

UNIVERSITE D'ALGER  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

4/71

DEPARTEMENT ELECTROTECHNIQUE

red

# THESE DE FIN D'ETUDES

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية  
المكنية  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHEQUE

ETUDE DE L'ENCLENCHEMENT  
D'UNE LIGNE A VIDE



Proposée par

A. GALLO

Etudiée par

K. RAMDANE

Promotion 1971

UNIVERSITE D'ALGER  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
DEPARTEMENT ELECTROTECHNIQUE

THESE DE FIN D'ETUDES

ETUDE  
DE L'ENCLENCHEMENT  
D'UNE LIGNE A VIDE

Proposée par

Mr. A. GALLO

Etudiée par

K. RAMDANE

PROMOTION : 71

TABLE DES MATIERES .

---

	<u>PAGES</u>
Introduction .....	1
Généralités .....	3
Etude théorique du régime transitoire .....	7
Annexe .....	16 bis
Théorie sur la ligne artificielle .....	17
Réalisation de la maquette de ligne .....	20
Courbes transitoires théoriques :	
à l'extrémité ouverte .....	23
AU milieu de la ligne .....	25
Circuit de commande d'enclenchement .....	29
Présentation des maquettes .....	36
Essais sur la ligne artificielle .....	40
Conclusion .....	43

Je dédie cette présente Etude à mes parents, à tous les membres de la famille RAMDANE et Alliés, grands et petits et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

En leur exprimant mon éternelle reconnaissance,

K.RAMDANE

Le 25 Juin 1971



## AVANT-PROPOS

Je tiens à remercier vivement tous mes professeurs et assistants pour la formation qu'ils m'ont donnée, les agents et techniciens de l'école pour l'aide précieuse qu'ils ont pu m'apporter au cours de la réalisation de ce projet.

Que Mrs. A.GALLO et M.KOURGLI trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude et reconnaissance pour les conseils et encouragements qu'ils n'ont cessé de me prodiguer durant l'élaboration de cette Etude.

K.RAMDANE

## INTRODUCTION .

La connaissance des surtensions de manoeuvre susceptibles d'apparaître dans les réseaux à très haute tension est un point fondamental dans l'étude de la coordination de l'isolement, et cela d'autant plus que la tension nominale des réseaux est plus élevée .

En effet, pour les réseaux à très haute tension, on est conduit à rechercher un facteur de surtension aussi réduit que possible, afin d'arriver à un dimensionnement des matériels, qui soit raisonnable tant du point de vue technique que du point de vue économique, et tel qu'il puisse subir sans dommage les contraintes dues aux surtensions .

### NATURE DES SURTENSIONS DE MANOEUVRE .

Tout changement de configuration dans un réseau électrique s'effectue par des manoeuvres, faisant passer celui-ci d'un état stable avant manoeuvre à un autre état stable après manoeuvre .

Ce passage d'état stable à état stable ne s'effectue jamais instantanément et se fait d'une façon continue . Cela est dû à certains phénomènes énergétiques, naissant à l'intérieur du réseau :

- Accumulation d'énergie à l'intérieur du champ électrique et du champ magnétique .
- Dissipation d'énergie électrostatique ou électromagnétique sous forme de chaleur ou de travail mécanique .
- transformation d'énergie électrostatique en énergie électromagnétique et vice-versa .

Ces phénomènes énergétiques se traduisent par un régime qui n'obéit pas aux lois régissant le fonctionnement en régime permanent ; c'est ce régime

là, qu'on appelle régime transitoire.

Le régime transitoire consécutif à ces manoeuvres, consiste en variations rapides des tensions et des courants (de natures aperiodiques ou oscillatoires). Les variations de tensions sont appelées : surtensions de manoeuvre ou surtensions internes (engendrées par le réseau).

Ces surtensions de manoeuvre sont d'origines diverses et parmi elles, l'enclenchement d'une ligne à vide qui est le but de notre étude.

#### PRESENTATION DE NOTRE PROBLEME.

Notre but est d'étudier l'établissement d'un régime permanent sur une ligne de transport d'énergie, c'est à dire d'étudier théoriquement et expérimentalement le régime transitoire résultant de la mise sous tension alternative sinusoïdale, d'une ligne à vide.

Dans cette étude, nous serons amenés à considérer un paramètre : l'instant de la période de l'onde sinusoïdale, auquel s'effectue la mise sous tension. En fonction du choix de ce paramètre, les régimes transitoires recueillis, à la sortie de la ligne, seront comparés.

Il est bien évident que se posera le problème de l'enclenchement de cette ligne au moment déterminé de la période : aussi faudra-t-il constituer un système de commande tel que l'on puisse choisir le moment de l'enclenchement.

De la même façon, nous fabriquerons une maquette de ligne, répondant aux exigences de notre expérience, à savoir que le régime transitoire doit pouvoir être observé par les oscillographes dont nous disposons, d'où un choix des éléments en fonction de ces considérations.

Nous nous bornerons à l'étude d'une ligne monophasée et nous choisirons des conditions, apportant dans nos calculs des simplifications notables.

## CHAPITRE 1 : GENERALITES .

---

Nous avons vu précédemment que l'enclenchement d'une ligne à vide donnait naissance à un régime transitoire. L'étude de ce régime se fait en intégrant les équations différentielles du système, compte tenu de l'état initial du réseau.

### 1-1 DIFFERENTES METHODES D'ETUDE DU REGIME TRANSITOIRE .

---

#### a) METHODE ALGEBRIQUE .

C'est la méthode classique d'intégration où se superposent le régime libre (correspondant à la solution générale de l'équation sans second membre) et le régime forcé (correspondant à la solution particulière de l'équation avec second membre). L'instant initial permet de déterminer les constantes d'intégration.

