément de celle du courant redressé par $I'_s = I'_{ceff} \sqrt{\frac{2}{3}}$ ce qui donne :

$$I'_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V_m}{R} H \quad (102)$$

Les variations, en fonction de ψ , du rapport $\frac{I'_s}{I_c}$ se déduisent du réseau de courbe $f_F = f(\psi)$ représenté à la planche IV.

• $60^\circ < \psi < 180^\circ$

Le courant secondaire étant égal au courant redressé quand $0 < \theta < \pi - \psi$, et chaque phase étant parcourue par ce courant et son opposé au cours d'une période T on peut écrire pour $0 < \theta < \pi - \psi$:

$$\begin{aligned} R i_c + L \frac{d i_c}{d t} &= u_c \\ \text{soit } i_c^2 + Q i_c \frac{d i_c}{d \theta} &= \frac{u_c i_c}{R} \end{aligned}$$

Avec $i_s = i_c$, en prenant la valeur moyenne de i_s^2 pour une de ses périodes $\frac{T}{2}$ il vient :

$$\pi I'_s{}^2 + \frac{Q}{2} \int_0^{\pi-\psi} \frac{d(i_c)^2}{d\theta} d\theta = \frac{1}{R} \int_0^{\pi-\psi} u_c(\theta) i_c(\theta) d\theta \quad (103)$$

On reconnaît au second membre au coefficient $\frac{3}{2\pi}$ près l'expression de $I'_{ceff}{}^2$ déjà calculée (99).

Il vient donc :

$$\begin{aligned} I'_s{}^2 &= \frac{\sqrt{3} V_m i_m}{\pi R} \left\{ \left[F_1 - \sin(\psi - \phi) \right] \frac{Q}{1 + Q^2} \left\{ Q e^{\frac{-\pi + \psi}{2}} + Q \cos \psi + \sin \psi \right\} + \dots \right. \\ &+ \left. \frac{\pi - \psi}{2} \cos \phi + \frac{1}{4} \left\{ \sin \phi + \sin(2\psi - \phi) \right\} \right\} - \frac{Q i_m^2}{2\pi} (G_1^2 - F_1^2) \end{aligned} \quad (104)$$

Compte tenu de la définition de i_m on peut écrire

$$\begin{aligned} I'_s &= \frac{V_m}{R} H_2 \quad (105) \\ \text{où } H_2 &= f(Q, \psi) \end{aligned}$$

On a représenté à la planche VII, les variations en fonction de ψ , du rapport $\frac{I'_s}{I_c}$ pour $Q = 0$; $Q = 0,1$; $Q = 0,3$; $Q = 1$; $Q = 3$; $Q = 10$ et Q infini.

On voit que l'augmentation de Q a un effet fort sensible lors du deuxième mode de fonctionnement ($\psi > 60^\circ$). Durant l'intervalle

où le courant i_c ne traverse pas les enroulements secondaires, la réactance rend sa valeur de moins en moins négligeable.

2.4.2.3.2. Facteur de puissance secondaire

La puissance fournie au récepteur est $R I'_{ceff}^2$
le facteur de puissance secondaire peut donc s'écrire :

$$f'_s = \frac{2 R I'_{ceff}^2}{3 V_m I'_s} = \frac{\sqrt{2} R V_{mH} \sqrt{3}}{3 V_m R \sqrt{2}} = \frac{H}{\sqrt{3}} \quad (106)$$

$$f'_s = \frac{\sqrt{2} R I'_{ceff}^2}{3 V_m I'_s} = \frac{\sqrt{2} R V_m^2 H_1^2}{3 V_m R^2 V_m H_2} = \frac{\sqrt{2} H_1^2}{3 H_2} \quad (107)$$

On a représenté à la planche VIII les variations de ces rapports en fonction de ψ pour les valeurs de Q précédemment choisies.

L'explication des courbes résulte de la coexistence de deux phénomènes :

- Quand Q augmente, l'ondulation du courant diminue, ce qui tend, à puissance donnée, à réduire les courants efficaces et donc à améliorer les facteurs de puissance.

- L'amputation d'une partie du courant redressé quand les intervalles de conduction du redresseur et de la diode, réunis à la même borne, se recouvrent ($\psi > 60^\circ$). Q intervient sur le poids relatif du courant durant ces intervalles.

On voit que les avantages du montage mixte, ordinairement soulignés sur la courbe à Q infini, sont en moyenne vérifiées étant donné le voisinage de toutes les courbes.

Les divers réseaux de caractéristiques, tracées dans cette étude du débit sur récepteur R, L , montre que, pour la majorité des résultats, dès que Q est supérieur à 3, on peut, avec une bonne approximation, adopter les valeurs correspondant à Q infini, cette approximation étant d'autant meilleure que ψ est plus éloigné de 180° .

2.5. ETUDE DU MONTAGE P.D.3 DEBITANT SUR UN RECEPTEUR RESISTANT, INDUCTIF PRESENTANT UNE F.C.E.M.

Dans ce cas les paramètres caractéristiques du circuit sont tels que $Q \neq 0$, $m \neq 0$.

2.5.1. Justification de l'étude de La conduction continue

L'étude du débit sur récepteur R, L, E suppose au préalable la définition du mode de fonctionnement envisagé, celle-ci étant en particulier, liée au problème des impulsions de déblocage.

Envisageons le cas simple où la réactance L est négligeable (circuit R, E) et comparons la forme d'onde de la tension u_c , que tend à fournir le montage redresseur, à l'horizontale d'ordonnée E.

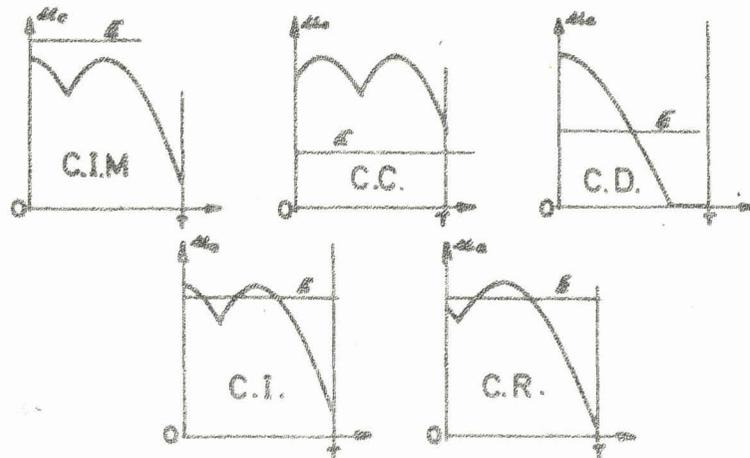


Figure 28.

Il faut envisager (cf figure) cinq modes de fonctionnement :

- C.I M. La conduction impossible : quand E est supérieur à u_{cmax} .
- C.C. La conduction continue : elle est assurée si E est toujours inférieur à u_c .
- C.D. La conduction discontinue : si la condition précédente n'est plus assurée durant l'intervalle précédent la période suivante.
- C.I. La conduction interrompue : si la valeur initiale de u_c devenant inférieure à E il y a extinction ; u_c redevenant ensuite supérieur à E il peut y avoir réamorçage si les impulsions de déclenchement ont une durée suffisante, sinon on dira que la conduction est interrompue discontinue (C.I.D.).

C.R. La conduction retardée : si la valeur initiale de u_c est inférieure à E , lui-même inférieur à la plus grande valeur que peut prendre u_c au cours de l'une de ses périodes, l'impulsion de déblocage est perdue sauf si sa largeur est suffisante pour assurer l'amorçage à un instant en retard sur celui prévu.

Les remarques précédentes permettent de tracer, en fonction de ψ , dans le cas simple d'un débit sur récepteur R E, les zones où m détermine chacun des modes de fonctionnement possibles. Dans chaque zone on a noté le caractère de la conduction, dans le cas où les impulsions de déclenchement sont de largeur suffisante, et entre parenthèses, son caractère dans le cas d'impulsions très brèves.

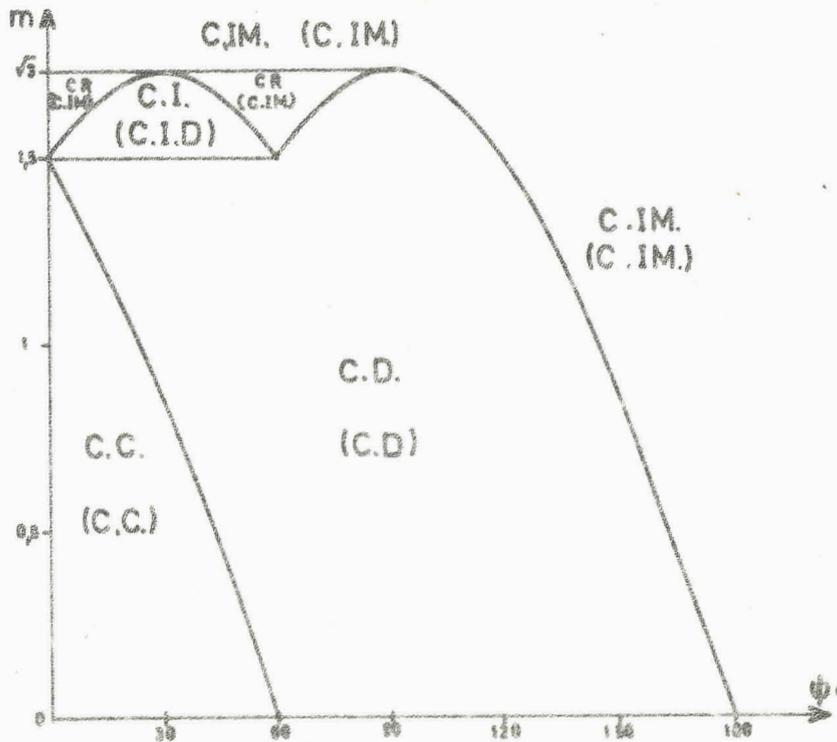


Figure 29. - Modes de fonctionnement du montage P.D. 3 mixte débitant sur un circuit R, E

L'addition d'une réactance dans le récepteur complique le problème en pouvant faire passer de la conduction discontinue à la conduction continue, de la conduction interrompue à la conduction discontinue et même à la conduction continue.

Pratiquement, pour tirer d'un montage le maximum de ses performances, on prévoit toujours la possibilité de travailler à tension redressée maximale, sinon on accroîtrait inutilement le dimensionnement du montage. La marche avec des valeurs de E peu inférieures à la valeur maximale possible de la tension redressée moyenne est la plus performante quant au rendement. Pour ne pas s'interdire la zone de fonctionnement la plus intéressante on aura intérêt à travailler avec des impulsions de 120° ; l'amorçage et le réallumage éventuel seront toujours assurés, le thyristor se comporte alors comme un interrupteur mécanique suivi d'une diode, fermant son contact durant $\frac{1}{3}$ de la période T , l'angle ψ correspond alors au calage de l'intervalle de fermeture par rapport à la tension du réseau.

Même avec de telles impulsions, pour certaines valeurs des paramètres ψ , Q et m , il peut y avoir par période T trois intervalles passants et trois intervalles de blocage.

Nous limiterons notre étude au fonctionnement en conduction continue qui correspond à la presque totalité des applications industrielles et qui permet d'utiliser les résultats de l'étude du circuit R L. En conduction discontinue, pour chaque valeur des paramètres m , Q et ψ , il faudrait reprendre l'ensemble des calculs sans qu'il soit possible d'obtenir de relations générales.

L'étude du courant dans le cas de la conduction continue permettra de déterminer les limites du domaine des valeurs de m et Q où ce mode de fonctionnement est obtenu.

2.5.2. Etude des tensions

Le montage étant supposé en conduction continue, il débite en permanence et délivre la même tension que celle trouvée lors du débit sur les récepteurs R, L, R-L. On peut donc reprendre l'ensemble de l'étude des tensions faite au paragraphe 2.2.1.

Quelles que soient les valeurs des paramètres Q et m assurant la conduction continue, on trouvera sur la planche I les variations de $\frac{U'_{CO}}{(U'_{CO})_{\psi=0}}$, v_{imax} et K_O en fonction de l'angle ψ .

2.5.3. Etude des courants

2.5.3.1. Etude du courant redressé

2.5.3.1.1. Valeur moyenne du courant redressé

La conduction continue étant supposée assurée par le couple de paramètres caractéristiques Q, m, la valeur moyenne du courant redressé se calcule selon la méthode exposée au paragraphe 1.2.1.2. par la formule (28) dont l'application est simplifiée par la connaissance de la tension redressée.

$$I_C = \frac{U'_{CO} - E}{R} \quad \text{soit avec } E = m V_m$$

$$I_C = \frac{V_m}{R} \left[\frac{3 \sqrt{3} (1 + \cos \psi)}{2 \pi} - m \right] \quad (108)$$

Cette relation montre qu'en conduction RI_C ne dépend que de ψ et de m. En particulier, lorsque Q est infini, le courant I_C ne pouvant être que constant ou nul, on obtient la limite de conduction en rendant I_C égal à zéro dans la formule (108)

$$(m_{lim})_{Q=\infty} = \frac{3 \sqrt{3} (1 + \cos \psi)}{2 \pi}$$

A valeur donnée de m, si Q est fini, le minimum de i_C est inférieur à sa valeur moyenne, la conduction cesse d'être continue pour U'_{CO} plus grand, c'est-à-dire pour une valeur plus réduite de l'angle ψ .

2.5.3.1.2. Etude de la valeur instantanée du courant redressé

Les formes d'onde de la tension redressée u_c appliquée au récepteur R, L, E ayant respectivement l'allure de la figure 25a ou 25b selon que ψ est inférieur ou supérieur à 60° on fera deux études distinctes.

2.5.3.1.2.1. Cas où $0^\circ \leq \psi < 60^\circ$

$$0 \leq \theta < \frac{\pi}{3} - \psi$$

Dans ce cas la tension appliquée à la partie R, L du circuit R, L, E est :

$$u = \sqrt{3} V_m \sin \left(\frac{\pi}{3} + \psi + \theta \right) - E \quad (109)$$

Dans cet intervalle le courant dans le récepteur est solution de l'équation :

$$i_c + Q \frac{di_c}{d\theta} = \frac{\sqrt{3} V_m}{R} \sin \left(\frac{\pi}{3} + \psi + \theta \right) - \frac{E}{R} \quad (110)$$

La solution de cette équation se déduit donc de celle de l'équation (74) en ajoutant $-\frac{E}{R}$ à la solution déjà trouvée (formule 75) en absence de f.c.e.m.

$$i_c(\theta) = \left[i_c(t_0) - i_m \sin \left(\frac{\pi}{3} + \psi - \phi \right) \right] e^{-\frac{\theta}{Q}} + i_m \sin \left(\frac{\pi}{3} + \psi - \phi + \theta \right) - \frac{E}{R} \quad (111)$$

Dans cette formule $i_c(t_0)$ désigne la valeur initiale du courant débité par le montage sur le circuit R, L de même paramètre Q que le circuit R, L, E. La nouvelle valeur initiale du courant est donc $i_c(t_0)_1 = i_c(t_0) - \frac{E}{R}$ (112)

A l'instant t'_0 tel que $\theta = \frac{\pi}{3} - \psi$ le courant redressé vaut :

$$i_c(t'_0)_1 = \left[i_c(t_0) - i_m \sin \left(\frac{\pi}{3} + \psi - \phi \right) \right] e^{-\frac{\pi}{3Q} - \frac{\psi}{Q}} + i_m \sin \left(\frac{2\pi}{3} - \phi \right) - \frac{E}{R}$$

$$\text{Soit : } i_c(t'_0)_1 = i_c(t'_0) - \frac{E}{R} \quad (113)$$

$$\frac{\pi}{3} - \psi < \theta < \frac{2\pi}{3}$$

La tension appliquée à la partie R, L du récepteur ; compte tenu du changement d'origine $\theta' = \theta + \psi - \frac{\pi}{3}$, est alors

$$u = \sqrt{3} V_m \sin \left(\frac{\pi}{3} + \theta' \right) - E \quad (114)$$

Le courant redressé est donc

solution de :

$$i_c + Q \frac{di_c}{d\theta'} = \frac{\sqrt{3} V_m}{R} \sin \left(\frac{\pi}{3} + \theta' \right) - \frac{E}{R} \quad (115)$$

La solution est la même que celle donnée à l'équation (78) à condition d'y ajouter $-\frac{E}{R}$

$$i_c (\theta') = \left[i_c (t'_0) - i_m \sin \left(\frac{\pi}{3} - \phi \right) \right] e^{-\frac{\theta'}{Q}} + i_m \sin \left(\frac{\pi}{3} - \phi + \theta' \right) - \frac{E}{R} \quad (116)$$

$$\text{A l'instant } \frac{\theta'}{\omega} = \frac{\pi}{3\omega} + \frac{\psi}{\omega},$$

le régime permanent étant supposé établi le courant est égal à $i_c(t_0)_1$ que l'on déduit aisément des formules (112) et (110), soit :

$$i_c(t_0)_1 = \frac{i_m}{1 - \frac{2\pi}{3Q}} \left\{ \sin \phi e^{-\frac{\pi}{3Q}} e^{-\frac{\psi}{Q}} - \sin \left(\frac{\pi}{3} + \psi - \phi \right) e^{-\frac{2\pi}{3Q}} + \sin \left(\frac{2\pi}{3} + \psi - \phi \right) \right\} - \frac{E}{R} \quad (117)$$

Cette expression permet d'obtenir les expressions du courant redressé i_c à partir des formules (111) et (116)

2.5.3.1.2.2. Cas où $60^\circ < \psi < 180^\circ$

La tension appliquée au circuit R, L, E a la forme d'onde dont l'allure est donnée à la figure 25b.

$$0 < \theta < \pi - \psi$$

La tension u appliquée à la partie R, L du circuit R, L, E est alors :

$$u = \sqrt{3} V_m \sin (\psi + \theta) - E \quad (118)$$

Le courant dans le récepteur est alors solution de l'équation

$$i_c + Q \frac{di_c}{d\theta} = \frac{\sqrt{3} V_m}{R} \sin (\psi + \theta) - \frac{E}{R} \quad (119)$$

On peut donc déduire la solution de celle de l'équation (82) en ajoutant $-\frac{E}{R}$ soit :

$$i_c (\theta) = \left[i_c (t_0) - i_m \sin (\psi - \phi) \right] e^{-\frac{\theta}{Q}} + i_m \sin (\psi - \phi + \theta) - \frac{E}{R} \quad (120)$$

La valeur initiale du courant est alors $i_c (t_0)_1 = i_c (t_0) - \frac{E}{R}$ (121)

A l'instant $\frac{\pi - \psi}{\omega}$ le courant vaut (122)

$$i_c (t'_0)_1 = i_c (t'_0) - \frac{E}{R}$$

$$\pi - \psi < \theta < \frac{2\pi}{3}$$

Avec le changement de variable $\theta' = \theta + \psi - \pi$, la tension alors appliquée au récepteur R, L, E est nulle. Le courant redressé est solution de l'équation

$$i_c + \frac{di_c}{d\theta'} = 0 - \frac{E}{R} \quad (123)$$

Le courant est alors la supposition du régime libre du circuit R, L et du courant constant $-\frac{E}{R}$.

$$\text{D'où : } i_c(\theta') = i_c(t'_0) e^{-\frac{\theta'}{Q}} - \frac{E}{R} \quad (124)$$

Le régime permanent étant établi, on peut aisément déterminer la valeur initiale du courant redressé

$$i_c(t_0)_1 = \frac{i_m}{1 - e^{-\frac{2\pi}{3Q}}} \left\{ \sin\phi e^{-\frac{\pi}{3Q}} e^{-\frac{\psi}{Q}} - \sin(\psi - \phi) e^{-\frac{2\pi}{3Q}} \right\} - \frac{E}{R} \quad (125)$$

Ces différentes formules permettent de calculer $i_c(t'_0)_1$ et les diverses expressions de i_c au cours d'une de ses périodes.

2.5.3.1.3. Caractéristiques limites de conduction continue

L'étude précédente montre que le courant redressé, en conduction continue, sur circuit R, L, E, se déduit directement de celui du circuit R, L de même paramètre Q. La conduction continue du montage débitant sur le circuit R, L, E cesse d'être assurée quand le courant redressé s'annule au cours d'une de ses périodes. C'est quand $\frac{E}{R}$ atteint la valeur minimale du courant redressé débité sur récepteur R, L de même paramètre Q, que les minimas du courant i_c débité sur R, L, E sont nuls, ce qui permet de déterminer les caractéristiques limites du mode de fonctionnement étudié.

L'étude de ces caractéristiques limites de conduction continue se déduit donc de l'étude de l'ondulation du courant débité par le montage sur circuit R, L puisqu'alors :

$$(i_{cmin})_{R,L} = \frac{E}{R} = \frac{m V_m}{R} \quad (126)$$

On a représenté à la planche IX, les variations de $(i_{cmin})_{R,L} = \frac{R}{V_m} m$, c'est-à-dire les courbes, tracées en fonction de ψ , qui limitent les zones où le couple de paramètres m, Q assure la conduction continue du montage.

On voit que les caractéristiques calculées pour $Q = 0,03$; $Q = 0,1$; $Q = 0,3$; $Q = 1$; $Q = 3$ et $Q = 10$ sont bien comprises entre celles déterminées pour Q nul et Q infini ; plus le circuit

récepteur est inductif, plus grand est le domaine où la conduction continue est assurée.

Pour les valeurs de l'angle ψ voisines de 180° , le maximum acceptable pour m est très faible et il peut y avoir lieu de tenir compte du courant de maintien I_H des redresseurs, pour cela il suffit d'accroître la valeur de E de la quantité RI_H .

2.5.3.1.4. Etude de l'ondulation du courant redressé

L'étude du courant redressé a montré que lorsque la conduction est continue

$$\begin{aligned} (i_{cmax})_{R,L,E} &= (i_{cmax})_{R,L} - \frac{E}{R} \\ (i_{cmin})_{R,L,E} &= (i_{cmin})_{R,L} - \frac{E}{R} \\ (i_{cmoy})_{R,L,E} &= (i_{cmoy})_{R,L} - \frac{E}{R} \end{aligned}$$

On en déduit la valeur du taux d'ondulation du courant redressé

$$K_{R,L,E} = K_{R,L} \times \frac{(i_{cmoy})_{R,L}}{(i_{cmoy})_{R,L} - \frac{mVm}{R}}$$

C'est-à-dire, compte tenu de la valeur moyenne du courant redressé débité par le circuit R,L.

$$K_{R,L,E} = K_{R,L} \times \frac{1}{1 - \frac{2 \pi m}{3 \sqrt{3} (1 + \cos \psi)}} = K_{R,L} \times \frac{1}{1 - \frac{1,21 m}{(1 + \cos \psi)}} \quad (127)$$

Cette expression montre que la multiplication par un terme correctif fonction de m et ψ permet de déduire aisément le taux d'ondulation du courant débité par le montage sur un récepteur R,L,E de celui obtenu lors de l'étude du débit sur un récepteur R,L (voir Planche III).

Comme prévu, l'augmentation de m qui réduit la valeur moyenne du courant i_c , sans modifier ses variations autour de cette moyenne, se traduit par un accroissement du taux d'ondulation.

2.5.3.1.5. Valeur efficace et facteur de forme du courant redressé

On peut encore calculer la valeur efficace I'_{ceff} du courant redressé par la méthode du paragraphe I en considérant la tension $u(\theta)$ appliquée à la partie R,L du récepteur R,L,E avec $u(\theta) = u_c(\theta) - E$.

Nous adopterons les notations suivantes:

$i_{c1}(\theta)$, $i_{c1}(\theta')$ expressions de la valeur instantanée du courant dans le circuit R,L,E

. $i_c(\theta)$, $i_c(\theta')$ expressions de la valeur instantanée du courant dans le circuit R,L de même paramètre Q.

Donc : $i_{c1}(\theta) = i_c(\theta) - \frac{E}{R}$ et $i_{c1}(\theta') = i_c(\theta') - \frac{E}{R}$ d'après (111) et (116).

2.5.3.1.5.1. $0^\circ < \psi < 60^\circ$

Dans ce cas on obtient :

$$I'_{ceff}^2 = \frac{3}{2\pi R} \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{3} - \psi} u(\theta) i_{c1}(\theta) d\theta + \int_0^{\frac{\pi}{3} + \psi} u(\theta') i_{c1}(\theta') d\theta' \right\} \quad (128)$$

C'est-à-dire :

$$I'_{ceff}^2 = \frac{3}{2\pi R} \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{3} - \psi} (u_c(\theta) - E) \left(i_c(\theta) - \frac{E}{R} \right) d\theta + \int_0^{\frac{\pi}{3} + \psi} (u_c(\theta') - E) \times \dots \right. \\ \left. \dots \times \left(i_c(\theta') - \frac{E}{R} \right) d\theta' \right\}$$

Du, en développant et regroupant

$$I'_{ceff}^2 = \frac{3}{2\pi R} \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{3} - \psi} u_c(\theta) i_c(\theta) d\theta + \int_0^{\frac{\pi}{3} + \psi} u_c(\theta') i_c(\theta') d\theta' + \dots \right. \\ \left. \dots \frac{E^2}{R} \left[\int_0^{\frac{\pi}{3} - \psi} d\theta - \frac{E}{R} \left[\int_0^{\frac{\pi}{3} - \psi} u_c(\theta) d\theta + \int_0^{\frac{\pi}{3} + \psi} u_c(\theta') d\theta' \right] \right] \dots \right. \\ \left. \dots - E \left[\int_0^{\frac{\pi}{3} - \psi} i_c(\theta) d\theta + \int_0^{\frac{\pi}{3} + \psi} i_c(\theta') d\theta' \right] \right\}$$

Outre les expressions I et II déjà définies en (92) on reconnaît le calcul de la valeur moyenne de la tension et du courant débité par le montage sur le circuit R,L du même paramètre Q.

On obtient :

$$I'_{ceff}^2 = \frac{3}{2\pi R} \left\{ I + II + \frac{2E^2}{3R} - \frac{2E}{R} \times \frac{2\pi}{3} \times \frac{3\sqrt{3} V_m (1 + \cos\psi)}{2\pi} \right\}$$

Soit finalement sachant que

$$E = m V_m$$

$$I'_{ceff}^2 = \frac{3}{2\pi R} \left\{ I + II + \frac{V_m^2}{R} \left[\frac{2\pi m^2}{3} - 2\sqrt{3} (1 + \cos\psi) m \right] \right\} \quad (129)$$

Compte tenu de la valeur de i_m

apparaissant dans les expressions I et II, I'_{ceff} peut être mis sous la forme :

$$I'_{ceff} = \frac{V_m}{R} H' \text{ ou } H' = f(Q, \psi, m) \quad (130)$$

Le facteur de forme du courant redressé peut donc s'écrire :

$$f_F = \frac{I'_{ceff}}{I_c} = \frac{2\pi H'}{3\sqrt{3}(1 + \cos\psi) - 2\pi m} \quad (131)$$

2.5.3.1.5.2. 60° < ψ < 180°

La tension u_C étant nulle après l'instant $\frac{\pi-\psi}{\omega}$, la tension u aux bornes de la partie R,L du récepteur est alors égale à $-\frac{E}{R}$. A l'aide du même principe que celui utilisé pour établir la relation générale (29) on peut facilement montrer que la valeur efficace du courant redressé est donnée par :

$$I'_{ceff}{}^2 = \frac{3}{2\pi R} \left\{ \int_0^{\pi-\psi} u(\theta) i_{C1}(\theta) d\theta - E \int_{\pi-\psi}^{\frac{2\pi}{3}} i_{C1}(\theta) d\theta \right\} \quad (132)$$

Soit en développant :

$$I'_{ceff}{}^2 = \frac{3}{2\pi R} \left\{ \int_0^{\pi-\psi} \left[u_C(\theta) - E \right] \left[i_C(\theta) - \frac{E}{R} \right] d\theta - \int_{\pi-\psi}^{\frac{2\pi}{3}} E \left(i_C(\theta) - \frac{E}{R} \right) d\theta \right\}$$

Donc :

$$I'_{ceff}{}^2 = \frac{3}{2\pi R} \left\{ \int_0^{\pi-\psi} u_C(\theta) i_C(\theta) d\theta - E \int_0^{\frac{2\pi}{3}} i_C(\theta) d\theta - \frac{E}{R} \int_0^{\pi-\psi} u_C(\theta) d\theta \right. \\ \left. \dots + \frac{E^2}{R} \int_0^{\frac{2\pi}{3}} d\theta \right\}$$

Outre le premier terme déjà calculé en (99) on reconnaît le calcul de la valeur moyenne du courant et de la tension délivrée par le montage du circuit R, L de même paramètre Q.

$$I'_{ceff}{}^2 = \frac{3}{2\pi R} \left\{ III - \frac{2\pi}{3} E I_C - \frac{2\pi E U_{CO}}{3R} + \frac{2\pi E^2}{3R} \right\}$$

Comme $I_C = \frac{U_{CO}}{R}$ pour le circuit

R,L et comme $E = m V_m$ il vient :

$$I'_{ceff}{}^2 = \frac{3}{2\pi R} \left\{ III + \frac{V_m^2}{R} \left[\frac{2\pi m^2}{3} - 2\sqrt{3} (1 + \cos \psi) m \right] \right\} \quad (133)$$

Compte tenu de la définition

de i_m intervenant dans III on peut écrire I'_{ceff} sous la forme

$$I'_{ceff} = \frac{V_m}{R} H'_1 \quad \text{où } H'_1 = f(Q, \psi, m) \quad (134)$$

Le facteur de forme du courant

redressé s'écrit alors :

$$f_F = \frac{I'_{ceff}}{I_C} = \frac{2\pi H'_1}{3\sqrt{3}(1 + \cos \psi) - 2\pi m} \quad (135)$$

Les courbes donnant f_F en fonction de l'angle ψ pour les diverses valeurs de Q choisies ont été tracées successivement pour $m = 0,5 - 0,75 - 1 - 1,25$ et $1,5$ (Planches X, XI, XII, XIII, XIV) ; chacune d'elles s'arrête à la valeur de ψ au-delà de laquelle la conduction continue n'est plus assurée.

Pour une valeur de m donnée, pour une même valeur de ψ , on retrouve la réduction de l'écart $f_F - 1$ quand Q augmente.

La comparaison des diverses planches montre qu'à Q donné, pour une même valeur de ψ , l'accroissement de m , en rendant plus grande l'ondulation de i_C , augmente la valeur de f_F .

2.5.3.2. Etude des courants lors des commutations

L'étude de la valeur instantanée du courant redressé a montré que la valeur du courant lors des changements de définition de la tension redressé se déduit de celle trouvée dans le cas du débit sur un récepteur R, L en retirant la quantité $\frac{E}{R}$. (cf formules (112), (113), (121) et (122).

Quel que soit ψ on a en effet à l'instant de la commutation :

- dans les redresseurs :

$$i_C(t_0)_1 = i_C(t_0) - \frac{E}{R} \text{ et donc } \frac{R_{iC}(t_0)_1}{V_m} = \frac{R_{iC}(t_0)}{V_m} - m$$

- dans les diodes :

$$i_C(t'_0)_1 = i_C(t'_0) - \frac{E}{R} \text{ et donc } \frac{R_{iC}(t'_0)_1}{V_m} = \frac{R_{iC}(t'_0)}{V_m} - m$$

Les courbes des planches V et VI donnant $\frac{R_{iC}(t_0)}{V_m}$ et $\frac{R_{iC}(t'_0)}{V_m}$ en fonction de ψ pour les valeurs choisies du paramètre Q permettent, par une simple soustraction de m , de déterminer les valeurs $\frac{R_{iC}(t_0)_1}{V_m}$ et $\frac{R_{iC}(t'_0)_1}{V_m}$ correspondant aux commutations du montage débitant sur le circuit R, L, E de même paramètre Q .

2.5.3.3. Etude du courant et de la puissance au secondaire

2.5.3.3.1. Etude du courant au secondaire

$$.0^\circ < \psi < 60^\circ$$

La valeur efficace du courant secondaire se déduit simplement de celle du courant redressé par $I'_s = I'_{ceff} \sqrt{\frac{2}{3}}$
c'est-à-dire :

$$I'_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V_m}{R} H' \quad (136)$$

$$60^\circ < \psi < 180^\circ$$

Le courant secondaire étant égal au courant redressé quand $0 < \theta < \pi - \psi$, on a :

$$i_{c1} + Q \frac{d(i_{c1})}{2d\theta} = \frac{u}{R}$$

soit $i_{c1}^2 + \frac{Q}{2} \frac{d i_{c1}}{d\theta} = \frac{u i_{c1}}{R}$

Avec $i_s = i_{c1}$, en prenant la valeur moyenne de i_s^2 sur une de ses périodes $T/2$, il vient :

$$I'_s{}^2 + \frac{Q}{2} \int_0^{\pi-\psi} \frac{d i_{c1}}{d\theta} d\theta = \frac{1}{R} \int_0^{\pi-\psi} u i_{c1} d\theta \quad (137)$$

Ce qui donne en développant :

$$\pi I'_s{}^2 = \frac{1}{R} \left\{ \int_0^{\pi-\psi} u_c(\theta) i_c(\theta) d\theta + (\pi-\psi) \frac{E^2}{R} - \frac{E}{R} \int_0^{\pi-\psi} u_c(\theta) d\theta - E \int_0^{\pi-\psi} i_c(\theta) d\theta \right\} \dots$$

$$\dots - \frac{Q}{2} (i_c(t'_0)_1^2 - i_c(t_0)_1^2)$$

On reconnaît dans le premier terme l'expression

III calculée en (99), donc :

$$\pi I'_s{}^2 = \frac{1}{R} \left\{ \text{III} + (\pi-\psi) \frac{E^2}{R} - \frac{2\pi E}{3R} U_{co} - E \int_0^{\pi-\psi} i_c(\theta) d\theta \right\} \dots$$

$$\dots - \frac{Q}{2} (i_c(t'_0) + i_c(t_0)_1) \times (i_c(t'_0) - i_c(t_0)_1)$$

Sachant que $i_c(\theta)$ est solution de l'équation

(82) on a :

$$E \int_0^{\pi-\psi} i_c(\theta) d\theta = \frac{E}{R} \int_0^{\pi-\psi} u_c(\theta) d\theta - E Q [i_c(t'_0) - i_c(t_0)]$$

En tenant compte des relations (121) et (122)

il vient :

$$\pi I'_s{}^2 = \frac{1}{R} \left\{ \text{III} + (\pi-\psi) \frac{E^2}{R} - \frac{2\sqrt{3} E V_m (1+\cos \psi)}{R} \right\} + Q (i_c(t'_0) - i_c(t_0)) \left[\frac{2 E}{R} - \frac{i_c(t'_0) + i_c(t_0)}{2} \right]$$

En reprénant les notations des formules (97) et (98) ainsi que $E = m V_m$ on obtient finalement :

$$\pi I'_s{}^2 = \frac{1}{R} \left\{ III + \frac{V_m^2}{R} \left[(\pi - \psi) m^2 - 2 \sqrt{3} (1 + \cos \psi) m \right] \right\} + Q i_m (G_1 - F_1) \left[\frac{2m V_m}{R} \dots \right] \dots - \frac{i_m (G_1 + F_1)}{2} \quad (138)$$

Cette relation permet d'écrire schématiquement:

$$I'_s = \frac{V_m}{R} H'_2 \quad \text{où } H'_2 = f(Q, \psi, m) \quad (139)$$

Les courbes donnant les valeurs du rapport $\frac{I'_s}{I_c}$ en fonction de ψ , pour les diverses valeurs de Q choisies, ont été tracées, successivement, dans le domaine où la conduction continue est assurée, pour les valeurs $m = 0,5 - 0,75 - 1 - 1,25 - \text{et } 1,5$ (planches XV, XVI, XVII, XVIII, XIX).

L'examen des diverses courbes fait apparaître, au-delà de $\psi = 60^\circ$, l'influence de la forme d'onde sur le poids relatif de la partie de i_c qui ne passe pas dans les enroulements secondaires.

La comparaison des diverses planches montre qu'à Q donné, pour une même valeur de ψ , l'accroissement de m augmente la valeur du rapport $\frac{I'_s}{I_c}$.

2.5.3.3.2. Etude de la puissance au secondaire

La puissance fournie au récepteur est ici égale à $R I'_{ceff2} + E I_c$, le facteur de puissance secondaire peut alors s'écrire :

$$.0^\circ \leq \psi < 60^\circ$$

$$f'_s = \frac{\sqrt{2} \left\{ R \frac{V_m^2}{R^2} H_1^2 + \frac{m V_m^2}{R} \left[\frac{3 \sqrt{3}}{2 \pi} (1 + \cos \psi) - m \right] \right\}}{3 \frac{V_m^2}{R} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} H_1}$$

$$\text{soit : } f'_s = \frac{2 \pi H_1^2 + m (3 \sqrt{3} (1 + \cos \psi) - 2 \pi m)}{2 \pi \sqrt{3} H_1} \quad (140)$$

$$60^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$$

$$f'_s = \frac{\sqrt{2} \left\{ R \frac{V_m^2}{R^2} H_1^2 + m \frac{V_m^2}{R} \left[\frac{3 \sqrt{3}}{2 \pi} (1 + \cos \psi) - m \right] \right\}}{3 \frac{V_m^2}{R} H_2}$$

$$\text{soit : } f'_s = \frac{2 \pi H'_1{}^2 + m [3 \sqrt{3} (1 + \cos \psi) - 2 \pi m]}{3 \pi \sqrt{2} H'_2} \quad (141)$$

Nous avons tracé (planches XX, XXI, XXII, XXIII, XXIV) les courbes représentatives, en fonction de ψ , du rapport f'_s pour les valeurs de Q et de m précédemment choisies. Lorsque les courbes sont très voisines, confondues avec l'échelle adoptée, nous avons pointé, avec la valeur de Q , la limite de conduction continue qui lui est liée.

On voit qu'à partir d'une valeur suffisante de m , quel que soit ψ , le facteur de puissance secondaire augmente avec Q . Par contre le facteur de puissance diminue, à Q et ψ donné, quand m augmente.

Dès que ψ est supérieur à 60° , la différence de pente des courbes f'_s atteste de l'influence sur I'_s du poids relatif de la partie de i_c qui ne traverse pas le secondaire, mais là encore, l'augmentation de Q est bénéfique.

Ces courbes montrent l'influence notable de la force contre électromotrice du récepteur sur le facteur de puissance secondaire, dont la qualité est signalée pour mettre en évidence le principal avantage du pant mixte

2.5.4. Remarques

A cause de l'importance de ses applications, nous avons consacré au débit sur R L E, la majeure partie des planches de caractéristiques. Etant donné le nombre de courbes nécessaires pour chaque valeur de m , nous n'avons pu les tracer que pour cinq valeurs de ce rapport, mais les formules données et leur présentation conçue en vue de l'exploitation sur ordinateur, permettent la détermination des courbes intermédiaires.

Plus encore que pour les récepteurs précédents le débit sur f.c.e.m. nécessite de nuancer les résultats établis en supposant un récepteur infiniment inductif. Dans ce cas l'étude précise est nécessaire si l'on veut obtenir une bonne approximation dans les résultats numériques.

III. - CONCLUSIONS

La réalisation d'équipements de conversion alternatif - continu, de puissance unitaire de plus en plus élevée, incite à affiner les méthodes de prédétermination des caractéristiques de ces montages. Ces caractéristiques dépendent du couplage adopté, des redresseurs utilisés et des constantes des éléments situés en amont et en aval de ces derniers. Les performances des redresseurs au silicium sont excellentes, courant inverse négligeable et chute de tension directe très réduite ; aussi ce sont les impédances des autres éléments constitutifs du montage qui expliquent l'essentiel de l'écart entre les caractéristiques théoriques et les caractéristiques réelles. La recherche d'une meilleure connaissance des montages redresseurs conduit donc à une étude de circuits à diodes ou thyristors de plus en plus précise.

Le travail dont nous venons de rendre compte dans ce mémoire se situe dans le prolongement direct de l'étude générale des montages redresseurs récemment publiée par G. SEGUIER. Il a montré que pour déterminer les caractéristiques d'un montage, il existait une méthode assez simple marquée par des étapes successives et conduisant à des résultats d'une bonne précision. Il l'a appliquée à tous les montages mais en adoptant l'hypothèse du récepteur infiniment inductif.

Or cette hypothèse ne peut être adoptée qu'en première approximation pour de nombreux récepteurs réels, surtout lorsqu'on opère en commutation retardée avec de fortes valeurs de l'angle de retard à l'amorçage.

Dans la première partie nous avons indiqué les méthodes de correction permettant de tenir compte de la nature réelle du récepteur.

Il est en effet pratiquement indispensable de suivre les étapes de l'étude générale qui correspond au récepteur infiniment inductif, à condition de corriger les résultats obtenus par des coefficients qui sont fonctions des paramètres caractérisant le récepteur.

Successivement pour le régime des tensions à vide, pour les courants, puis pour les chutes de tension en charge nous avons indiqué les

coefficients de correction à calculer, les relations qui servent à les établir et les procédés de simplification utilisables.

Nous avons ainsi pu montrer qu'un nombre réduit de coefficients correcteurs suffit pour assurer le passage de l'étude générale au débit sur un récepteur réel.

La deuxième partie de ce mémoire est consacrée à l'application de ces méthodes à un montage précis, le pont triphasé mixte. Ce montage est de plus en plus utilisé pour l'obtention d'une tension redressée continuellement variable lorsque la réversibilité n'est pas nécessaire. Il a de plus "l'avantage" d'être l'un de ceux dont l'étude est la plus compliquée : deux expressions de la tension redressée pour chacune des périodes de celle-ci ; intervalles où le courant dans le récepteur n'est pas fourni par la source. Il constitue donc un excellent exemple pour montrer que la méthode proposée est d'une application relativement aisée.

Après avoir rappelé les résultats de l'étude générale, nous avons examiné rapidement le débit sur résistance pure. Cela nous a permis de souligner les particularités des régimes à conduction continue avec intervalles à tension et courant nuls.

Nous avons étudié ensuite le débit sur une charge résistante et inductive. Après avoir démontré que seul le fonctionnement en conduction continue du pont redresseur était possible, nous avons pu tracer les courbes donnant les coefficients de correction en fonction de l'angle de retard pour diverses valeurs du coefficient de surtension du récepteur.

Dans le cas d'une charge présentant en série résistance, inductance et force contre-électromotrice, les expressions des coefficients de correction découlent aisément de celles établies pour un récepteur résistif et inductif. Mais deux paramètres étant nécessaires pour définir la nature du récepteur, le nombre de courbes donnant le coefficient de correction en fonction de l'angle de retard est plus important.

Les différences trouvées par rapport à la théorie générale sont d'autant plus grandes que la tension redressée est plus ondulée donc que le retard à l'amorçage est plus fort, que le récepteur est moins inductif et que la valeur relative de la force contre électromotrice est plus élevée. Pour certains types de charges, l'erreur commise en admettant les résultats de l'étude générale serait notable.