#### b) Méthode du calcul symbolique .

Signalons d'abord que cette méthode n'est applicable qu'aux circuits linéaires et dissipatifs, c'est à dire aux circuits dont la résistance, l'inductance propre, la mutuelle inductance, la capacité sont indépendantes du temps et du courant qui les traverse, et dont la résistance est positive. Le calcul symbolique, dû à Heaviside, est basé sur la transformation de LAPLACE ; il permet de passer d'un système à  $n$  variables à un autre système à  $(n-1)$  variables. Le principal avantage de cette méthode est que les équations symboliques s'appliquent directement au régime résultant et non séparément au régime libre et au régime forcé. De plus, les conditions initiales sont directement précisées et on évite ainsi le calcul des constantes d'intégration.



### c) METHODE DES ONDES MOBILES .

Sous certaines conditions, il est possible de décomposer un régime transitoire en deux systèmes d'ondes mobiles se propageant, en sens inverse, à la même vitesse absolue. En général, on applique cette méthode dans le cas de ligne infiniment longue, ou de ligne très longue vis à vis de la longueur de l'onde appliquée, car dans ce cas, on simplifie le calcul en négligeant le retour de l'onde réfléchie.

#### 1-2 APPLI CATION D'UNE METHODE D'ETUDE A NOTRE PROBLEME : JUSTIFICATION .

Généralement, la méthode algébrique est pénible et compliquée, aussi allons nous l'éviter.

De plus dans notre cas, la ligne sera courte devant la longueur de l'onde, aussi devons nous tenir compte, si nous employons la décomposition en ondes mobiles, des réflexions et des réfractions (s'il y en a) qui se produisent successivement aux extrémités et aux points singuliers de la ligne (dans notre cas il n'y a pas de points singuliers), tout en tenant compte de l'amortissement des ondes au cours de leur propagation : ce qui pourrait compliquer d'avantage le problème.

On va donc utiliser le calcul symbolique, lequel d'ailleurs présente de nombreux avantages.

#### 1-3 RAPPELS MATHÉMATIQUES SUR LA TRANSFORMATION DE LAPLACE .

La transformation de LAPLACE consiste à faire correspondre à une fonction  $f(t)$  de la variable  $t$ , une fonction  $F(p)$  de la variable  $p$ , telle que :

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-pt} dt \quad \text{avec } t \geq 0$$

Nous adopterons la terminologie et la représentation suivantes :

$$F(p) \subset f(t) \iff F(p) \text{ est l' image de } f(t) .$$

$$f(t) \supset F(p) \iff f(t) \text{ est l' original de } f(p) .$$

$t$  : variable réelle

$p$  : variable symbolique .

FONCTION ECHELON UNITE :  $U(t)$  .

$$U(t) = 0 \text{ pour } t < 0$$

$$U(t) = 1 \text{ pour } t \geq 0$$

$$U(t) \supset \frac{1}{p}$$

TRANSFORMEES DE QUELQUES FONCTIONS USUELLES .

Nous allons noter ici, les images des fonctions qui pourraient nous être utiles dans notre étude .

$f(t)$	$F(p)$
$A \cdot f(t)$	$A \cdot F(p)$
$A \cdot f(t) + B \cdot g(t)$	$A \cdot F(p) + B \cdot G(p)$

$e^{\alpha t} \cdot f(t)$	$F(p - \alpha)$
---------------------------	-----------------

$\frac{d f(t)}{dt}$	$p \cdot F(p) - f(0)$
---------------------	-----------------------

$\int_0^t f(t) dt$	$\frac{1}{p} \cdot F(p)$
--------------------	--------------------------

TRANSLATION OU CHANGEMENT D'ORIGINE DE LA VARIABLE REELLE .

$$e^{-Tp} \cdot F(p) \quad \square \quad f(t-T) \cdot U(t-T)$$

THEOREME DE LA VALEUR FINALE ET DE LA VALEUR INITIALE .

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot F(p)$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \lim_{p \rightarrow \infty} p \cdot F(p)$$

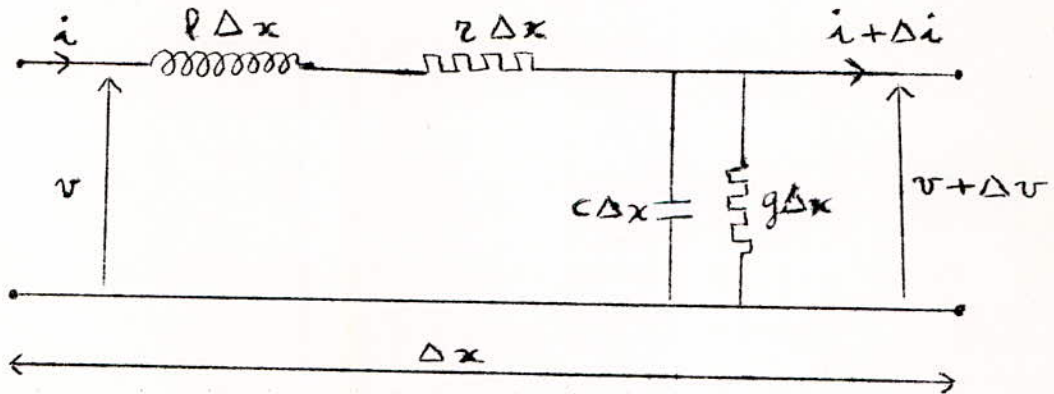
CHAPITRE 2 : ETUDE GENERALE DU REGIME TRANSITOIRE DU A

L' ENCLENCHEMENT D' UNE LIGNE A VIDE .

ETUDE REALISEE ENTRE U N CONDUCTEUR ET LE NEUTRE .