Les vérifications expérimentales ont porté sur la première partie et les relevés ont été effectués dans des conditions permettant d'accentuer les phénomènes examinés.

Le but de notre étude étant la correction des résultats de l'étude générale qui donne déjà elle-même des différences faibles par rapport aux grandeurs comparées (tension redressée à vide et en charge, écart entre les facteurs de puissance et l'unité etc...) Les vérifications expérimentales auraient dans la plupart des cas permis de connaître les résultats cherchés avec une précision très inférieure à celle que procurent les procédés de calcul que nous proposons.

Notre contribution à l'étude des montages redresseurs permet d'améliorer la connaissance des caractéristiques dans les zones normales de fonctionnement. Mais il resterait beaucoup de points à préciser sur les caractéristiques au voisinage du court-circuit, sur les régimes avec conduction discontinue, sur l'influence d'autres types de charge. D'ailleurs chaque montage redresseur soulève des problèmes qui lui sont particuliers.

A P P E N D I C E

ETUDE DE LA CHUTE INDUCTIVE $\Delta_1 U'_c$ DU MONTAGE P.2.

DÉBITANT SUR UNE RESISTANCE PURE

A.1. Introduction

Nous avons proposé d'évaluer la chute inductive $\Delta_1 U'_c$ en admettant sa proportionnalité au courant redressé à l'instant des commutations et non plus à la valeur moyenne de ce courant ; ce faisant, il y a encore une approximation car on utilise des valeurs instantanées d'intensités, calculées en négligeant l'influence des réactances.

Pour juger de la précision obtenue par le procédé proposé, nous avons considéré un cas simple permettant de mettre particulièrement en évidence l'erreur commise et d'en calculer l'importance, il s'agit de l'étude du débit du montage monophasé double alternance, P.2., sur charge purement résistive.

Si on néglige la chute inductive dans la détermination de la tension redressée, celle-ci est formée de deux demi-sinusoïdes par période et est nulle lors des changements de diode passante. Le courant redressé, ayant la même forme d'onde, est nul lors des commutations ; la méthode que nous proposons conduit alors à supposer nulle la chute inductive.

Or, dans ce cas simple, où l'étude générale et le procédé correctif donnent des résultats très différents, il est possible de calculer **sans approximation** la tension redressée moyenne en charge en **tenant compte** des réactances. La comparaison de la chute de tension réelle, de la chute de tension corrigée par le procédé indiqué et de la chute de tension résultant de l'étude générale, sera donc dans ce cas particulièrement instructive.

L'étude du fonctionnement sur résistance du montage P.2. sera suivi d'une vérification expérimentale.

A.2. Détermination directe de la tension en charge

On a représenté la figure 30 le montage P.2. débitant sur une résistance pure R. Les réactances de fuite du transformateur, s'il y en a, et du réseau amont sont supposées ramenées en N_2 .

Les tensions v_1 et v_2 , égal à $-v_1$, sont les valeurs à vide des tensions secondaires à redresser, de période T .

On posera par la suite

$$v_1 = V_m \sin \omega t$$

$$\text{tg } \phi = \frac{N_2 \omega}{R} = Q \quad (142)$$

Q augmente au fur et à mesure que la charge croît.

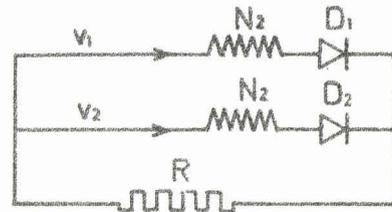


Figure 30. - Image du montage P.2. débitant sur un récepteur résistant.

A.2.1. Etablissement des relations donnant en fonction de Q les angles α et ν caractérisant l'empiètement.

La présence des réactances empêche toute discontinuité du courant dans les enroulements et dans le récepteur R . A partir de l'instant $t = 0$ où v_1 devient positif, compte tenu de l'empiètement, on est amené à envisager le fonctionnement représenté à la figure 31.

A partir de l'instant $\frac{\alpha}{\omega}$ la diode D_1 est la seule conductrice puis, D_1 continuant à conduire, la diode D_2 entre en conduction à l'instant $\frac{\nu}{\omega}$. Le régime permanent étant supposé établi, la diode D_1 cesse d'être passante à l'instant $\frac{\pi + \alpha}{\omega}$ à partir duquel D_2 assure seule le débit du courant redressé. Pour la même raison D_1 entre à nouveau en conduction à l'instant $\frac{\pi + \nu}{\omega}$.

A partir de cette description du fonctionnement on peut mettre le problème en équation.

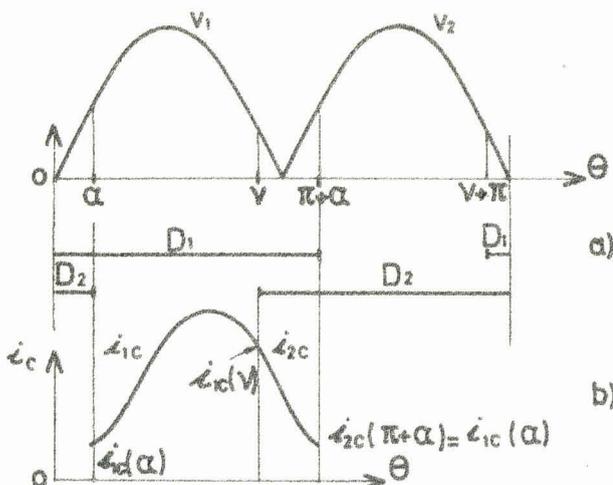


Figure 31. - Formes d'onde des tensions et du courant :

a) intervalles de conduction des diodes pendant une période T .

b) courant redressé et notations adoptées.

$\alpha < \omega t < \nu$

Durant cet intervalle D_1 est seule conductrice, appliquant la tension v_1 au circuit comprenant N_2 et R , le courant i_{1c} parcourant le récepteur est solution de l'équation :

$$v_1 = R i_{1c}(\theta) + N_2 \omega \frac{di_{1c}}{d\theta} \quad (143)$$

Compte tenu de l'expression de v_1 il vient :

$$i_{1c}(\theta) = A e^{-\frac{\theta}{Q}} + \frac{V_m}{R \sqrt{1+Q^2}} \sin(\theta - \phi)$$

A l'instant $\theta = \alpha$, $i_{1c}(\theta)$ est égal à $i_{1c}(\alpha)$ avec les notations adoptées (cf figure 3D b) d'où :

$$A = \left\{ i_{1c}(\alpha) - \frac{V_m}{R \sqrt{1+Q^2}} \sin(\alpha - \phi) \right\} e^{\frac{\alpha}{Q}}$$

l'expression du courant $i_{1c}(\theta)$ peut alors s'écrire :

$$i_{1c}(\theta) = \left\{ i_{1c}(\alpha) - \frac{V_m}{R \sqrt{1+Q^2}} \sin(\alpha - \phi) \right\} e^{\frac{\alpha - \theta}{Q}} + \frac{V_m}{R \sqrt{1+Q^2}} \sin(\theta - \phi) \quad (144)$$

$\nu < \omega t < \pi + \alpha$: intervalle de commutation

La commutation commence à l'instant $\theta = \nu$ tel que :

$$v_2 = V_m \sin(\nu - \pi) = R i_{1c}(\nu) \quad (145)$$

C'est-à-dire :

$$i_{1c}(\nu) = -\frac{V_m}{R} \sin \nu = \left\{ i_{1c}(\alpha) - \frac{V_m}{R \sqrt{1+Q^2}} \sin(\alpha - \phi) \right\} e^{\frac{\alpha - \nu}{Q}} + \frac{V_m}{R \sqrt{1+Q^2}} \sin(\nu - \phi) \quad (145)$$

Pendant cet intervalle D_1 et D_2 sont toutes deux conductrices.

Si i_1 et i_2 sont les courants respectivement acheminés par D_1 et D_2 , en notant $i_{2c} = i_1 + i_2$ le courant dans R , on a le système d'équations :

$$\begin{aligned} v_1 &= N_2 \omega \frac{di_1}{d\theta} + R i_{2c} \\ v_2 &= N_2 \omega \frac{di_2}{d\theta} + R i_{2c} \end{aligned} \quad (146)$$

En faisant la somme de ces deux relations, comme $v_2 = -v_1$, il vient :

$$N_2 \omega \frac{di_{2c}}{d\theta} + 2 R i_{2c} = 0 \quad (147)$$

Pendant la commutation le courant dans le récepteur est donc :

$$i_{2c} = i_{1c}(\nu) e^{-\frac{2(\theta - \nu)}{Q}} \quad (148)$$

A l'instant $\frac{(\pi+\alpha)}{\omega}$, la commutation est achevée, le régime permanent étant supposé établi, le courant a la valeur $i_{1c}(\alpha)$:

$$i_{1c}(\alpha) = i_{1c}(\nu) e^{-\frac{2(\pi+\alpha-\nu)}{Q}} \quad (149)$$

On peut ainsi déterminer $i_{1c}(\alpha)$, c'est-à-dire, tous calculs effectués :

$$i_{1c}(\alpha) = \frac{V_m}{R \sqrt{1+Q^2}} \times \frac{e^{-\frac{2(\pi+\alpha-\nu)}{Q}}}{1 - e^{-\frac{2(\pi+\alpha-\nu)}{Q}}} \left\{ \sin(\nu-\phi) e^{\frac{\nu-\alpha}{Q}} - \sin(\alpha-\phi) \right\} \quad (150)$$

Cette expression permet, à partir des expressions (144) et (148), de calculer la valeur de $i_{1c}(\nu)$, soit :

$$i_{1c}(\nu) = \frac{V_m}{R \sqrt{1+Q^2}} \times \frac{1}{1 - e^{-\frac{2(\pi+\alpha-\nu)}{Q}}} \left\{ \sin(\nu-\phi) - \sin(\alpha-\phi) e^{\frac{\alpha-\nu}{Q}} \right\} \quad (151)$$

Compte tenu de la relation (145), on sait que $i_{1c}(\nu)$ est égal à $-\frac{V_m}{R} \sin \nu$, d'où une première relation liant les paramètres α et ν de l'ampiètement.

$$\sin \nu + \frac{1}{\sqrt{1+Q^2}} \times \frac{1}{1 - e^{-\frac{2(\pi+\alpha-\nu)}{Q}}} \left\{ \sin(\nu-\phi) - \sin(\alpha-\phi) e^{\frac{\alpha-\nu}{Q}} \right\} = 0 \quad (152)$$

Une seconde relation entre α et ν peut être obtenue en exprimant que dans l'intervalle $\nu < \theta < \pi + \alpha$, le courant i_1 passe de $i_{1c}(\nu)$ à 0.

L'équation donnant i_1 est :

$$v_1 = N_2 \omega \frac{di_1}{d\theta} + R i_{2c}(\theta)$$

Compte tenu des expressions de v_1 et $i_{2c}(\theta)$ il vient :

$$\frac{di_1}{d\theta} = \frac{V_m}{N_2 \omega} \sin \theta - \frac{i_{1c}(\nu)}{Q} e^{-\frac{2(\theta-\nu)}{Q}}$$

$$d'où : i_1(\theta) = B - \frac{V_m}{N_2 \omega} \cos \theta + \frac{i_{1c}(\nu)}{2} e^{-\frac{2(\theta-\nu)}{Q}}$$

Or à l'instant $\theta = \nu$: $i_1(\nu) = i_{1c}(\nu)$, on en déduit B puis l'expression de $i_1(\theta)$, soit :

$$i_1(\theta) = \frac{V_m}{N_2 \omega} \left\{ \cos \nu - \cos \theta \right\} + \frac{i_{1c}(\nu)}{2} \left\{ 1 + e^{-\frac{2(\theta-\nu)}{Q}} \right\} \quad (153)$$

A l'instant $\frac{\pi + \alpha}{\omega}$ la commutation cesse et le courant i_1 s'annule, donc :

$$\frac{V_m}{Q R} \left\{ \cos v - \cos (\pi + \alpha) \right\} + \frac{i_{1c}(v)}{2} \left\{ 1 + e^{-\frac{2(\pi + \alpha - v)}{Q}} \right\} = 0$$

Sachant que $i_{1c}(v) = -\frac{V_m}{R} \sin v$, la nouvelle relation liant α et v peut s'écrire :

$$2 (\cos v + \cos \alpha) - Q \sin v \left(1 + e^{-\frac{2(\pi + \alpha - v)}{Q}} \right) = 0 \quad (154)$$

A.2.2. Valeurs des angles α et v

Les équations (152) et (154) constituent un système de deux équations implicites à deux inconnues α et v , fonctions d'un paramètre Q . Même en disposant d'un ordinateur puissant, la détermination des solutions $\alpha(Q)$ et $v(Q)$ demeure difficile, aussi ne les avons nous étudiées que pour les valeurs les plus fréquentes du paramètre Q .

Les premières colonnes du tableau 32 donnent, en fonction du paramètre Q , les valeurs en degrés décimaux des angles α et v ainsi que la valeur $\xi = 180 + \alpha - v$ de l'angle d'empiétement.

A.2.3. Caractéristique "réelle" de tension

Les calculs précédents ont permis de calculer les différentes expressions du courant redressé. Du calcul de la valeur moyenne I_C de i_C on déduit la valeur moyenne de $U_C = R I_C$.

Soit :

$$U_C = R I_C = \frac{R}{\pi} \left\{ \int_{\alpha}^v i_{1c}(\theta) d\theta + \int_v^{\pi + \alpha} i_{2c}(\theta) d\theta \right\} \quad (155)$$

C'est-à-dire après avoir remplacé i_{1c} et i_{2c} par leurs valeurs et effectué tous les calculs :

$$U_C = \frac{2 V_m}{\pi} \left\{ \frac{Q}{2} \sin v - \cos v \right\} \quad (156)$$

Pour les différentes valeurs de Q précédemment choisies on a reporté dans le tableau (32) les valeurs du rapport $\left(\frac{U_C}{U_{C0r}}\right)$, U_{C0} désignant la tension redressée à vide ($v = \pi$). L'indice r correspond à la caractéristique "réelle" calculée.

A.3. Comparaison des trois caractéristiques

Si on suppose N_2 fixé, faire varier Q revient à faire varier R et donc I_c , valeur moyenne du courant redressé. La courbe $U_c = f(Q)$ est donc une image de la caractéristique de tension du montage $U_c = f(I_c)$.

On se propose de comparer les caractéristiques $U_c = f(Q)$, calculées, d'une part, à partir de l'étude précédente et, d'autre part, à partir de l'étude générale, en ne tenant compte que de la chute de tension due aux réactances, qui est d'ailleurs la seule qui diffère, et sachant que l'étude préliminaire du paragraphe I prédit, pour ce montage débitant sur résistance, une chute de tension nulle (alors $(\frac{U_c}{U_{c0}})_{e.c.} = 1$, l'indice e.c. signifie de "l'étude corrective").

A.3.1. Rappel de la détermination de la caractéristique de tension par l'étude générale.

Pour le montage P.2. la chute de tension due à l'effet des réactances est donnée par la formule

$$\Delta U_c = \frac{N_2 \omega I_c}{\pi} = \frac{N_2 \omega U_c}{\pi R} = \frac{Q}{\pi} (U_{c0} - \Delta U_c)$$

$$\text{Donc } \Delta U_c = \frac{Q}{\pi + Q} U_{c0}$$

La valeur moyenne de la tension redressée vaut donc :

$$U_c = U_{c0} - \Delta U_c = \frac{\pi}{\pi + Q} U_{c0} \quad (157)$$

Pour les valeurs de Q déjà choisies, on a reporté dans le tableau (33) les valeurs du rapport $(\frac{U_c}{U_{c0}})_{e.g.} = \frac{\pi}{\pi + Q}$, l'indice e.g. correspond à la caractéristique calculée par "l'étude générale".

A. 3.2. Tableau comparatif et conclusions

Le tableau 32 permet de comparer les rapports $\left(\frac{U_c}{U_{c0}}\right)$ et $\left(\frac{U_c}{U_{c0}}\right)$ e.g.

à 1'unité.

0	α	ν	ξ	$\left(\frac{U_c}{U_{c0}}\right)_r$	$\left(\frac{U_c}{U_{c0}}\right)_{e.g.}$
0,01	1	180,293	0,707	0,9999	0,9968
0,02	1,401	180,570	0,831	0,9998	0,9936
0,03	1,877	180,839	0,938	0,9996	0,9905
0,04	2,328	181,135	1,183	0,9994	0,9874
0,05	3	181,442	1,556	0,9990	0,9843
0,06	3,376	181,694	1,682	0,9986	0,9812
0,07	4	182,008	1,992	0,9981	0,9782
0,08	4,428	182,280	2,148	0,9976	0,9751
0,09	5	182,566	2,434	0,9969	0,9721
0,1	5,535	182,847	2,688	0,9962	0,9691
0,11	6	183,116	2,884	0,9955	0,9661
0,12	6,639	183,408	3,231	0,9946	0,9632
0,13	7	183,663	3,337	0,9938	0,9602
0,14	7,736	183,964	3,772	0,9927	0,9573
0,15	8,282	184,24	4,042	0,9917	0,9544

Tableau 32 : résultats obtenus par le calcul, dominant,

en fonction de 0 :

- les angles α, ν, ξ et le rapport $\left(\frac{U_c}{U_{c0}}\right)_r$

- en dernière colonne, le rapport $\left(\frac{U_c}{U_{c0}}\right)_{e.g.}$

• déduit de l'étude générale.

On voit que dans la zone normale de fonctionnement, qui, pour un courant parfaitement lissé, correspond à une chute inductive de 1'ordre de 5 %, la chute de tension réelle est beaucoup plus faible que celle que donne l'étude générale et qu'on commet une erreur bien moins grande en confondant $\left(\frac{U_c}{U_{c0}}\right)_r$ avec 1 qu'avec $\left(\frac{U_c}{U_{c0}}\right)_{e.g.}$.

Cet exemple montre que le procédé correctif proposé conduit à une excellente approche de la chute de tension inductive réelle.

A.4. Vérification expérimentale

Pour vérifier que la chute de tension inductive est bien proportionnelle à la valeur du courant redressé à commuter et non à sa valeur moyenne, nous avons relevé les caractéristiques de tension $U_C = f(I_C)$ d'un montage P.2. :

- débitant d'abord sur une résistance pure.
- débitant sur un récepteur très inductif.

Le procédé correctif proposé conduit à supposer la chute de tension inductive nulle dans le premier cas alors que l'application des résultats de l'étude générale conduit à leur donner la même valeur que pour le second type de charge.

Le montage utilisé est le même que celui représenté à la figure 10 et décrit au paragraphe 1.2.4.3. a .

Pour mettre en évidence le seul effet des réactances nous avons corrigé U_C mesuré en y ajoutant la chute ohmique. Les courbes ont été tracées en prenant pour U_C :

$$U_C = U_C \text{ mesuré} + \frac{R_1 I_p^2 + 2 R_2 I_s^2}{I_C}$$

Etant donné les faibles valeurs relatives des intensités redressées, on a supposé constantes les chutes de tension dans les diodes.

Les relevés de la figure 33 montrent que le début des caractéristiques $U_C = f(I_C)$ satisfait aux conclusions de l'étude correctrice, elle-même en accord avec l'étude réelle :

- quasi absence de chute de tension due aux réactances lors du débit sur résistance.
- proportionnalité de la chute de tension au courant redressé moyen dans le cas du débit sur récepteur fortement selfique.

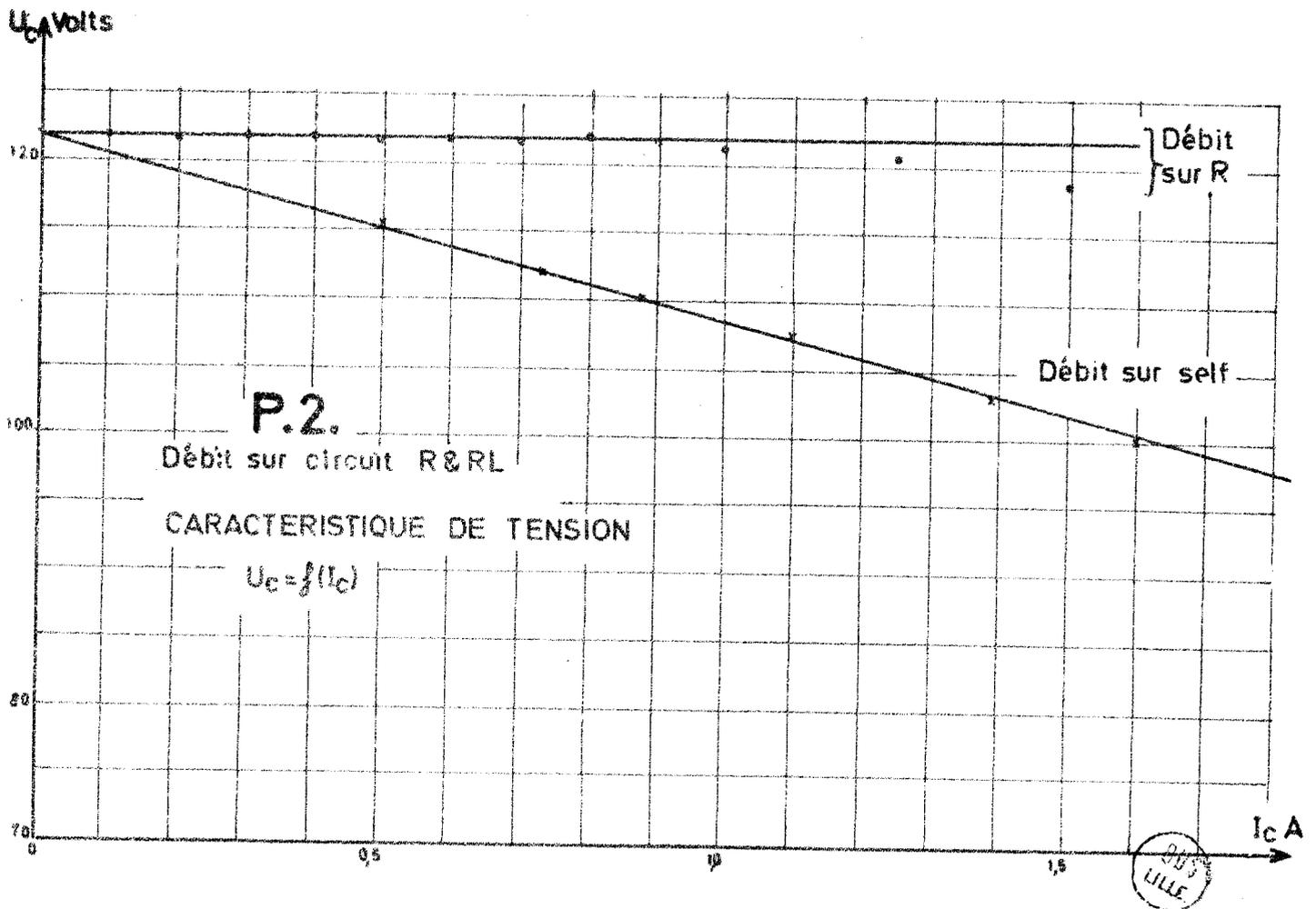


Figure 73. - Relevé expérimental de $U_c = f(I_c)$ d'un montage P.2. débitant sur résistance puis sur charge très inductive.

PLANCHES DE CARACTERISTIQUES

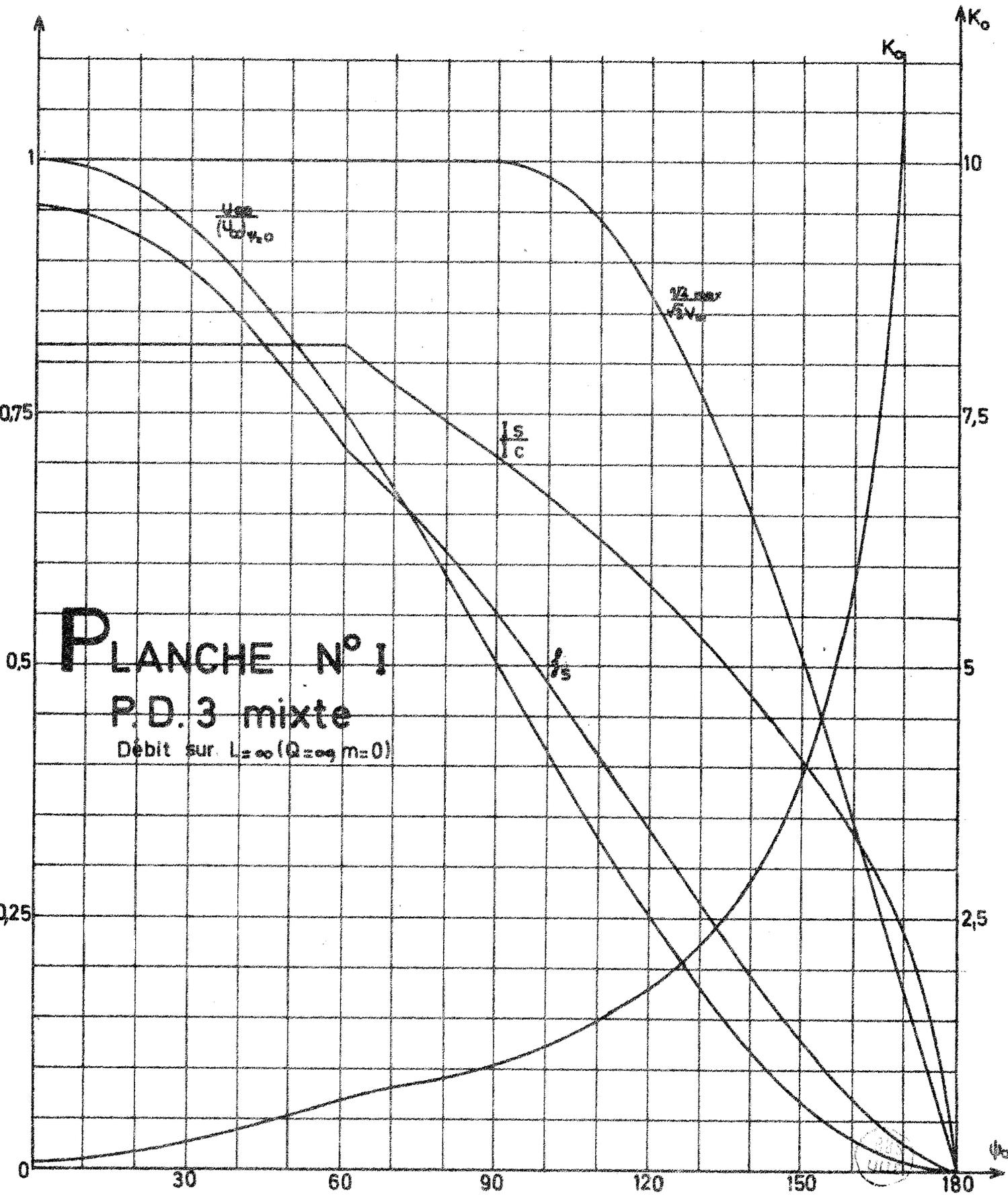


PLANCHE II

P. D. 3

Débit sur R ($Q=0, m=0$)

Les courbes $\frac{U_{co}}{(U_{co})_{\psi=0}}$, K_0 sont les mêmes que celles de la planche I

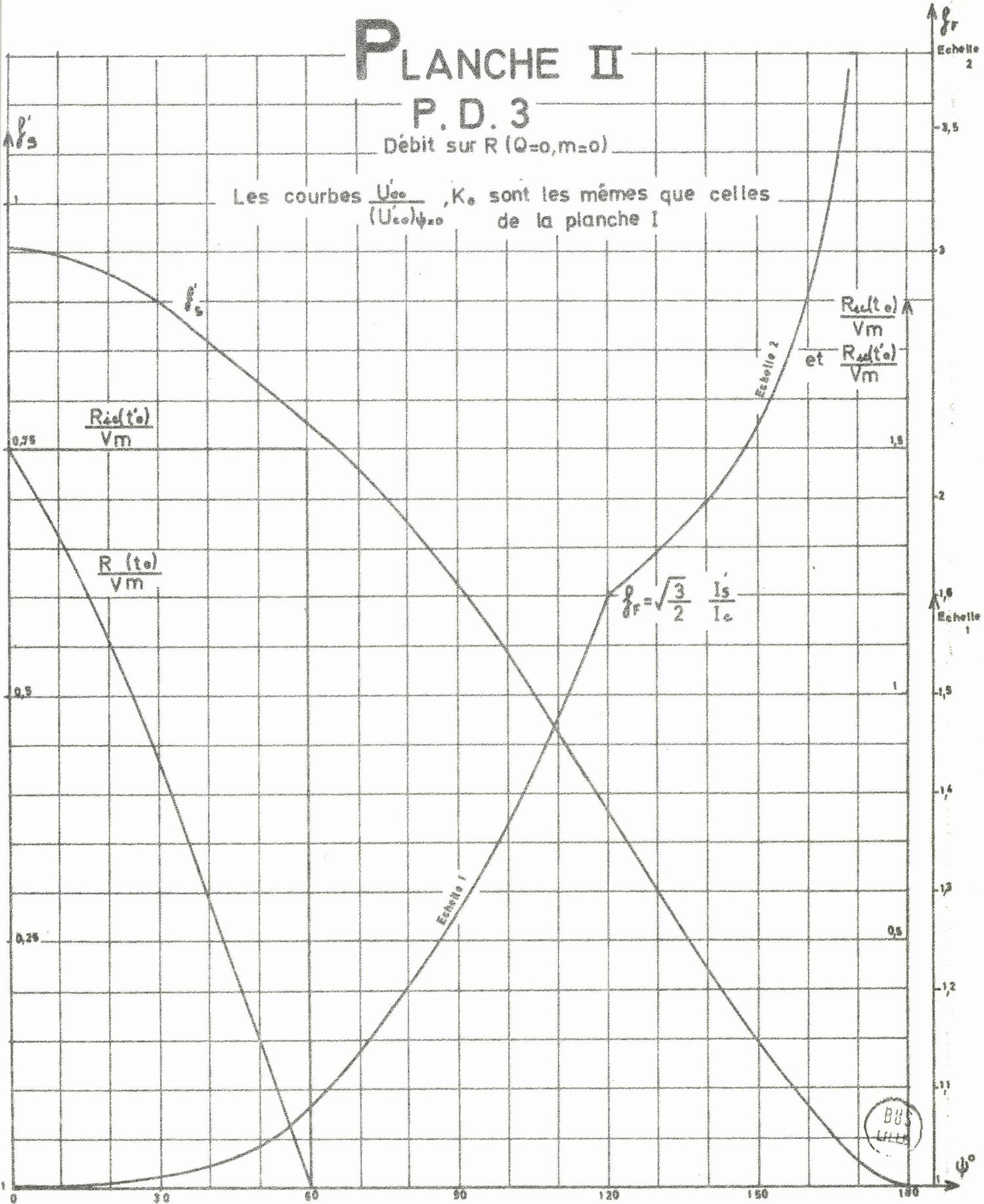


PLANCHE III

P.D.3 mixte

Débit sur récepteur R, L
($Q \neq 0, m=0$)

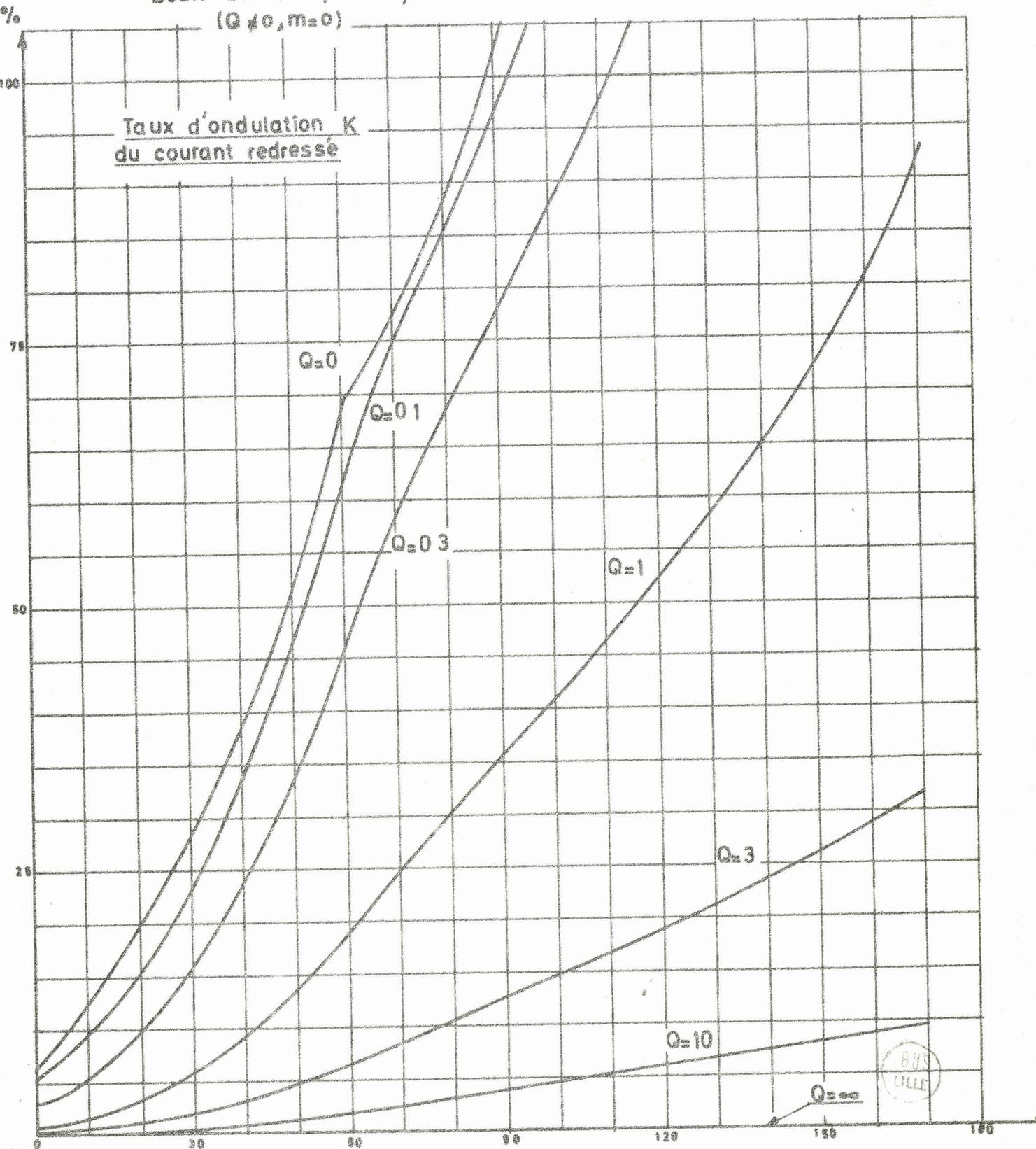


PLANCHE IV

P.D.3 mixte

Débit sur récepteur R.L. ($Q \neq 0, m=0$)

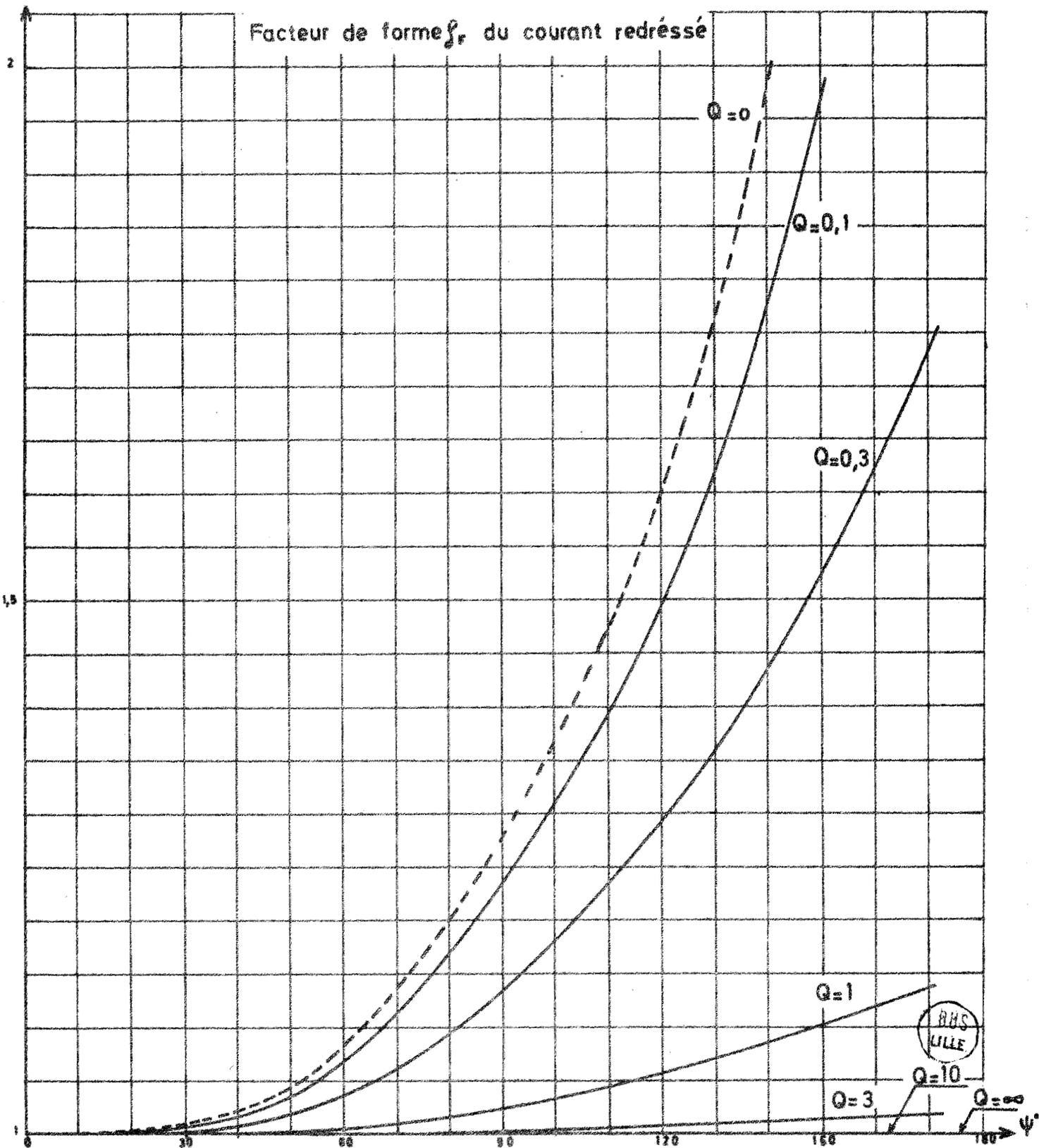


PLANCHE V

P.D.3 mixte
 Débit sur récepteur R, L (0,40 m=0)

Courant dans les redresseurs lors des commutations

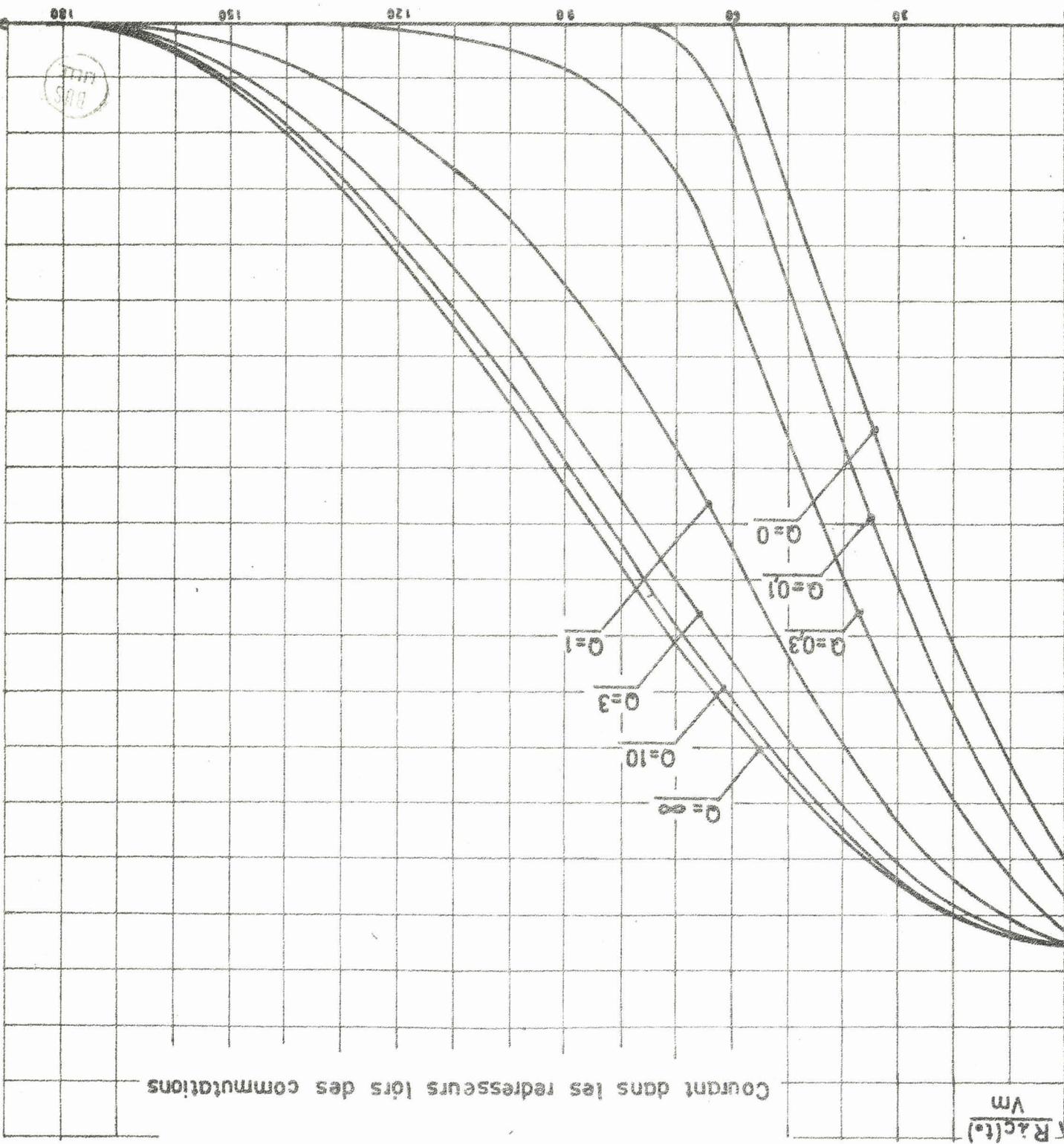


PLANCHE VI

P.D.3 mixte

Débit sur récepteur R.L. ($Q \neq 0, m = 0$)