2-1 MISE EN EQUATION .

Considérons une ligne à constantes uniformément réparties et considérons un élément de cette ligne, de longueur  $\Delta x$  .



Cet élément peut être considéré comme un quadripôle dont les éléments qui le constituent sont :

$$r \Delta x, l \Delta x, c \Delta x, g \Delta x$$

ou  $r, l, g, c$  sont les constantes linéiques de la

ligne .

En régime variable , la tension et le courant sont des fonctions du temps et de la distance .

On a :

$$\Delta v = r \Delta x i + l \Delta x \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$\Delta i = g \Delta x (v + \Delta v) + c \Delta x \frac{\partial (v + \Delta v)}{\partial t}$$

Quand  $\Delta x \rightarrow 0$  , on aura :

$$\lim \left( \frac{\Delta v}{\Delta x} \right) = \frac{\partial v}{\partial x} = r i + l \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$\text{et } \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta i}{\Delta x} \right) = \frac{\partial i}{\partial x} = g v + c \frac{\partial v}{\partial t}$$

car  $\Delta x \rightarrow 0 \Rightarrow \Delta v \rightarrow 0$

Soit, les 2 équations fondamentales :

$$\frac{\partial v}{\partial x} = r i + l \frac{\partial i}{\partial t} \quad \text{et} \quad \frac{\partial i}{\partial x} = g v + c \frac{\partial v}{\partial t}$$

Ces équations sont intégrées aussi bien par les fonctions  $v(t, x)$  et  $i(t, x)$  qui représentent les caractéristiques du circuit en régime transitoire, que par les valeurs prises par ces fonctions à l'instant  $t=0$  (régime permanent avant la perturbation).

A l'instant  $t$ , on a :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v(t, x)}{\partial x} &= r i(t, x) + l \frac{\partial i(t, x)}{\partial t} \\ \frac{\partial i(t, x)}{\partial x} &= g v(t, x) + c \frac{\partial v(t, x)}{\partial t} \end{aligned} \right\} (1)$$

A l'instant  $t=0$ , on a :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v(0, x)}{\partial x} &= r i(0, x) + l \left[ \frac{\partial i(t, x)}{\partial t} \right]_{t=0} \\ \frac{\partial i(0, x)}{\partial x} &= g v(0, x) + c \left[ \frac{\partial v(t, x)}{\partial t} \right]_{t=0} \end{aligned} \right\} (2)$$

La ligne étant initialement au repos, donc :

$$v(0, x) = i(0, x) = 0$$

Le système d'équations (2) n'apporte rien de nouveau : les équations du régime transitoire se réduisent au système (1).

2-2 RESOLUTION PAR LE CALCUL SYMBOLIQUE.

Soit :

$$V(p, x) \subset v(t, x) \text{ et } I(p, x) \subset i(t, x)$$

$$\text{d'où : } \frac{\partial v(t, x)}{\partial x} \supset \frac{\partial V(p, x)}{\partial x} \text{ et } \frac{\partial i(t, x)}{\partial x} \supset \frac{\partial I(p, x)}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v(t, x)}{\partial t} \supset p V(p, x)$$

$$\frac{\partial i(t, x)}{\partial t} \supset p I(p, x) \quad \text{car } v(0, x) = i(0, x) = 0$$

Le système (1) devient :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial V(p, x)}{\partial x} &= (r + lp) \cdot I(p, x) \\ \frac{\partial I(p, x)}{\partial x} &= (g + cp) \cdot V(p, x) \end{aligned} \right\} (3)$$

- Posons :
- $Z = r + lp$  : impédance linéique symbolique .
  - $Y = g + cp$  : admittance linéique symbolique .
  - $Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$  : impédance caractéristique symbolique .
  - $n = \sqrt{ZY}$  : constante linéique de propagation .

D'autre part, dans le calcul symbolique,  $p$  est considéré comme paramètre ce qui fait que :  $V(p, x)$  et  $I(p, x)$  sont des fonctions dépendant uniquement de  $x$  on a alors :

$$\frac{\partial V(p, x)}{\partial x} = \frac{dV(p, x)}{dx} \text{ et } \frac{\partial I(p, x)}{\partial x} = \frac{dI(p, x)}{dx}$$

Le système (3) devient :

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV(p, x)}{dx} &= Z I(p, x) \\ \frac{dI(p, x)}{dx} &= Y V(p, x) \end{aligned} \right\} (4)$$

dérivons par rapport à  $x$ , la première équation de (4) :

$$\frac{d^2 V(p, x)}{dx^2} = Z \frac{dI(p, x)}{dx} \quad \text{or} \quad \frac{\partial I(p, x)}{\partial x} = Y V(p, x)$$

d'où :

$$\frac{d^2 V(p, x)}{dx^2} = ZY V(p, x) = n^2 V(p, x) \quad \text{car} \quad ZY = n^2$$

En faisant de même avec la deuxième équation de (4), on aura :

$$\frac{d^2 I(p, x)}{dx^2} = n^2 I(p, x)$$

d'où le système d'équations :

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 V(p, x)}{dx^2} &= n^2 V(p, x) \\ \frac{d^2 I(p, x)}{dx^2} &= n^2 I(p, x) \end{aligned} \right\} \text{(4 bis)}$$

dont la solution générale est :

$$\boxed{\begin{aligned} V(p, x) &= V' e^{nx} + V'' e^{-nx} \\ I(p, x) &= I' e^{nx} + I'' e^{-nx} \end{aligned}} \quad (5)$$

$V', V'', I', I''$  étant des fonctions de  $p$ .