Courant dans les diodes lors des commutations

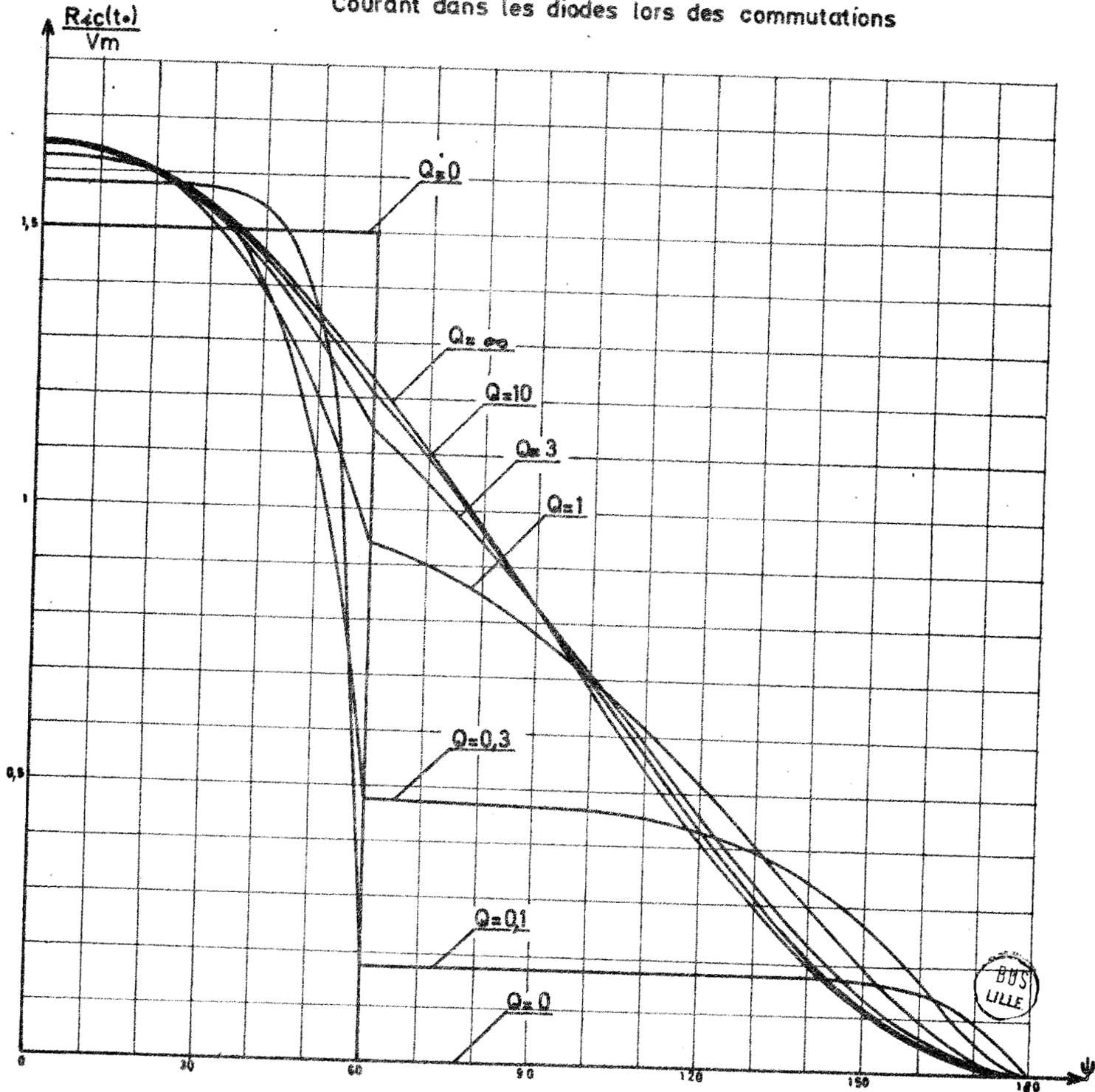


PLANCHE VII

P.D.3 mixte

Débit sur récepteur R.L. ($Q \neq 0, m=0$)

Caractéristique $\frac{I_s}{I_c} = f(\psi)$

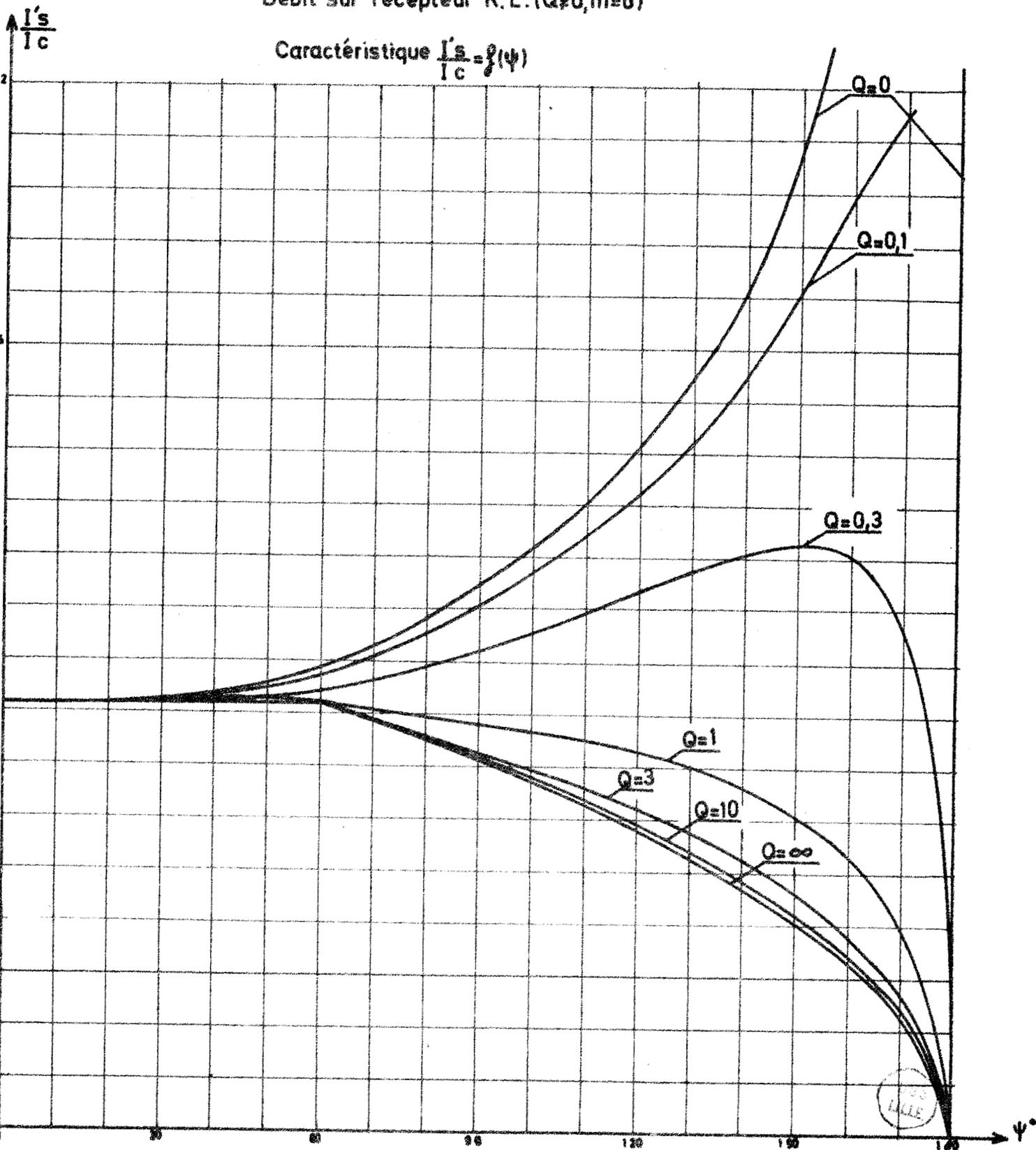


PLANCHE VIII

P.D.3 mixte

Débit sur récepteur R.L ($Q \neq 0, m=0$)

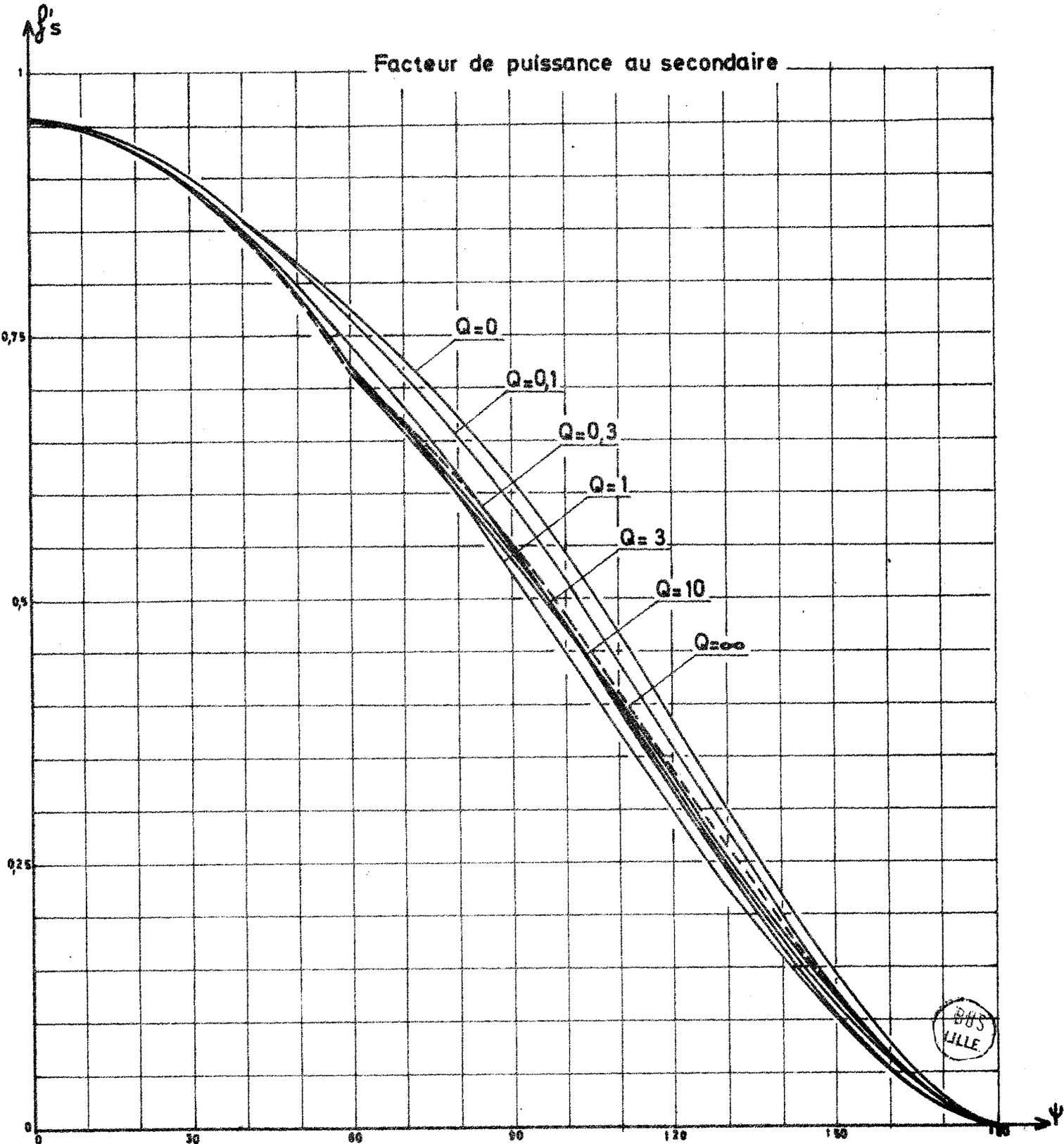


PLANCHE X

P.D.3 mixte

Débit sur récepteur R,L,E

$Q \neq 0$ $m = 0,5$

Facteur de forme f_r du courant redressé

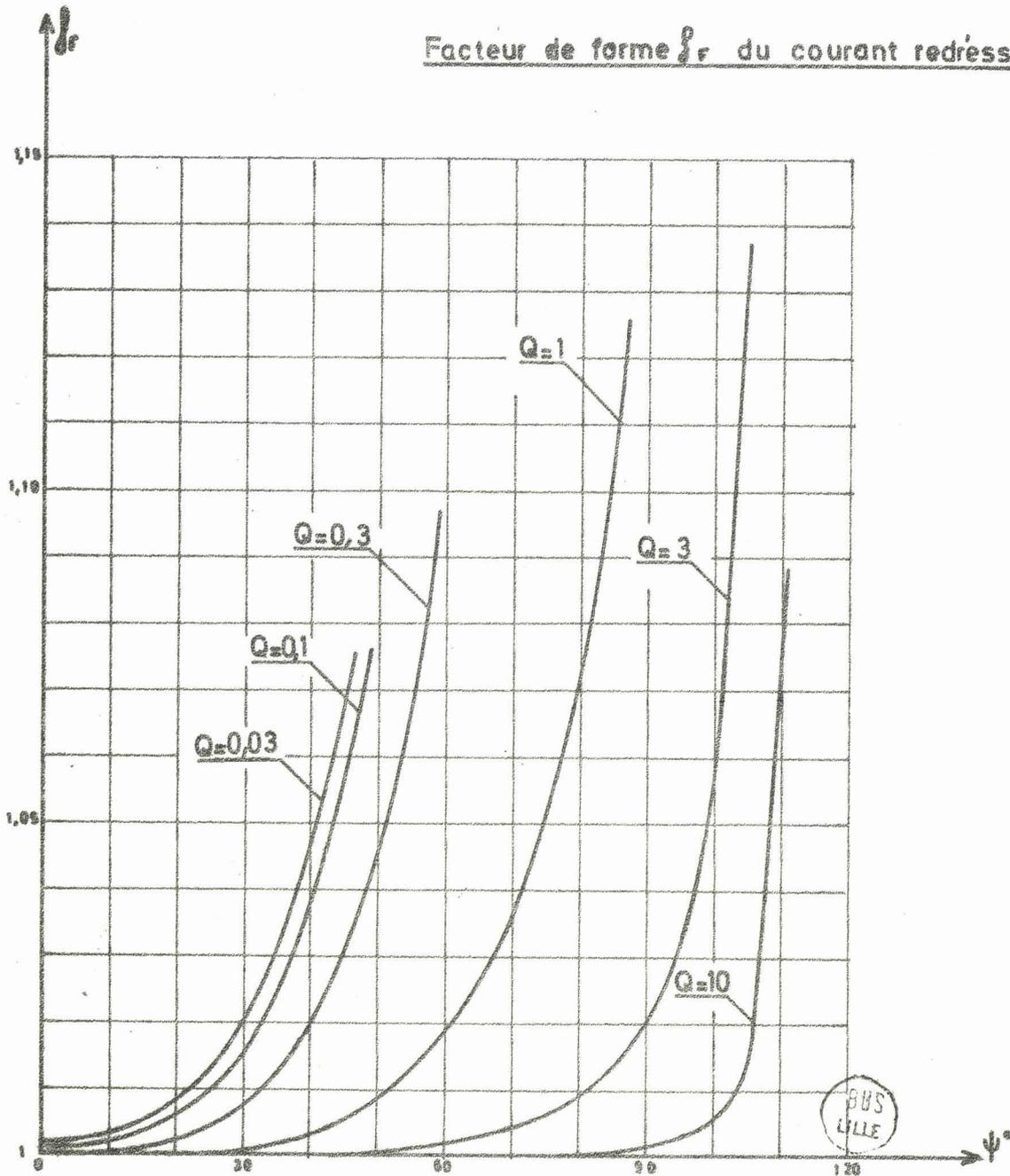


PLANCHE XI

P. D.3 mixte

Débit sur récepteur R,L,E

$Q \neq 0$ $m=0,75$

Facteur de forme f_r du courant redressé

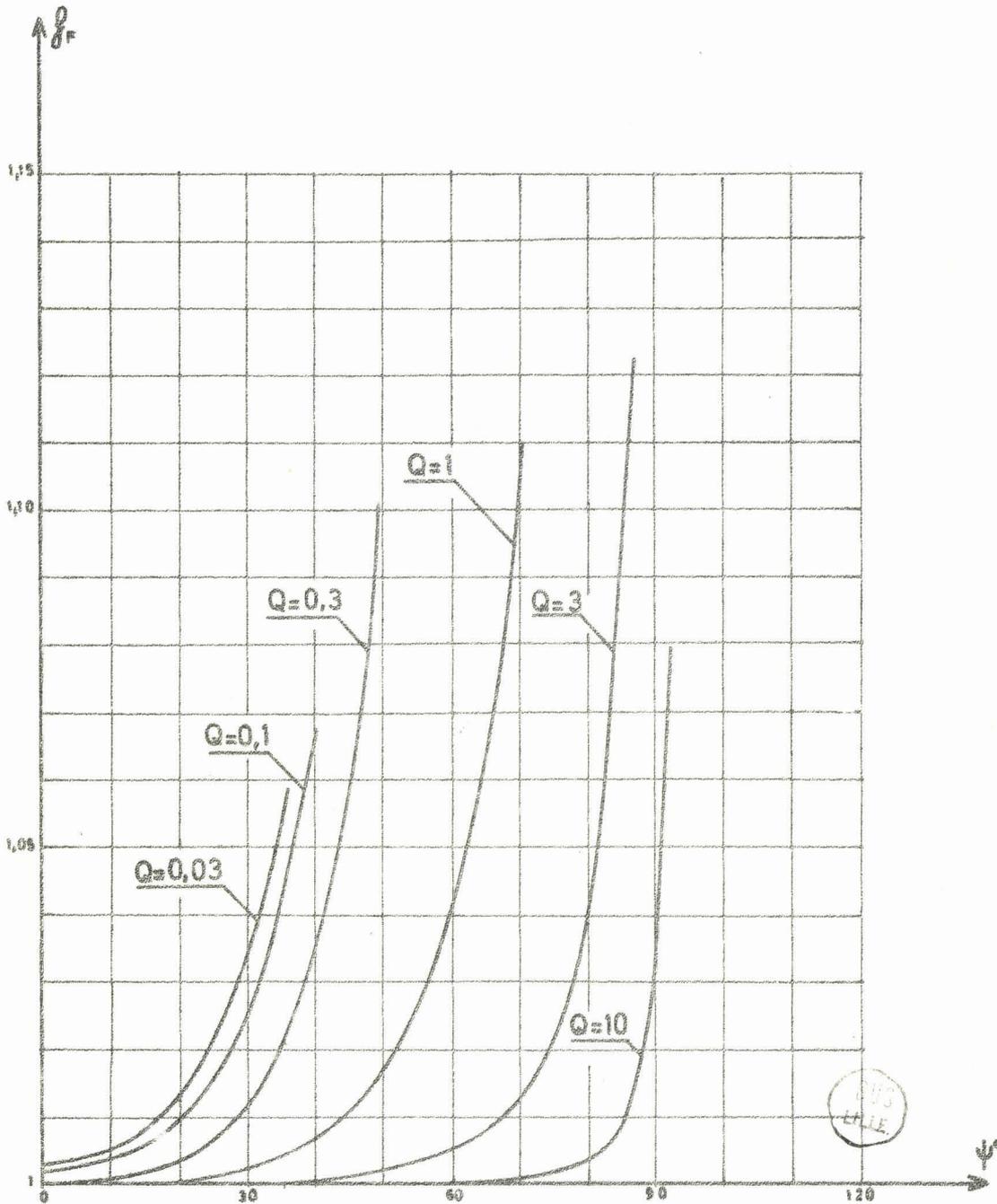


PLANCHE XII

P. D.3 mixte

Débit sur récepteur R.L.E

$Q \neq 0$ $m=1$

Facteur de forme f_r du courant redressé

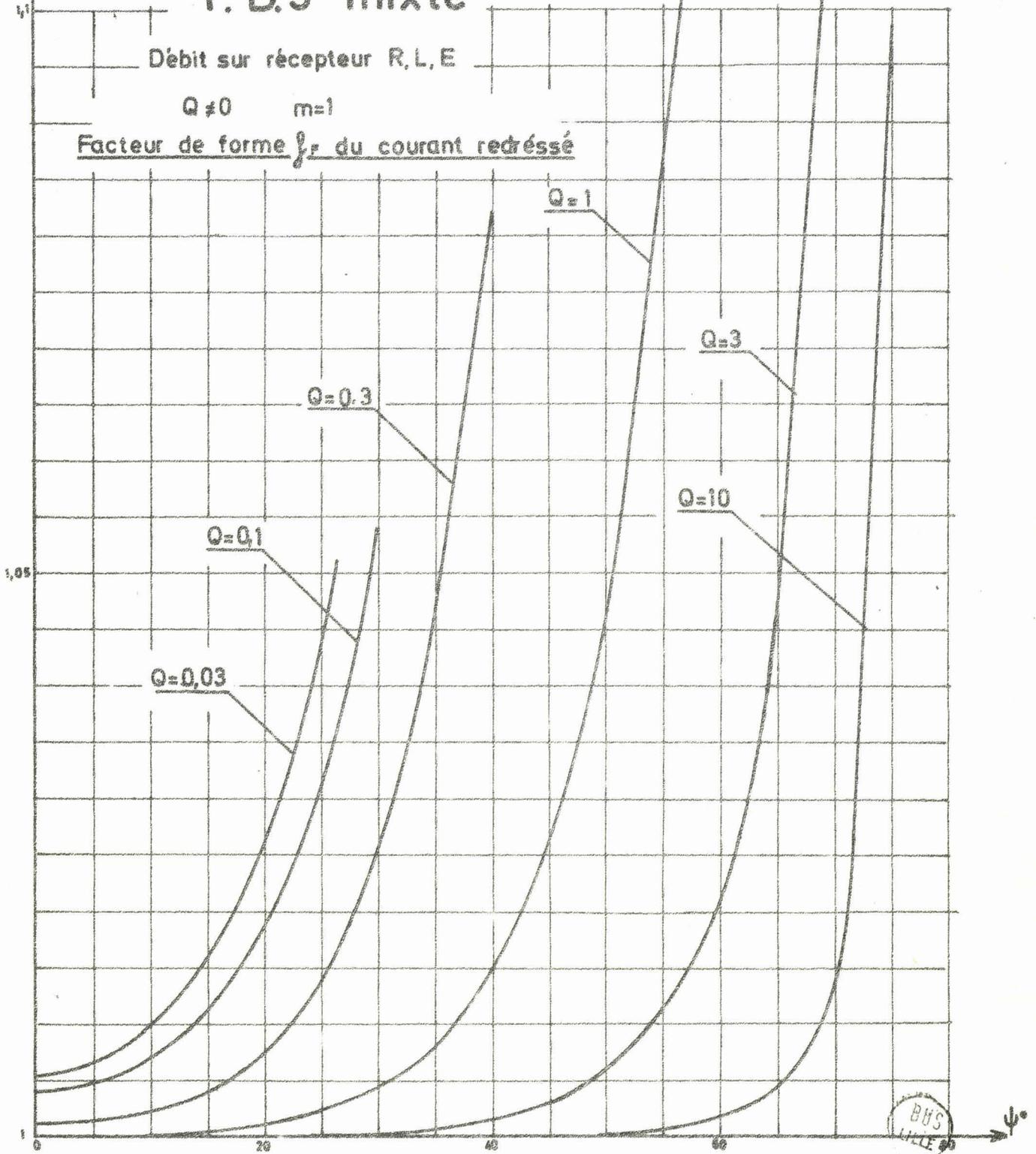


PLANCHE XIII

P. D. 3 mixte

Débit sur récepteur R, L, E

$Q \neq 0$ $m=1,25$

Facteur de forme } du courant redressé

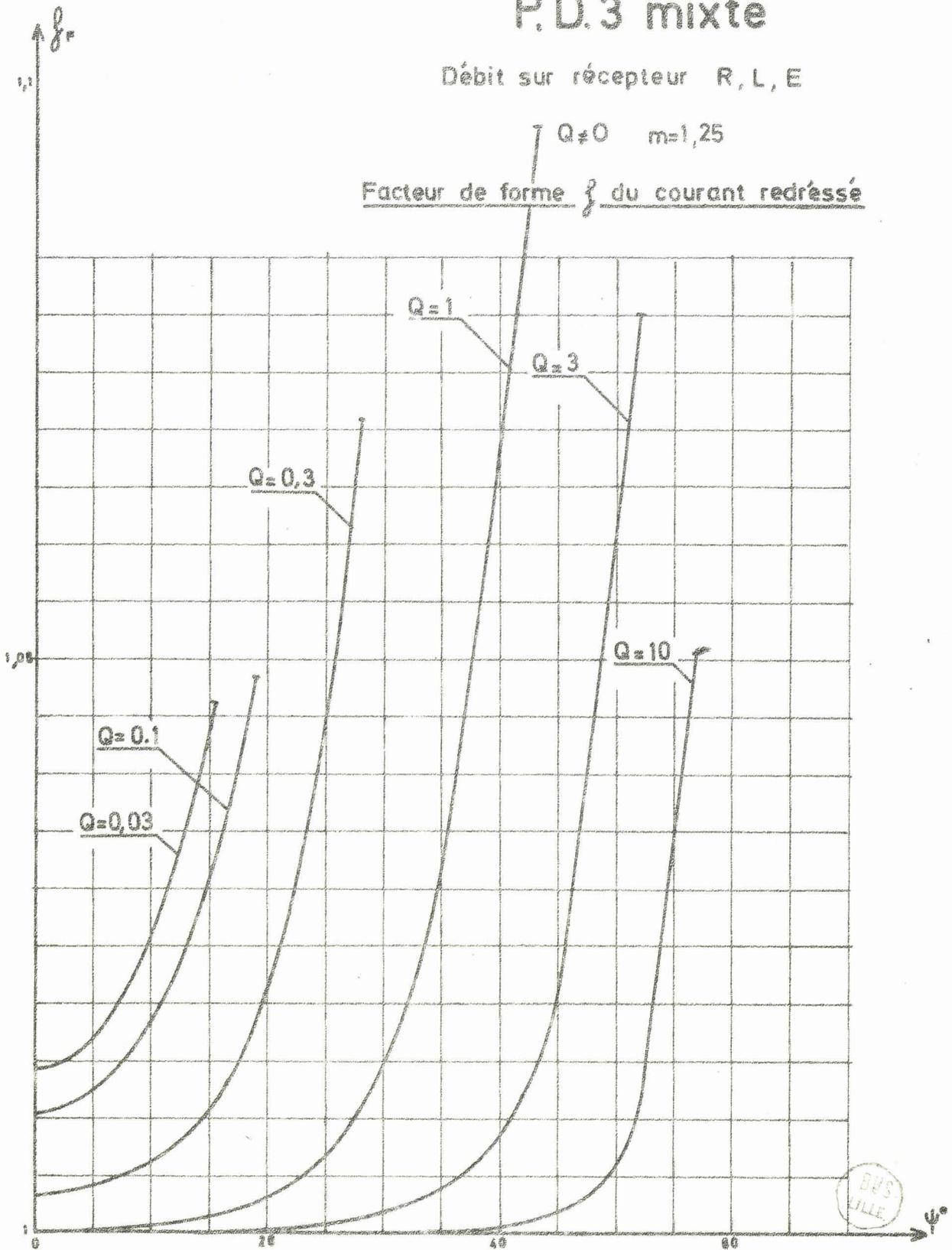


PLANCHE XIV

P. D.3 mixte

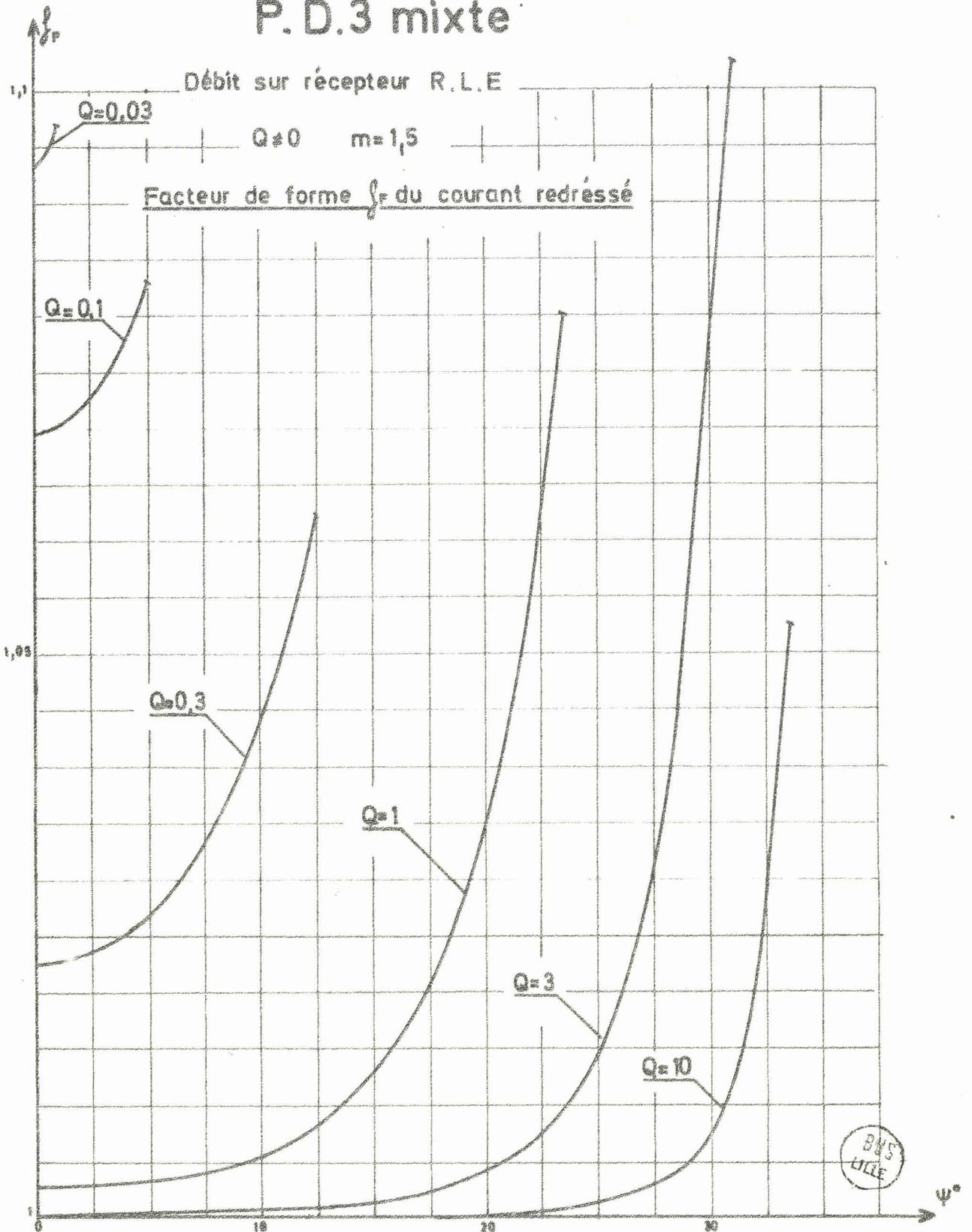


PLANCHE XV

P D 3 mixte

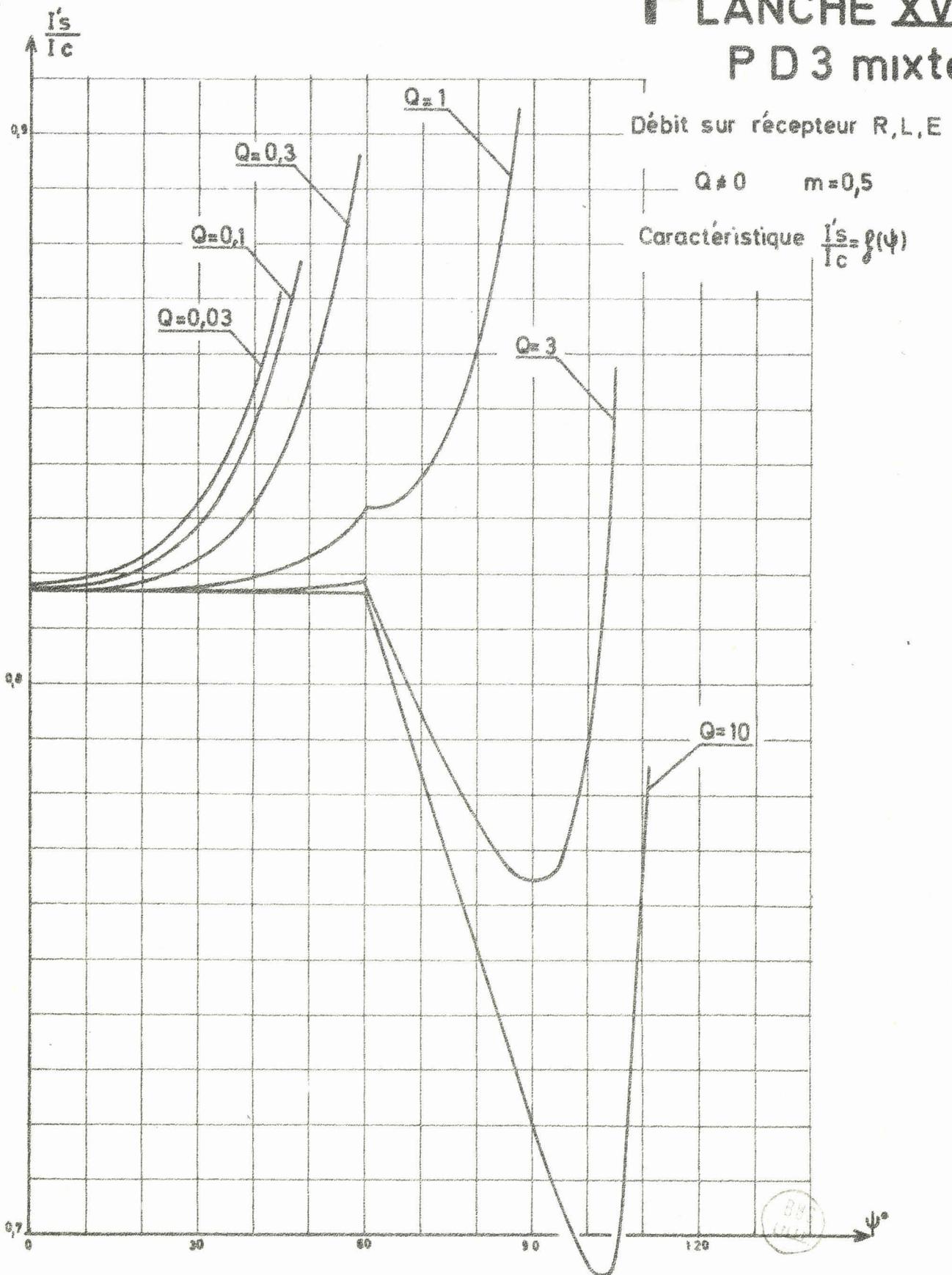


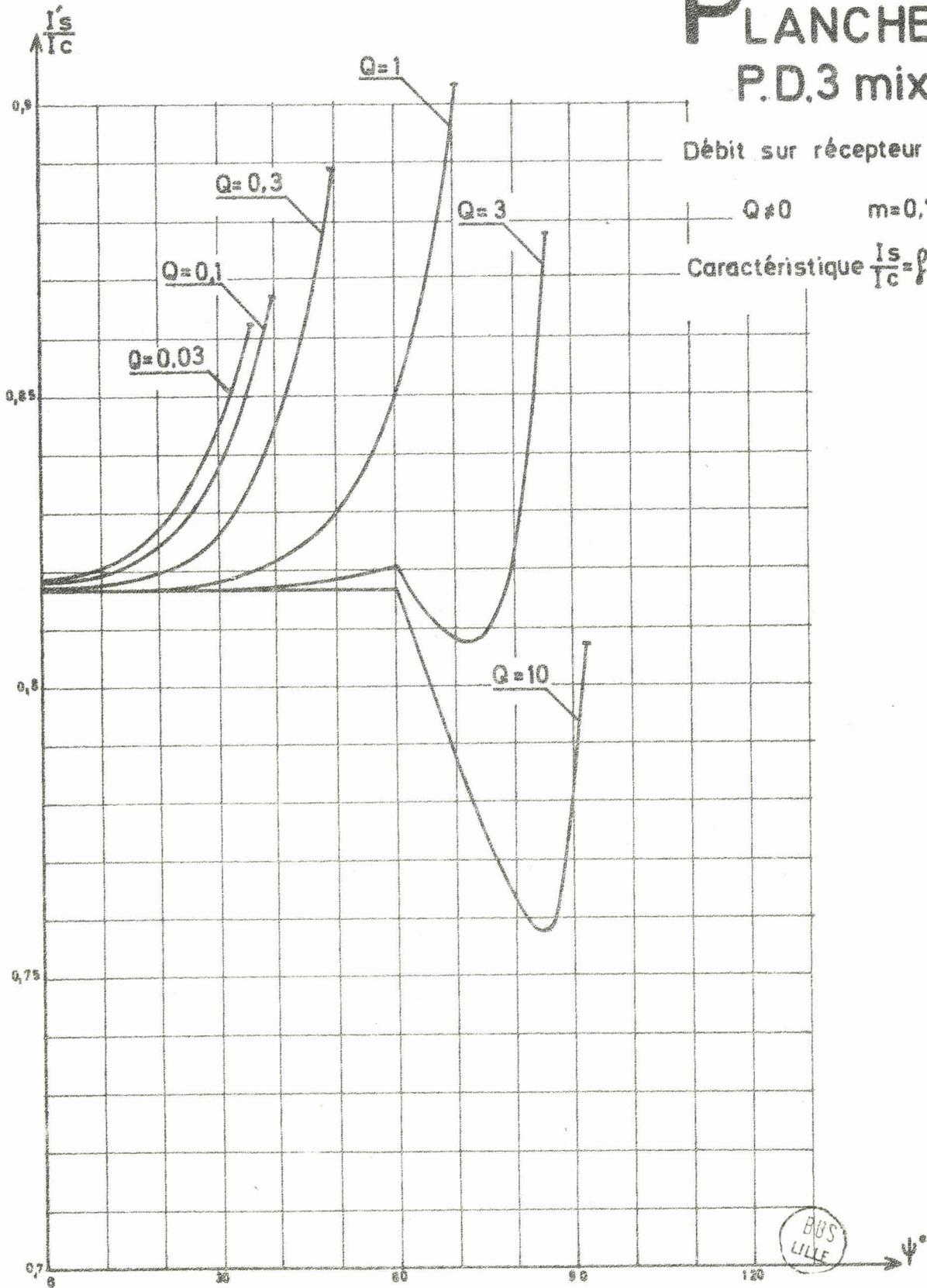
PLANCHE XVI

P.D.3 mixte

Débit sur récepteur R,L,E

$Q \neq 0$ $m=0,75$

Caractéristique $\frac{I_s}{I_c} = f(\psi)$



BUS
LILLE

PLANCHE XVII

P.D.3 mixte

Débit sur récepteur R.L.E

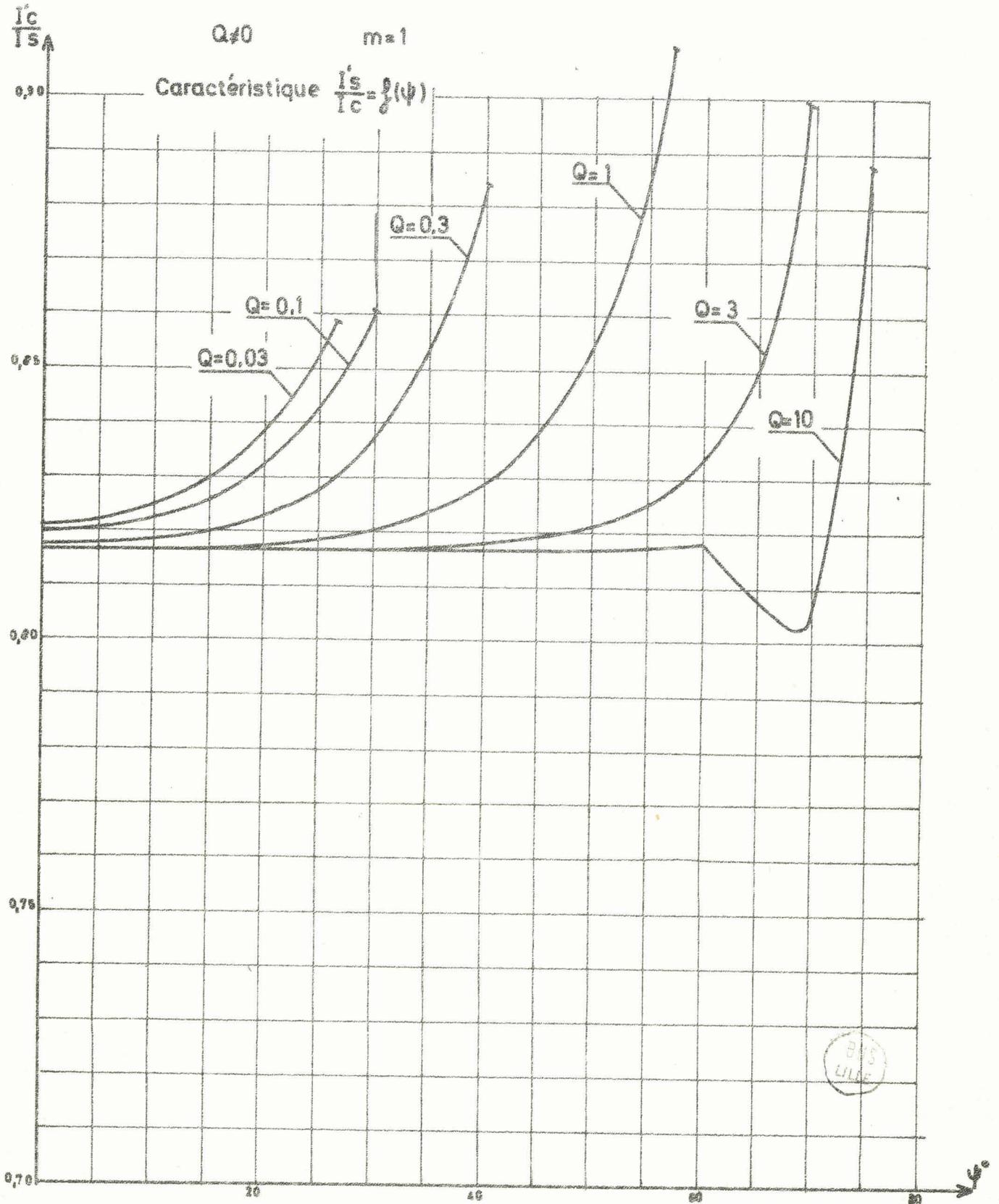


PLANCHE XVIII

P.D.3 mixte

Débit sur récepteur R, L, E

$Q \neq 0$ $m = 1,25$

Caractéristique $\frac{I_s'}{I_c} f(\psi)$

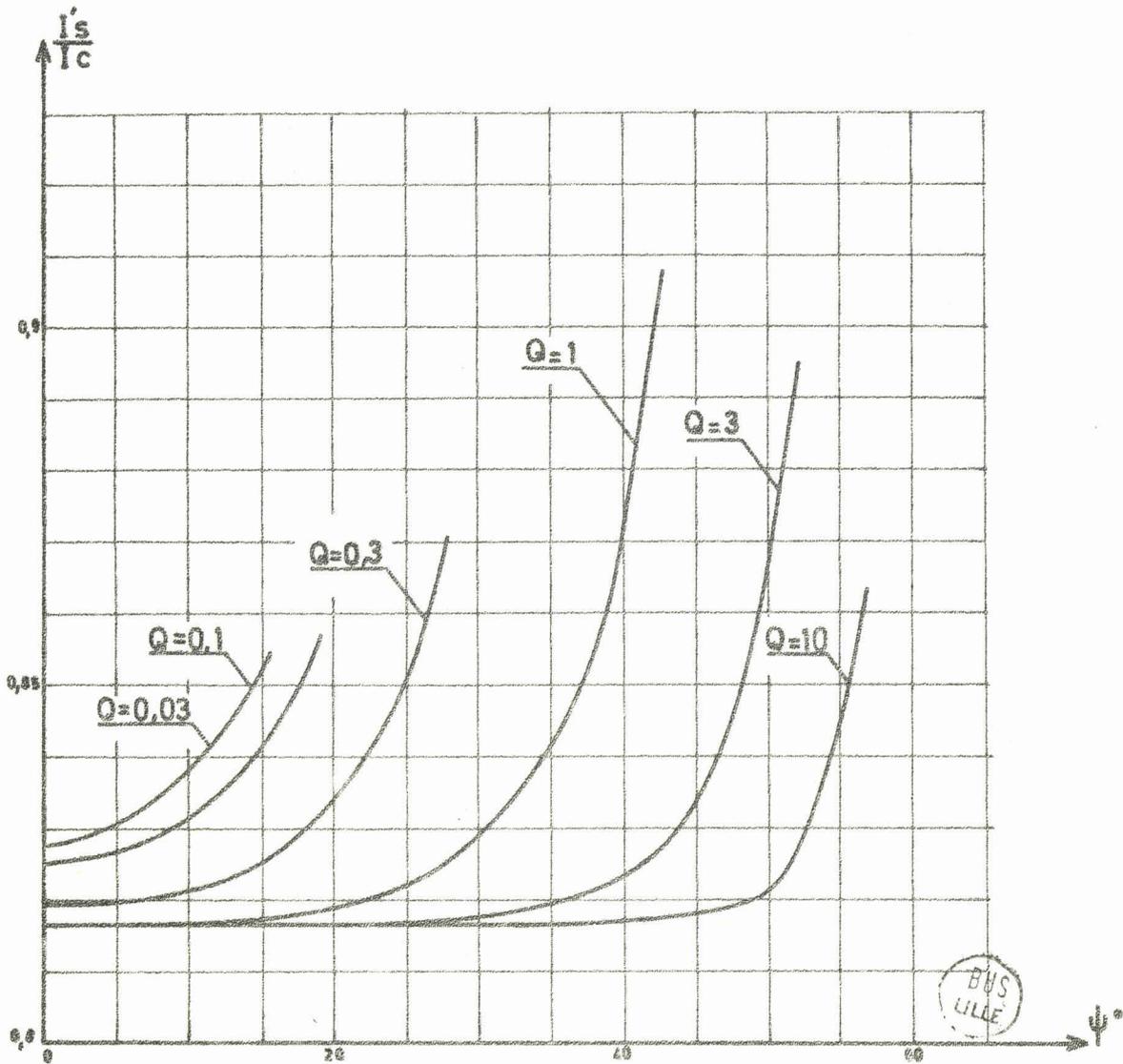


PLANCHE XIX

P.D.3 mixte

Débit sur récepteur R.L.E

$Q \neq 0$ $m=1,5$

Caractéristique $\frac{I'_s}{I_c} = f(\psi)$

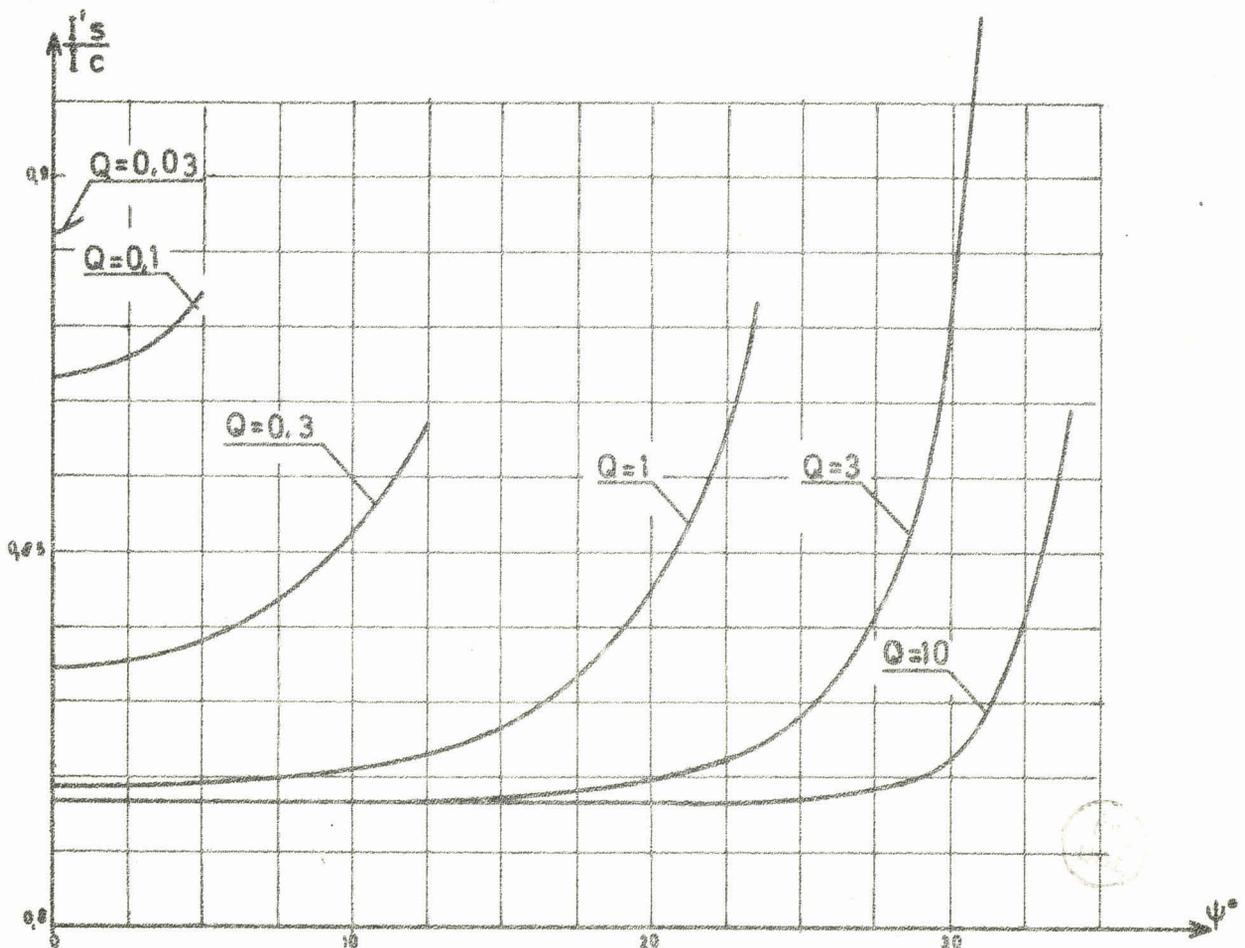


PLANCHE XX

P.D.3 mixte

Débit sur récepteur R,L,E

$Q \neq 0$ $m=0,5$

Facteur de puissance secondaire f_s

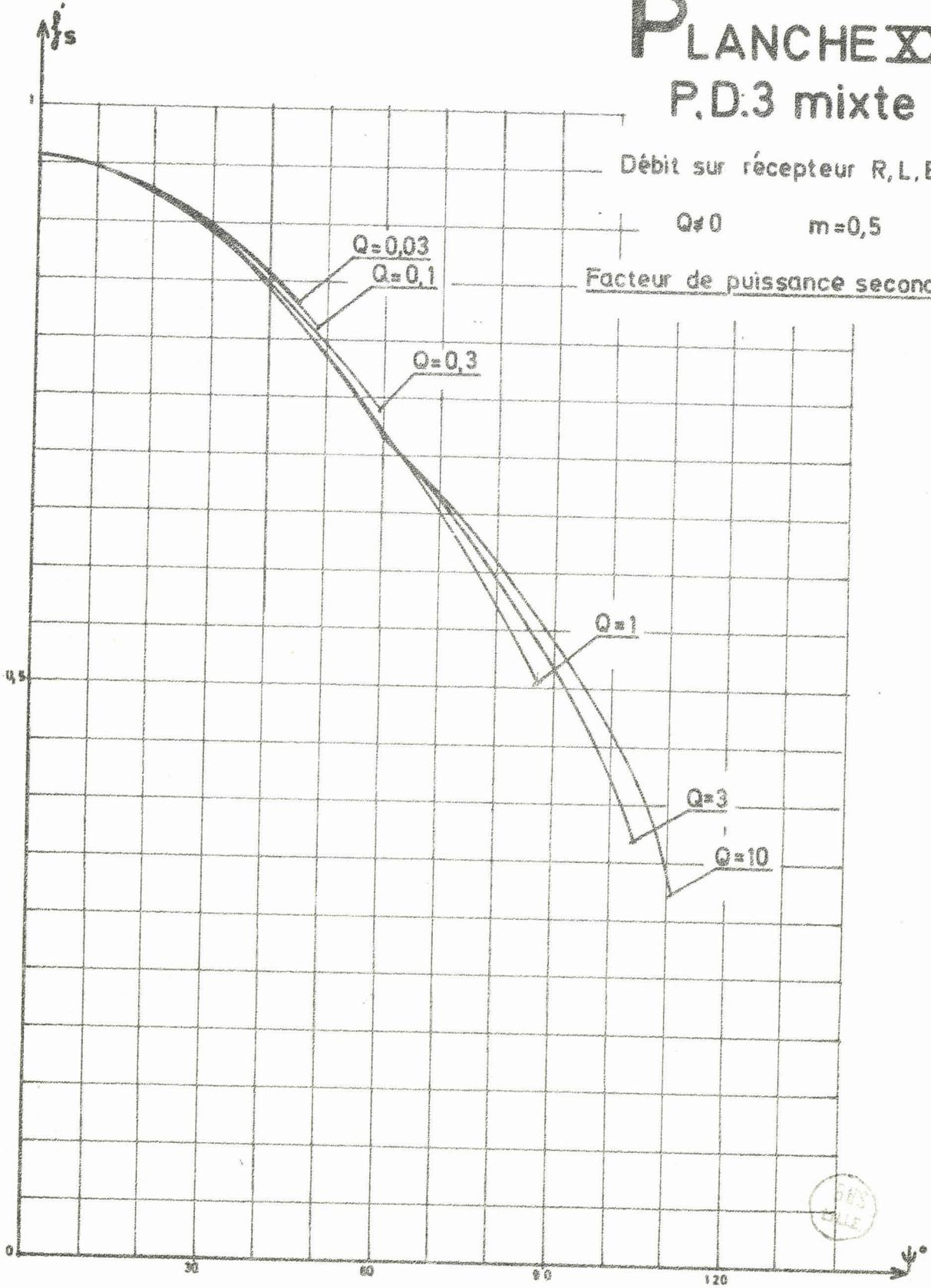


PLANCHE XXI

P D 3 mixte

Débit sur récepteur R, L, E

$Q \neq 0$ $m=0,75$

Facteur de puissance secondaire f'_s

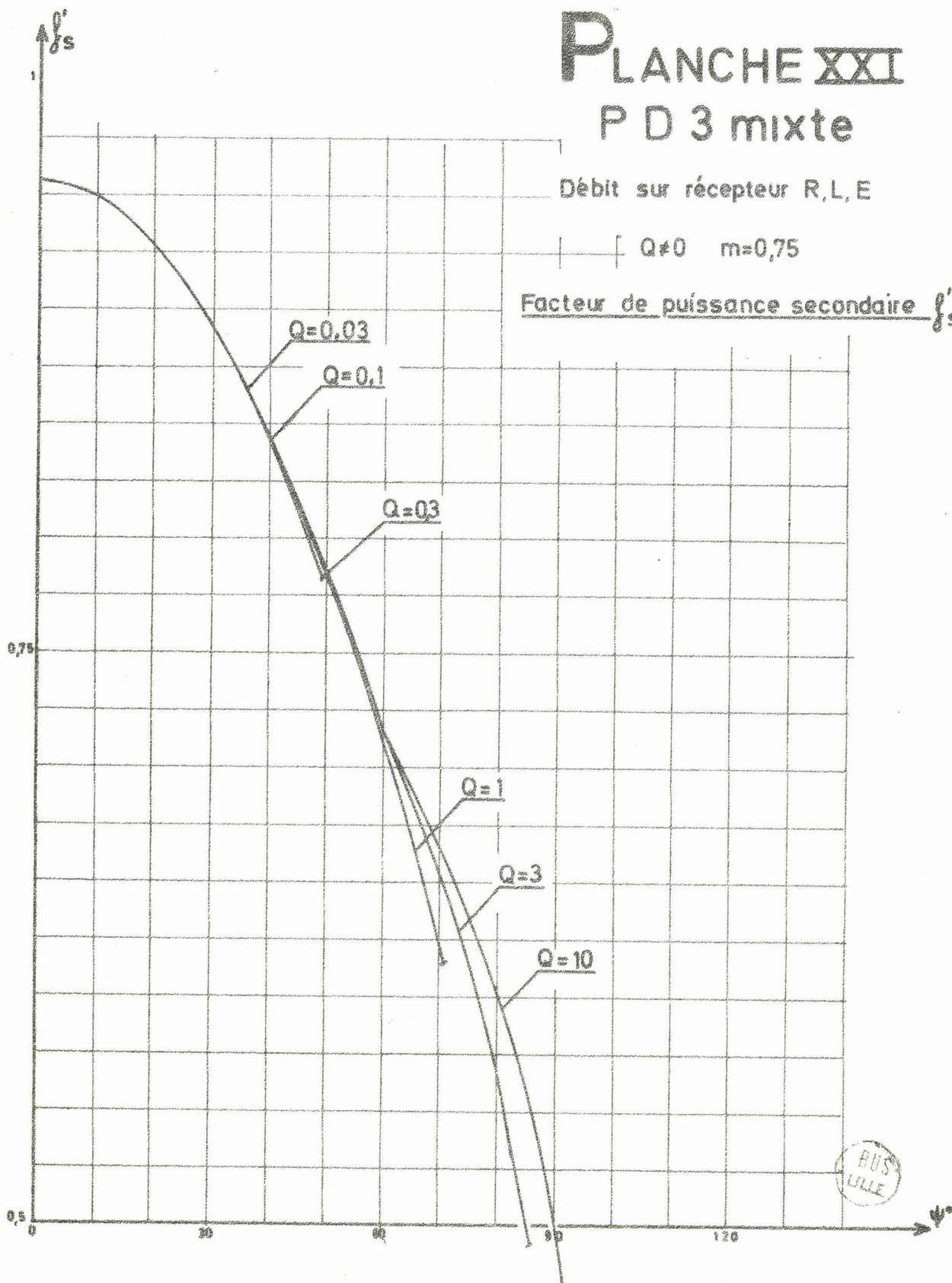


PLANCHE XXII

P.D.3 mixte

Débit sur récepteur R,L,E

$Q \neq 0$ $m=1$

Facteur de puissance secondaire f_s

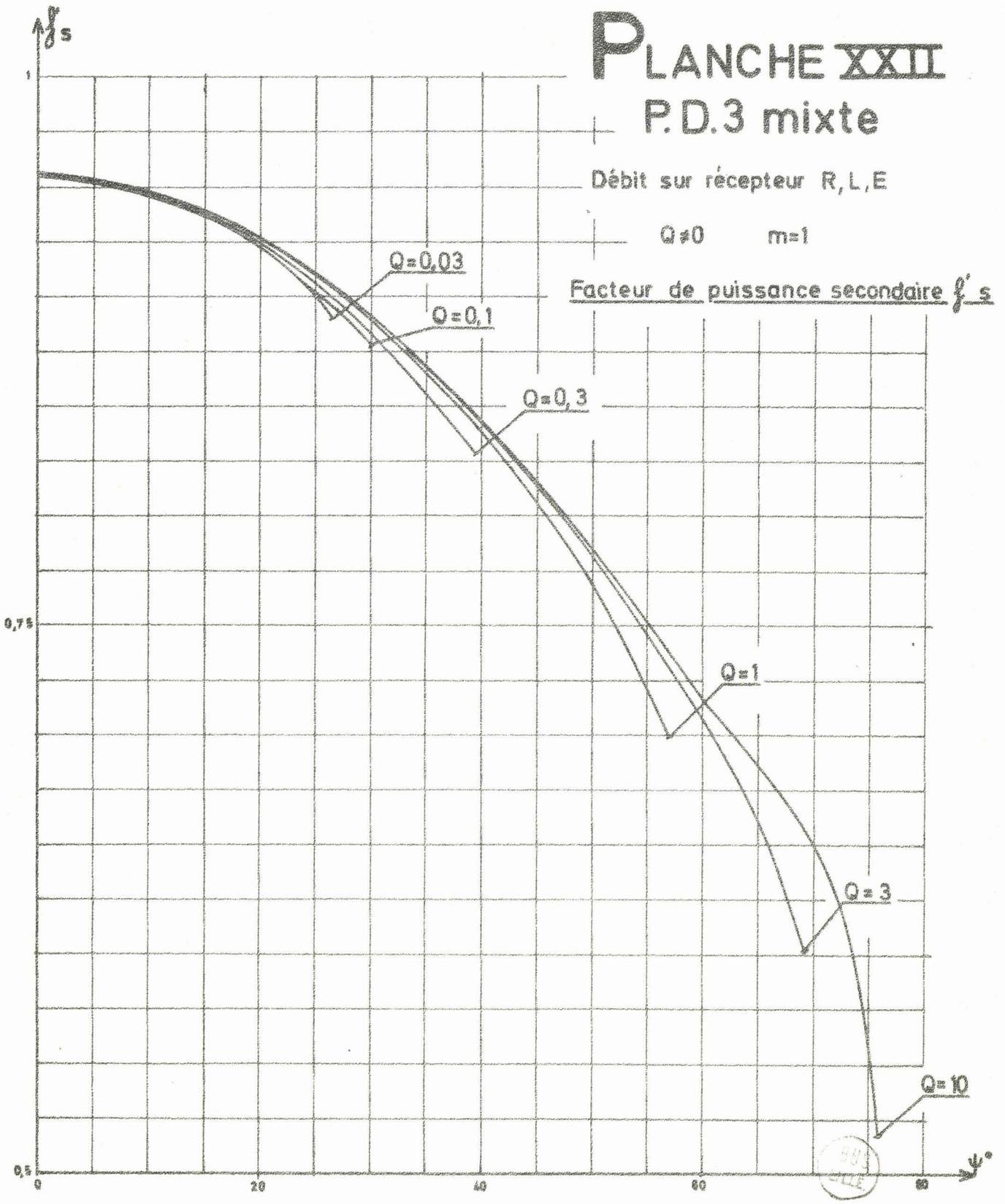


PLANCHE XXIII

PD 3 mixte

Debit sur recepteur R.L.E

0,40 m=1,25

Facteur de puissance secondaire f_s

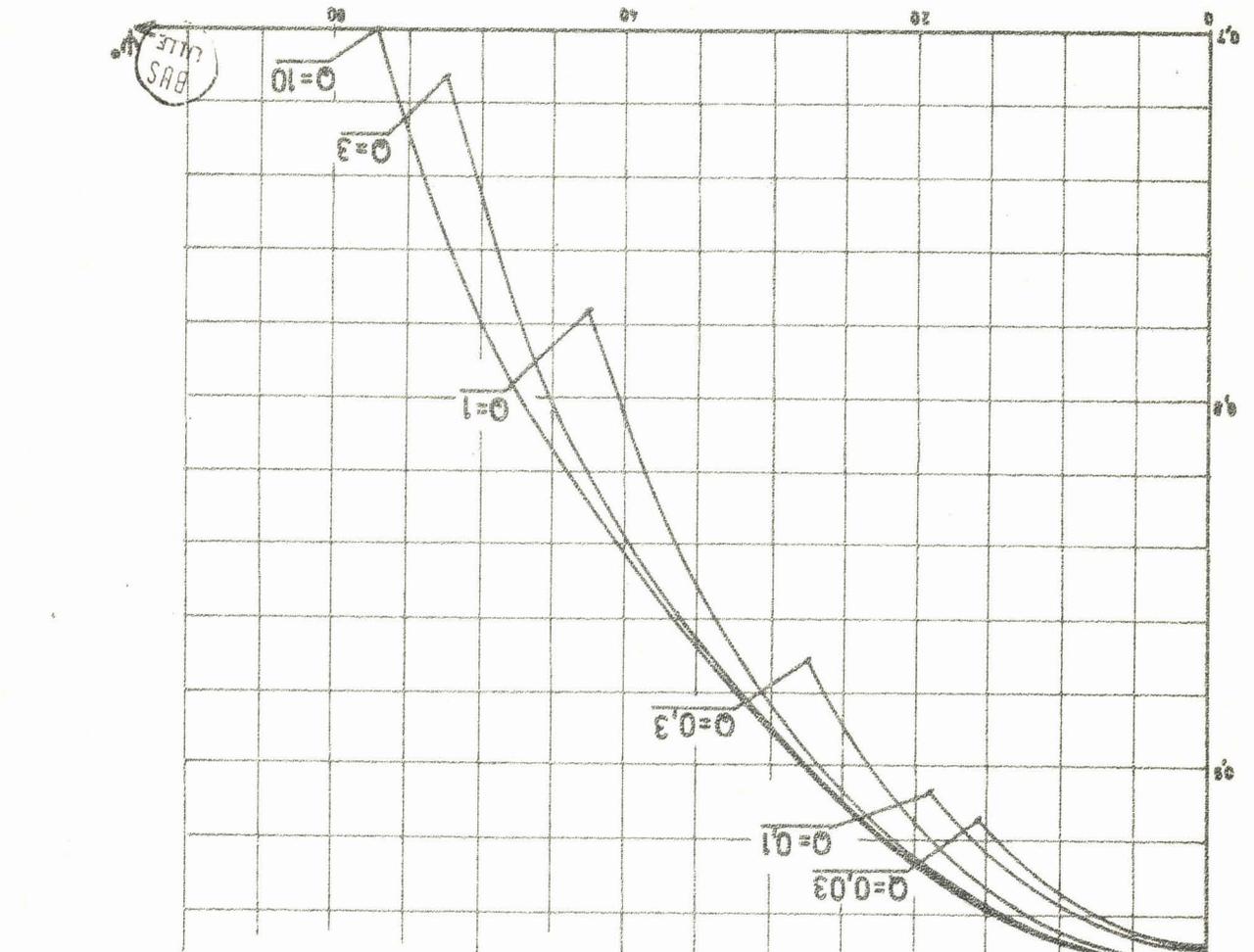


PLANCHE XXIII

PD 3 mixte

Débit sur récepteur R,L,E

$Q \neq 0$ $m = 1,25$

Facteur de puissance secondaire f_s

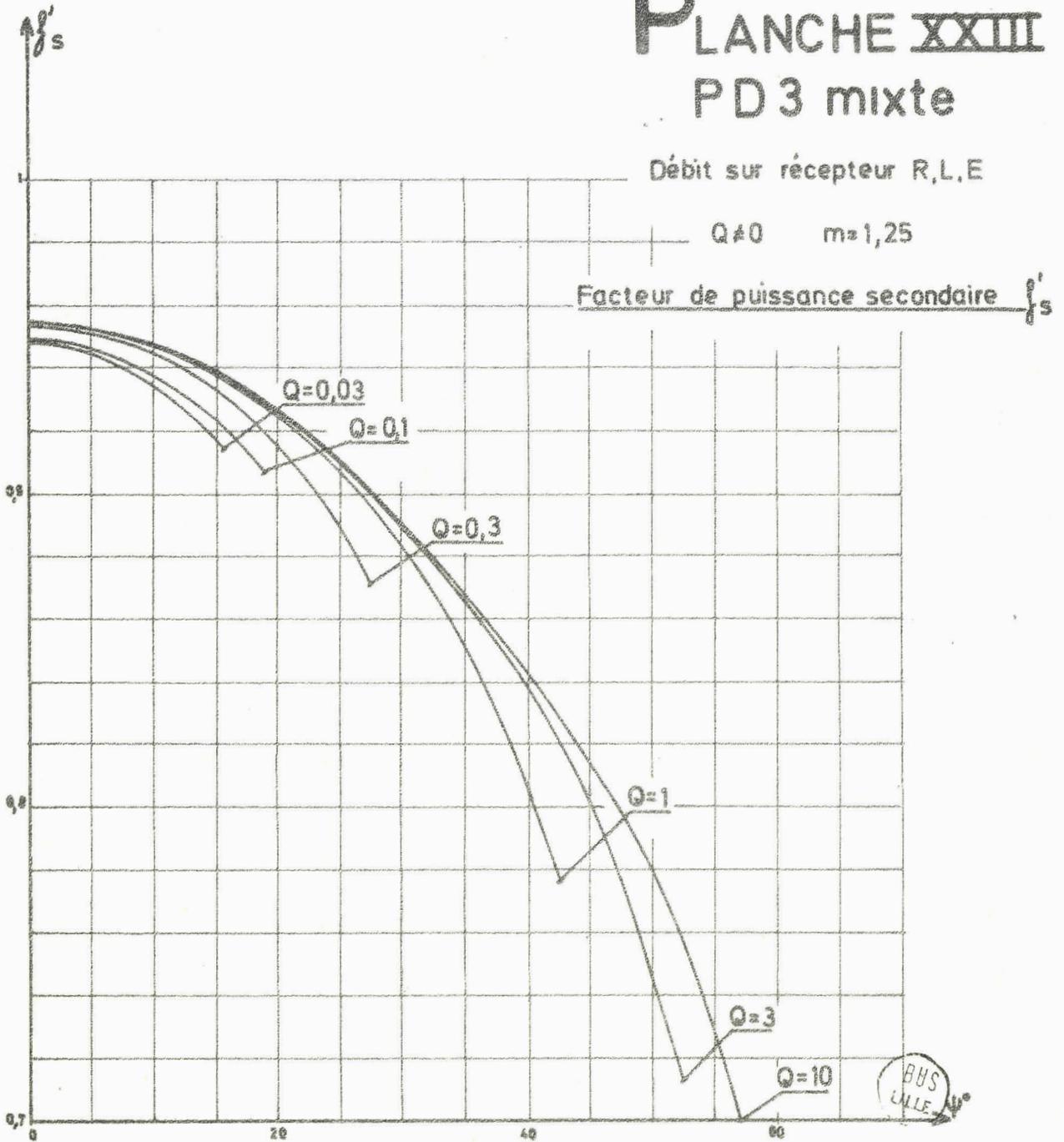


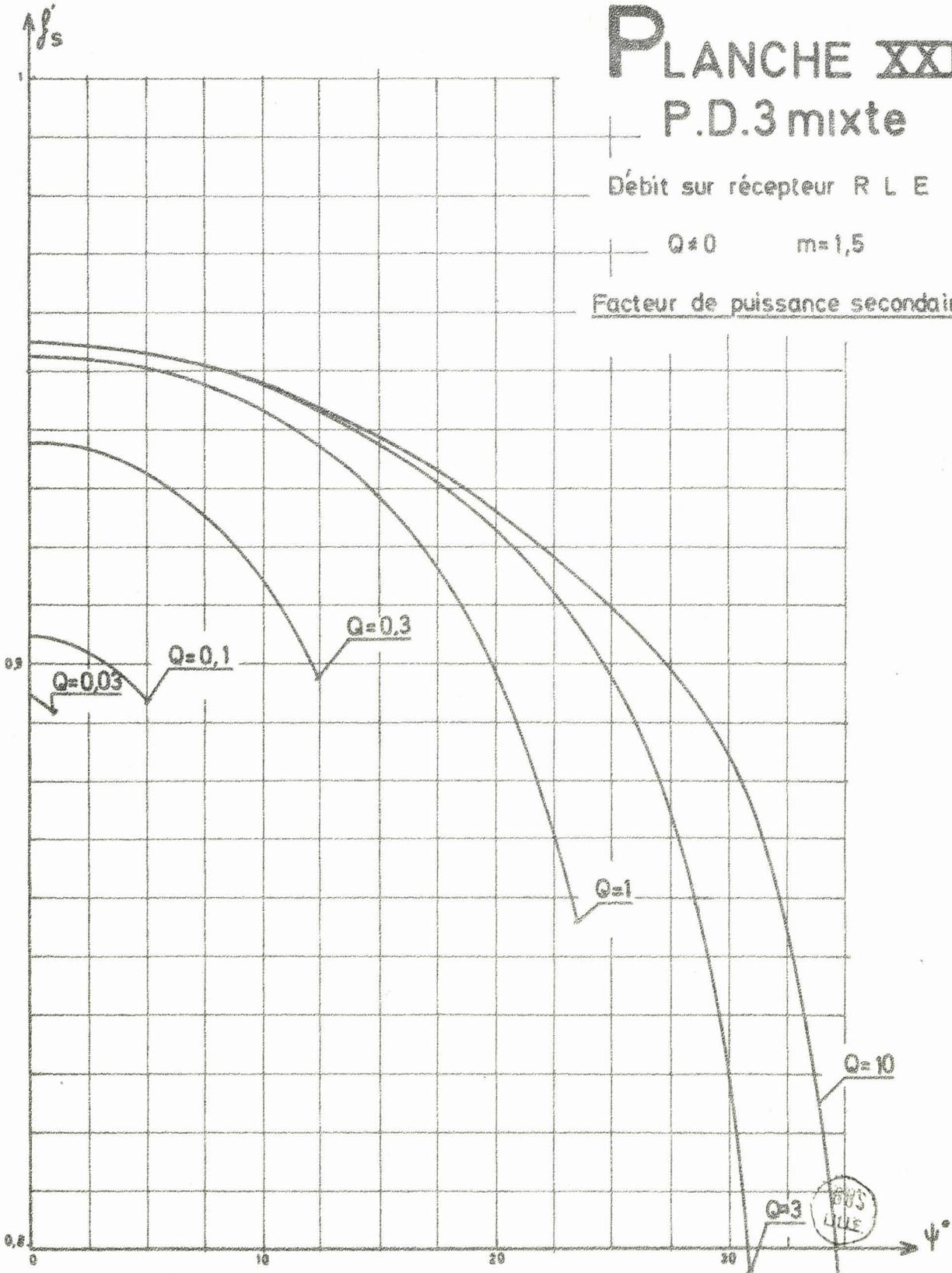
PLANCHE XXIV

P.D.3 mixte

Débit sur récepteur R L E

$Q \neq 0$ $m=1,5$

Facteur de puissance secondaire f'_s



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

- (1) H. GIROZ Commutatrices et redresseurs.
Librairie A. Colin, 1932.
- (2) M. DEMONTVIGNIER Méthode générale de calcul des redresseurs à
vapeur de mercure.
Revue Générale de l'Electricité, t. 15, n° 12,
22 Mars 1924, p. 493 - 499.
- (3) " Quelques propriétés des redresseurs à vapeur de
mercure.
Revue Générale de l'Electricité t. 16, n° 13,
27 Septembre 1924, p. 506 - 517.
- (4) " Théorie des redresseurs à commutation retardée.
Revue Générale de l'Electricité, t. 32, n° 19,
12 Novembre 1932, p. 625 - 635, et n° 20,
19 Novembre 1932, p. 659 - 667.
- (5) " Essai d'une théorie de l'ionisation résiduelle dans
l'arc à mercure. Conséquences pratiques sur le fonc-
tionnement des redresseurs.
Revue Générale de l'Electricité, t. 50, n° 4,
Octobre 1941, p. 239 - 255.
- (6) " La consommation de puissance réactive par le
circuit continu dans les redresseurs et les
onduleurs.
Revue Générale de l'Electricité, t. 60, n° 12,
Décembre 1951, p. 509 - 516.
- (7) " Le filtrage des courants de redresseurs - onduleurs
par inductance pure.
Revue Générale de l'Electricité, t. 73, n° 6
- (8) " Calcul de la charge critique d'un système de
bobines médiatrices dans un montage redresseur -
onduleur.
Revue Générale de l'Electricité, t. 73, n° 10,
Octobre 1964, p. 489 - 500.
- (9) " Limitation des courants transitoires de court-
circuit franc continu dans un redresseur à semi-
conducteurs en couplage Graetz.
Bulletin de la Société Française des Electriciens,
8° série, t. 2, n° 14, Février 1961, p. 106 - 119.
- (10) G. KOUSKOFF Fonctionnement des soupapes ioniques
Revue Générale de l'Electricité, t. 57, n° 3