Soit  $V_0$  et  $I_0$ , la tension et le courant au point  $x=0$ , soit :

$$V(p, 0) = V_0 \quad \text{et} \quad I(p, 0) = I_0$$

On a alors d'après (5) :

$$V = V' + V'' \quad \text{et} \quad I = I' + I''$$

Compte tenu des équations (4) et (5), on aura :

$$\frac{dV(p, x)}{dx} = Z I(p, x) = Z(I' e^{nx} + I'' e^{-nx}) = nV' e^{nx} - nV'' e^{-nx}$$

soit, en identifiant :  $I' = \frac{n}{Z} V'$  et  $I'' = -\frac{n}{Z} V''$

$$\text{or, } \frac{n}{Z} = \frac{\sqrt{ZY}}{Z} = \sqrt{\frac{Y}{Z}} = \frac{1}{Z_c}$$

$$\text{d'où : } I' = \frac{V'}{Z_c} \text{ et } I'' = -\frac{V''}{Z_c}$$

on a donc : 4 équations à 4 inconnues :  $I', I'', V'$  et  $V''$ .

$$V_2 = V' + V''$$

$$V' = Z_c I'$$

$$I_2 = I' + I''$$

et

$$V'' = -Z_c I''$$

dont les solutions sont :

$$V' = \frac{1}{2} (V_2 + Z_c I_2)$$

$$I' = \frac{1}{2Z_c} (V_2 + Z_c I_2)$$

$$V'' = \frac{1}{2} (V_2 - Z_c I_2)$$

$$I'' = -\frac{1}{2Z_c} (V_2 - Z_c I_2)$$

Les équations (5) deviennent :

$$V(p, x) = \frac{1}{2} (V_2 + Z_c I_2) \cdot e^{nx} + \frac{1}{2} (V_2 - Z_c I_2) \cdot e^{-nx}$$

$$I(p, x) = \frac{1}{2Z_c} (V_2 + Z_c I_2) \cdot e^{nx} - \frac{1}{2Z_c} (V_2 - Z_c I_2) \cdot e^{-nx}$$

soit :

$$\left. \begin{aligned} V(p, x) &= V_2 \operatorname{ch} nx + Z_c I_2 \operatorname{sh} nx \\ I(p, x) &= I_2 \operatorname{ch} nx + \frac{V_2}{Z_c} \operatorname{sh} nx \end{aligned} \right\} (6)$$

qui sont les solutions générales de (4 bis).

Soit  $F(p)$ , l'expression symbolique de  $f(t)$  (tension appliquée).

L'état du circuit est caractérisé, à partir de l'instant initial, par les

relations :  $V(p, x)_{x=X} = V(p, X) = F(p)$  et  $I(p, 0) = I_2 = 0$

où  $X$  représente la longueur de la ligne.

On prendra donc, pour sens croissant des  $x$ , le sens : extrémité ouverte vers

l'extrémité où la tension est appliquée, soit :



$x=0$  extrémité ouverte .

$x=X$  extrémité fermée sur la f.o.m

Les équations (6) deviennent alors :

$$F(p) = V_2 \operatorname{ch} nx \quad \text{soit} \quad V_2 = \frac{F(p)}{\operatorname{ch} nx}$$

ou encore :

$$\begin{aligned} V(p, x) &= \frac{F(p)}{\operatorname{ch} nx} \cdot \operatorname{ch} nx \\ I(p, x) &= \frac{1}{Z_c} \cdot \frac{F(p)}{\operatorname{ch} nx} \cdot \operatorname{sh} nx \end{aligned} \quad (7)$$

### ETUDE DU RÉGIME DE LA TENSION .

Ce qui intéresse notre étude, c'est la tension, c'est pourquoi nous allons nous occuper uniquement de  $V(p, x)$  .

$$\begin{aligned} \text{On a : } V(p, x) &= F(p) \cdot \frac{\operatorname{ch} nx}{\operatorname{ch} nX} = F(p) \cdot \frac{e^{nx} + e^{-nx}}{e^{nX} + e^{-nX}} = F(p) \cdot e^{-nx} \cdot \frac{e^{nx} + e^{-nx}}{1 + e^{-2nX}} \\ \text{Soit } V(p, x) &= F(p) \cdot e^{-nx} \cdot (e^{nx} + e^{-nx}) \left( 1 - e^{-2nX} + \dots + (-1)^k \cdot e^{-2knX} + \dots \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V(p, x) &= F(p) \left[ e^{-n(x-x)} - e^{-n(3X-x)} + e^{-n(5X-x)} - \dots \right] \\ &+ F(p) \left[ e^{-n(x+x)} - e^{-n(3X+x)} + e^{-n(5X+x)} - \dots \right] \end{aligned}$$

En supposant que la partie réelle de  $n$  est toujours positive, ces séries sont absolument convergentes .

L'équation ci-dessus donne l'expression symbolique de la tension en un point quelconque de la ligne lorsque la tension est appliquée à l'extrémité  $x=X$  et quelles que soient la forme et la nature de cette tension .

### EXPRESSION DE LA TENSION A LA SORTIE DE LA LIGNE .

ON fait,  $x=0$ , on aura :

en posant  $V(p, 0) = V_g(p)$

$$V_e(p) = \mathcal{L}F(p) \left[ e^{-nX} - e^{-3nX} + e^{-5nX} - \dots \right]$$

Dans le cas le plus général, où  $n$  est une fonction irrationnelle, le passage de l'expression symbolique à son original conduit à des formules assez compliquées. C'est pourquoi on simplifie le calcul en admettant les deux conditions suivantes :

- $\frac{r}{l} = \frac{g}{c}$  (condition de HEAVISIDE).
- $r = g = 0$  (ligne sans pertes).

Dans tout ce qui va suivre, on va supposer les constantes linéiques linéaires, la ligne sans pertes, et la condition de HEAVISIDE satisfaite.