Mars 1948, p. 105 - 113, et t. 57, n° 4, Avril
Avril 1948, p. 162 - 172 et t. 57, n° 5,
Mai 1948, p. 204 - 215.
- (11) G. SEGUIER Les montages redresseurs à commutation série.
Revue Générale de l'Electricité, t. 73, n° 12,
Décembre 1964, p. 615 - 631.

- (12) Etude de montages redresseurs en vue d'applications électrotechniques (1ère partie)
Thèse de doctorat, n° 173, Lille, Juin 1968
- (13) Comparaison générale des montages redresseurs. Application aux montages alimentés par un réseau triphasé
Revue générale de l'électricité t. 76, n° 12, Décembre 1967, p. 1471 - 1486.
- (14) Les montages redresseurs (étude générale)
Dunod éditeur, 1970.
- (15) M. P. VANDEPLANQUE Modification de la caractéristique de tension d'un montage redresseur. Applications.
Thèse de Docteur - Ingénieur, n° 91, Lille, Mai 1969.
- (16) J. LESENNE Multiplication de fréquence par un montage redresseur fonctionnant en commutation retardée. Thèse de Docteur - Ingénieur n° 93, Lille, 1969.
- (17) M. LECORGUILLIER Les redresseurs en simple alternance.
Eyrolles Editeur, 1953.

T A B L E D E S M A T I E R E S

<i>Avant-Propos</i>	p. 1
<i>0. Introduction</i>	p. 3
0.1. <i>Les trois modes de commutation</i>	p. 4
0.1.1. <i>Montages à commutation parallèle</i>	p. 5
0.1.2. <i>Montages à commutation parallèle double</i>	p. 6
0.1.3. <i>Montages à commutation série</i>	p. 6
0.2. <i>Voie adoptée pour l'étude générale</i>	p. 9
0.3. <i>Résultats trouvés pour les montages à diodes</i>	p. 12
0.4. <i>Résultats trouvés pour les montages à thyristors</i>	p. 15
0.4.1. <i>Montages tout thyristors</i>	p. 15
0.4.2. <i>Montages mixtes</i>	p. 18
0.5. <i>Signification de l'hypothèse du courant redressé constant</i>	p. 22
0.5.1. <i>La continuité de la conduction</i>	p. 22
0.5.2. <i>L'unicité de la caractéristique $U_c (I_c)$</i>	p. 22
0.5.3. <i>Importance des corrections à effectuer</i>	p. 23
<i>I. Méthodes de correction permettant de tenir compte de la nature du récepteur</i>	p. 25
I.1. <i>Etude du fonctionnement et des tensions</i>	p. 26
I.1.1. <i>Conduction continue ou discontinue</i>	p. 26
I.1.2. <i>Fonctionnement en conduction continue</i>	p. 27
I.1.3. <i>Fonctionnement en conduction discontinue</i>	p. 28
I.2. <i>Etude des courants</i>	p. 30
I.2.1. <i>Courant redressé i_c</i>	p. 30
I.2.1.1. <i>Expression et forme d'onde</i>	p. 30
I.2.1.2. <i>Valeurs moyenne et efficace</i>	p. 31
I.2.1.3. <i>Courant aux commutations</i>	p. 34
I.2.2. <i>Courant dans les redresseurs</i>	p. 34
I.2.3. <i>Courant dans les enroulements secondaires</i>	p. 35

I.2.4. Courant primaire et en ligne	p. 36
I.2.4.1. Circuit magnétique monophasé	p. 36
I.2.4.2. Circuit magnétique triphasé	p. 37
I.2.4.3. Intérêt des relations établies, vérifications	p. 44
a) Débit d'un montage P.2. sur un récepteur R.E.	p. 45
b) Débit d'un montage P.D.3 mixte sur un récepteur résistant	p. 47
I.3. Etude des chutes de tension	p. 50
I.3.1. Chute de tension inductive $\Delta_1 U'_c$	p. 50
I.3.1.1. Montages à commutation parallèle	p. 50
a) cas de la conduction discontinue	p. 50
b) cas de la conduction continue	p. 51
I.3.1.2. Montages à commutation parallèle double	p. 53
I.3.1.3. Montages à commutation série	p. 54
a) Nombre de phases pair	p. 54
b) Nombre de phases impair	p. 56
I.3.1.4. Interprétation des résultats	p. 59
I.3.1.5. Montages mixtes à commutation parallèle double	p. 60
I.3.1.6. Montages mixtes à commutation série	p. 62
I.3.1.7. Remarques sur les relations donnant $\Delta_1 U'_c$ et leur utilisation	p. 63
I.3.2. Chute de tension ohmique $\Delta_2 U'_c$	p. 67
I.3.3. Chute de tension due aux redresseurs $\Delta_3 U'_c$	p. 68
I.3.4. Vérifications expérimentales	p. 69
I.4. Bilan de l'étude des procédés de correction	p. 72
II. Caractéristiques du montage redresseur mixte en pont triphasé	p. 73
II.1. Plan de l'étude	p. 73
II.2. Etude du montage P.D.3 débitant sur un récepteur infiniment inductif	p. 77
II.2.1. Etude des tensions	p. 77
II.2.1.1. Etude de la tension redressée	p. 78