Posons  $\frac{r}{l} = \frac{g}{c} = \delta$  coefficient d'amortissement.

On a alors :

$$n = \sqrt{(r+lp)(g+cp)} = \sqrt{rg + lpg + czp + lcp^2} = \sqrt{elc\delta p + lcp^2 + rg}$$

$$n = \sqrt{2lcp\delta + lcp^2 + \delta^2 lc} = (p + \delta) \sqrt{lc}$$

Posons  $V_0 = \frac{1}{\sqrt{lc}}$

d'où :

$$n = \frac{p + \delta}{V_0} \quad \text{et} \quad nX = \frac{p + \delta}{V_0} \cdot X$$

On démontre que si la condition de HEAVISIDE était satisfaite, et s'il n'y a pas de distorsion (ou dispersion de vitesse) lors de la propagation, le régime libre du circuit peut être considéré comme la superposition de deux ondes résultantes se propageant en sens inverse, à la même vitesse constante  $V_0 = \frac{1}{\sqrt{lc}}$  (Voir (5)).  
(ou Annexe)

Soit  $T$  le temps nécessaire à une onde pour parcourir la longueur  $X$  de la ligne.

d'où :  $T = \frac{X}{V_0} \quad \text{et} \quad nX = (p + \delta) T$

L'équation (8) devient :

$$V_2(p) = 2F(p) \left[ e^{-(p+\delta)T} - e^{-3(p+\delta)T} + e^{-5(p+\delta)T} \dots \right]$$

cherchons l'original de cette fonction.

$V_2(p)$  est composé de termes de la forme :

$$2F(p) \cdot e^{-\beta(p+\delta)T} = 2F(p) \cdot e^{-\beta p T} \cdot e^{-\beta \delta T}$$

or l'original de  $2F(p) \cdot e^{-\beta p T}$  est  $2f(t-\beta T) \cdot U(t-\beta T)$

où  $f(t)$  est l'original de  $F(p)$  et  $U(t)$  la fonction échelon unité.

l'original de  $2F(p) \cdot e^{-\beta p T} \cdot e^{-\beta \delta T}$  est donc :  $2f(t-\beta T) \cdot U(t-\beta T) \cdot e^{-\beta \delta T}$

d'où  $v_2(t)$ , l'original de  $V_2(p)$  :

$$v_2(t) = 2 \left[ e^{-\delta T} \cdot f(t-T) \cdot U(t-T) - e^{-3\delta T} \cdot f(t-3T) \cdot U(t-3T) + \dots \right. \\ \left. \dots + (-1)^k \cdot e^{-(2k+1)\delta T} \cdot f(t-(2k+1)T) \cdot U(t-(2k+1)T) \right]$$

#### Remarque .

La multiplication par  $U(t-(2k+1)T)$  signifie que les termes multipliés sont nuls pour  $t < (2k+1)T$  et prennent les valeurs indiquées pour  $t \geq (2k+1)T$ .

#### INTERPRETATION DU RESULTAT .

De cette expression, il résulte que la tension à la sortie de la ligne, est la somme de termes alternativement positifs et négatifs, d'amplitude décroissante et apparaissant à des instants successifs.

Le facteur 2 est dû à la superposition de l'onde réfléchie et de l'onde incidente aux extrémités . ( Voir relation (5) ) (ou ANNEXE) -

Le coefficient de réflexion est donné par :  $\Gamma = \frac{Z_E - Z_C}{Z_E + Z_C}$   
 où  $Z_C$  est l'impédance caractéristique et  $Z_E$  l'impédance sur laquelle est fermée  
 l'extrémité où se fait la réflexion.

A l'extrémité ouverte, on a :  $Z_E = \infty$  soit  $\Gamma = 1$ .

A l'extrémité fermée sur la tension, on a :  $Z_E = 0$  (on considère que l'impédance  
 interne de la source est nulle) soit :  $\Gamma = -1$

C'est ce qui explique, l'alternance de termes positifs et de termes négatifs.  
 La présence de facteurs  $e^{-\delta\tau} = e^{-\delta \frac{x}{v_0}}$  signifie que les amplitudes des  
 perturbations subissent une atténuation de  $e^{-\frac{\delta}{v_0}}$  par unité de longueur de  
 ligne parcourue (cet amortissement est dû aux pertes par effet pelliculaire).  
 La présence de facteurs  $(2k+1)T = (2k+1) \frac{x}{v_0}$  signifie qu'il y a retard  
 de  $2T$  d'une onde par rapport à sa précédente.

On voit donc que la propagation se décompose en une atténuation et en un  
 retard : d'où la décomposition de  $n$  en :

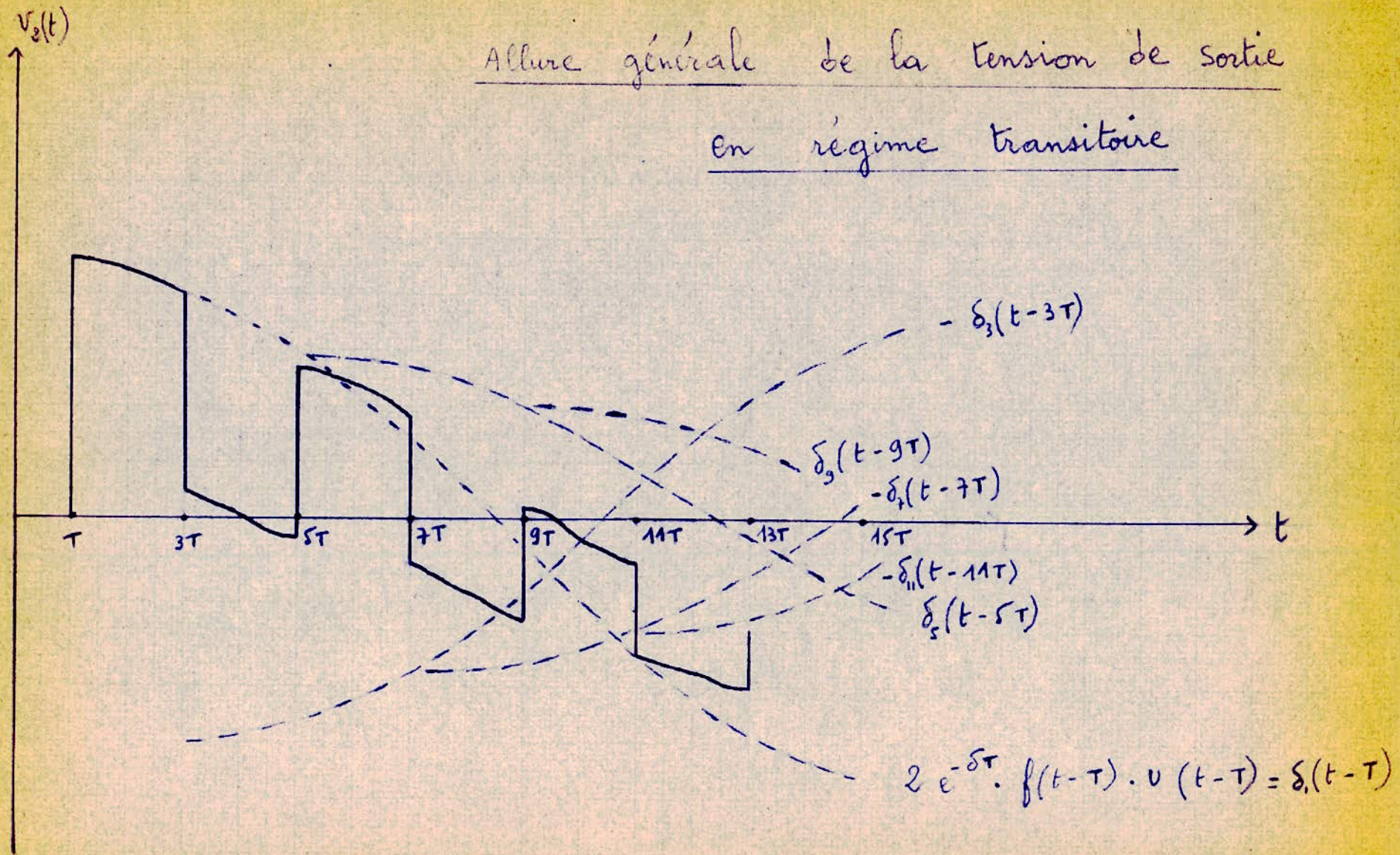
$$\alpha = \frac{\delta}{v_0} = \text{constante d'atténuation.}$$

$$\beta = \frac{1}{v_0} = \text{constante de phase.}$$

#### REPRESENTATION GRAPHIQUE DE $v(t)$ .

On trace successivement les sinusoides correspondant à chacun des termes  
 (en tenant compte bien sûr des retards et des atténuations) et on additionne  
 algébriquement leurs ordonnées, ce qui nous donne une courbe en créneaux,  
 représentant le régime transitoire de la tension à l'extrémité ouverte de la  
 ligne.

Allure générale de la tension de sortie  
en régime transitoire



16 (bis)  
- ANNEXE -

Décomposition, en 2 ondes mobiles, du régime libre.

Reprenons la relation (5):

$$V(p, x) = V' e^{nx} + V'' e^{-nx}$$

$$I(p, x) = I' e^{nx} + I'' e^{-nx}$$

si la ligne est sans pertes:  $r = g = 0 \Rightarrow \delta = 0$

$$n = (p + \delta) \cdot \sqrt{lc} = p \sqrt{lc}$$

soit :

$$V(p, x) = V' \cdot e^{p\sqrt{lc} x} + V'' \cdot e^{-p\sqrt{lc} x}$$

$$I(p, x) = I' \cdot e^{p\sqrt{lc} x} + I'' \cdot e^{-p\sqrt{lc} x}$$

d'où:

$$v(t, x) = V'(t + \sqrt{lc} x) + V''(t - \sqrt{lc} x)$$

$$i(t, x) = I'(t + \sqrt{lc} x) + I''(t - \sqrt{lc} x)$$

onde incidente :  $V', I'$

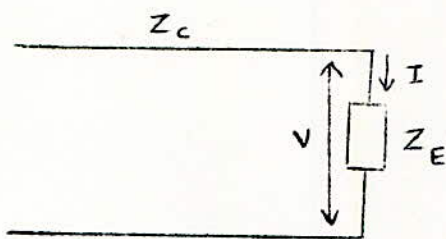
onde réfléchie :  $V'', I''$

On a donc 2 ondes mobiles se propageant, en sens inverse, à la même vitesse  $V_0 = \frac{1}{\sqrt{lc}}$ .

De plus, on a : 
$$\left. \begin{array}{l} V' = V'' \\ I' = -I'' \end{array} \right\} \text{(Voir page 11 et faire } I_2 = 0 \text{)} \\ \text{(cas où l'extrémité } l \text{ est ouverte).}$$

et 
$$\left\{ \begin{array}{l} I' = \frac{V'}{Z_c} \\ I'' = -\frac{V''}{Z_c} \end{array} \right. \text{(valable quelle que soit l'état de l'extrémité } l \text{).}$$

calcul du coefficient de réflexion.



Supposons que la réflexion se fait à une extrémité fermée sur une impédance  $Z_E$ .