Etude de la forme d'onde de la tension redressée	p. 78
Valeur moyenne de la tension redressée	p. 80
Taux d'ondulation de la tension redressée	p. 81

II.2.1.2. Etude de la tension inverse aux bornes des redresseurs et des diodes	p. 81
Tension inverse aux bornes des diodes	p. 81
Tension inverse aux bornes des redresseurs	p. 81
II.2.2. Etude des courants	p. 83
II.2.2.1. Etude du courant redressé	p. 83
II.2.2.2. Etude du courant dans les redresseurs	p. 84
Relations générales applicables quel que soit ψ et quel que soit le récepteur	p. 84
Cas du débit sur self infinie	p. 84
II.2.2.3. Etude du courant et de la puissance au second- aire du transformateur.	p. 85
Relations générales applicables, quel que soit le récepteur, pour ψ inférieur à 60°	p. 85
Application au débit sur self infinie, pour ψ inférieur à 60°	p. 85
Etude du courant et de la puissance secondaire pour $60^\circ < \psi < 180^\circ$	p. 86
II.3. Etude du montage P.D.3 débitant sur un récepteur purement résistant	p. 88
II.3.1. Etude du fonctionnement du montage. Tensions	p. 88
II.3.2. Etude des courants	p. 88
II.3.2.1. Etude du courant redressé	p. 88
Valeur moyenne du courant redressé	p. 89
Valeur efficace du courant redressé	p. 89
Facteur de forme du courant redressé	p. 90
II.3.2.2. Etude du courant lors des commutations	p. 90
II.3.2.3. Etude du courant et de la puissance du secondaire	p. 91
Remarques préliminaires	p. 91
Courant au secondaire	p. 91
Facteur de puissance secondaire	p. 92
II.4. Etude du montage P.D.3. débitant sur un récepteur résistants et inductif	p. 93
II.4.1. Etude du fonctionnement du montage. Tensions.	p. 93

II.4.2. Etude des courants	p. 95
II.4.2.1. Etude du courant redressé	p. 95
Valeur moyenne du courant redressé	p. 95
Etude de la valeur instantanée du courant redressé	p. 95
Cas où $0^\circ < \psi < 60^\circ$	p. 95
Cas où $60^\circ < \psi < 180^\circ$	p. 97
Etude de l'ondulation du courant redressé	p. 99
Valeur efficace et facteur de forme du courant redressé	p. 100
Cas où $0^\circ < \psi < 60^\circ$	p. 100
Cas où $60^\circ < \psi < 180^\circ$	p. 101
II.4.2.2. Etude du courant lors des commutations	p. 102
II.4.2.3. Etude du courant et de la puissance au secondaire	p. 103
Etude du courant au secondaire	p. 103
Facteur de puissance au secondaire	p. 104
II.5. Etude du montage P.D.3 débitant sur un récepteur résistant et inductif et présentant une f.c.e.m.	p. 105
II.5.1. Justification de l'étude de la conduction continue	p. 105
II.5.2. Etude des tensions	p. 108
II.5.3. Etude des courants	p. 108
II.5.3.1. Etude du courant redressé	p. 108
valeur moyenne du courant redressé	p. 108
Etude de la valeur instantanée du courant redressé	p. 109
Cas où $0^\circ < \psi < 60^\circ$	p. 109
Cas où $60^\circ < \psi < 180^\circ$	p. 110
Caractéristiques limites de conduction continue	p. 111
Caractéristiques limites de conduction continue	p. 111
Etude de l'ondulation du courant redressé	p. 112
Valeur efficace et facteur de forme du courant redressé	p. 112
Cas où $0^\circ < \psi < 60^\circ$	p. 113
Cas où $60^\circ < \psi < 180^\circ$	p. 114

II.5.3.2. Etude du courant lors des commutations	p. 115
II.5.3.3. Etude du courant et de la puissance au secondaire	p. 115
Etude du courant au secondaire	p. 115
Etude de la puissance au secondaire	p. 117
II.5.4. Remarques	p. 118
III. Conclusions	p. 119
A. - Appendice	
Etude de la chute inductive $\Delta_1 U'_0$ du montage P.2 débitant sur une résistance pure.	p. 122
A.1. Introduction	p. 122
A.2. Détermination directe de la tension en charge	p. 122
A.2.1. Etablissement des relations donnant $\alpha(Q)$ et $v(Q)$ caractérisant l'empiétement	p. 123
A.2.2. Valeur des angles α et v	p. 125
A.2.3. Caractéristique "réelle" de tension	p. 126
A.3. Comparaison des trois caractéristiques	p. 127
A.3.1. Rappel de la caractéristique donnée par l'étude générale	p. 127
A.3.2. Tableau comparatif et conclusions	p. 128
A.4. Vérification expérimentale	p. 129
PLANCHES DE CARACTERISTIQUES	p. 131
Bibliographie	p. 156
Table de matières	p. 158