On a :  $I = I' + I''$

avec  $I' = \frac{V'}{Z_c}$  et  $I'' = -\frac{V''}{Z_c}$  et  $V = V' + V''$

or  $I = \frac{V}{Z_E} = \frac{V' + V''}{Z_E}$

d'où :  $\frac{V' + V''}{Z_E} = \frac{V'}{Z_c} - \frac{V''}{Z_c}$

On tire alors :

$$V'' = \frac{Z_E - Z_c}{Z_E + Z_c} \cdot V'$$

$\Gamma = \frac{Z_E - Z_c}{Z_E + Z_c}$  est appelé : coefficient de réflexion.

CHAPITRE 3 : LIGNE ARTIFICIELLE DE TRANSPORT D'ÉNERGIE .

---

THEORIE .

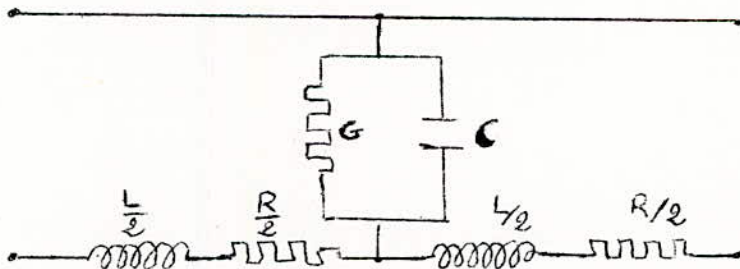
---

3-1 SIGNIFICATION PHYSIQUE .

Une ligne artificielle de transport d'énergie est un modèle réduit comportant un ensemble de selfs inductance, de capacités, de résistances qui représentent à une échelle donnée les impédances et les admittances des éléments constituant le réseau réel .

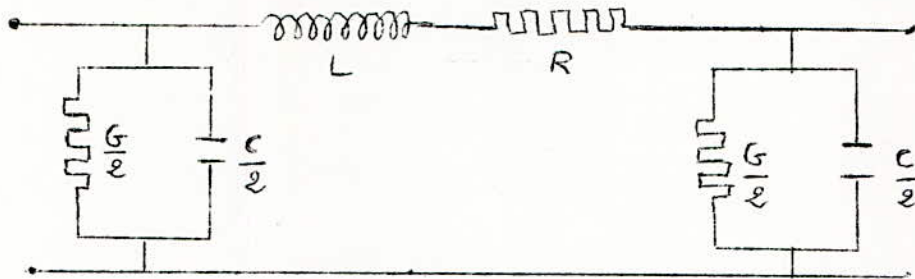
Pour qu'il y ait similitude rigoureuse concernant la répartition des courants et des tensions le long des deux lignes, il faudrait opérer pour la ligne artificielle avec une longueur d'onde beaucoup plus faible que dans le cas d'une ligne réelle, c'est à dire avec une fréquence beaucoup plus grande que la fréquence industrielle, d'où changement de la face du problème .

On doit donc renoncer à la réalisation d'une ligne à constantes uniformément réparties et chercher la solution au moyen d'un certain nombre déterminé de tronçons, mais suffisamment courts, pour que chaque section puisse être assimilée au point de vue électrique, à l'un des circuits suivants :

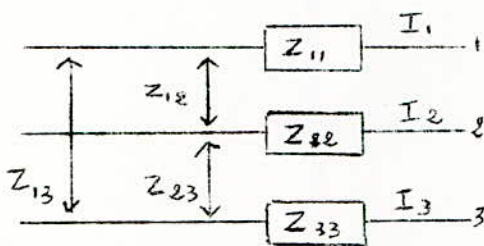


ELEMENT EN T



ELEMENT EN  $\pi$ .

## 3-2 PASSAGE D'UN SYSTEME TRIPHASE SYMETRIQUE A UN SYSTEME MONOPHASE.



$$\text{On a : } Z_{12} = Z_{23} = Z_{13} = Z$$

$$V_1 = Z_{11} I_1 + Z I_2 + Z I_3$$

$$V_2 = Z I_1 + Z_{22} I_2 + Z I_3$$

$$V_3 = Z I_1 + Z I_2 + Z_{33} I_3$$

$$\text{et } Z_{11} = Z_{22} = Z_{33} = Z_L$$

Si le système est équilibré, on a :

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad \text{soit} \quad I_1 = -I_2 - I_3$$

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

de même :

$$V_2 = (Z_L - Z) I_2 \quad \text{et} \quad V_3 = (Z_L - Z) I_3$$

Tout se passe comme si, chaque élément avait une impédance propre  $(Z_L - Z)$

c'est ce qu'on appelle : impédance cyclique ou effective par phase du système considéré.

Ceci nous permet de représenter un réseau triphasé en régime équilibre, par un schéma bifilaire équivalent, comportant un circuit de phase unique auquel on attribue les constantes cycliques du circuit réel, et un conducteur neutre de retour d'impédance négligeable.

L'étude d'un réseau triphasé se réduit donc à l'étude d'un réseau monophasé .

### 3-3 PASSAGE D'UNE LIGNE REELLE A UNE LIGNE ARTIFICIELLE .

L'étude générale de ce passage consiste d'abord à calculer les constantes linéiques de la ligne réelle ( connaissant les caractéristiques de celle ci ) grace à des formules , faisant intervenir la géométrie des cables . A partir de ces constantes linéiques , on calcule les constantes effectives linéiques à attribuer au conducteur monophasé équivalent .

ON divise alors la ligne en un nombre déterminé de tronçons ( dont les constituants seront alors connus , puisque la longueur du tronçon sera fixée ) , mais suffisamment courts pour que chaque section puisse être assimilée au point de vue électrique à une cellule en T ou à une cellule en  $\overline{TT}$  .

### 3-4 POSITION DE NOTRE PROBLEME .

Nous ne pouvons choisir comme modèle une ligne préexistante . Nous devons fabriquer notre maquette en fonction du but recherché et nous ne pourrons en définir la longueur virtuelle exacte .

## CHAPITRE 4 : REALISATION D'UNE MAQUETTE ADAPTEE AU BUT DE L'ETUDE .

---

### 4-1 CONSIDERATIONS SUR LA MAQUETTE .

---

Les surtensions de manoeuvre, résultant de la combinaison de phénomènes de propagation le long des lignes, de fronts pouvant être très raides et de phénomènes de réflexion aux extrémités, il importe que la représentation de la ligne traduise correctement ces phénomènes. Pour cela, il faut respecter les paramètres suivants de la ligne réelle : temps de propagation, impédance d'onde, amortissement. Si on veut représenter correctement la mise sous tension d'une ligne à vide de 50 kms, à partir d'une source de très grande puissance, il faut représenter la ligne réelle par une maquette à 200 cellules (bulletin 3 - 1970 - EDF). Il s'agit, bien entendu, d'un cas extrême, mais il met en évidence certaines difficultés de réalisation d'un modèle.

En général, une représentation aussi fine n'est pas nécessaire dans toutes les parties du réseau, car il faut tenir compte de l'atténuation des fronts d'onde au cours de leur propagation. Une telle représentation serait d'ailleurs très coûteuse et inutile.

D'une façon générale, le nombre de 6 cellules en  $\pi$  par ligne, valable pour les tensions transitoires de rétablissement (aux bornes du disjoncteur) doit être porté de 10 à 20 pour la plupart des surtensions de manoeuvre ne présentant pas des fronts très raides.

### 4-2 REPERCUSSION SUR LES VALEURS DES ELEMENTS DE LA MAQUETTE .

---

L'important pour nous est de pouvoir enregistrer le régime transitoire, aussi devons nous avoir un amortissement le plus faible possible, tout en essayant de satisfaire à la condition de HEAVISIDE.

On est donc conduit à choisir un rapport  $\frac{L\omega}{R}$  le plus grand possible. Ce choix va imposer L et R, donc va imposer, suivant les valeurs généralement admises de l'inductance linéique, une longueur fictive de la ligne, sur laquelle on va baser notre calcul (une fois le nombre de cellules fixé). Le choix du nombre de cellules doit être fait d'une façon telle que l'on puisse avoir un temps de parcours T appréciable. Le rapport  $\frac{c\omega}{G}$  sera, alors, lui aussi fixé et  $V_0 = 300000 \text{ kms/s} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon c}}$  permet de déterminer une valeur minimale de c et par conséquent celle de g. En fait,  $V_0$  n'est pas égale à la vitesse de la lumière car l'amortissement n'est pas nul, cependant il est quand même faible, ce qui fait que  $V_0$  chute de 1 à 5%.

La connaissance des constantes linéiques permet de construire le tronçon et par la même occasion la ligne qui comportera une dizaine de cellules.

#### 4-3 REALISATION DE LA MAQUETTE.

Notre point de départ est le rapport  $\frac{L\omega}{R}$  qui doit être le plus élevé possible c'est à dire d'avoir une impédance à prédominance inductive.

##### REALISATION DE LA SELF.

La réalisation de cet élément a présenté quelques difficultés : en effet, la résistance (faible) oblige à employer un fil de section importante et la self inductance (grande) impose un grand nombre de spires.

L'idée de fabriquer une inductance à noyau de fer, dans le but de réduire le nombre de tours, n'a pas été retenue à cause des variations très importantes qu'une telle self subit pour des variations de courant.

Pour déterminer approximativement, les grandeurs géométriques de la bobine, on a utilisé la relation :

$$L = \mu_0 \frac{n^2 S}{l}$$

où  $l$  : est la longueur de la bobine,  $n$  : le nombre de spires,  $s$  : section de la bobine.

Pour un fil de section donnée, la résistance impose la longueur. D'autre part, la carcasse de la bobine dès qu'elle est choisie impose  $l$  et  $s$ .

Il faut chercher un compromis et tâtonner pour obtenir les valeurs désirées.

Après plusieurs essais, on a finalement abouti à une bobine d'impédance  $13,46 \Omega$  et de résistance  $5,5 \Omega$  soit une réactance de  $13,2 \Omega$  et un rapport  $\frac{L\omega}{R} = 2,2$

La valeur de la self inductance est de :  $\frac{13,2}{314} = 40 \text{ mH} = L$

La valeur généralement admise de la self inductance linéique est de  $2 \text{ mH/km}$ , ce qui fait que notre self représente  $20 \text{ kms DE ligne}$ . On a :  $V_0 = 300000 \text{ kms} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  avec  $l = 2 \text{ mH/km}$  d'où on tire  $c = 5,56 \text{ nF/km}$  soit pour les  $20 \text{ kms}$  :  $C = 0,111 \mu\text{F}$ .

Comme  $V_0 < 300000 \text{ kms/s}$ , on prendra :  $C = 0,13 \mu\text{F}$  (valeur normalisée).

D'où la valeur de  $G$  pour les  $20 \text{ kms}$  :  $G = \frac{RC}{L} = \frac{5,5 \times 0,131 \cdot 10^{-6}}{40 \cdot 10^{-3}} = 1526 \cdot 10^{-8} \Omega^{-1}$   
soit  $G = \frac{1}{R_g}$  et  $R_g = \frac{10^8}{1526} = 66 \text{ k}\Omega$  (valeur normalisée  $68 \text{ k}\Omega$ )

On peut donc construire le tronçon représentant  $20 \text{ kms}$  de ligne et par la même notre ligne qui comportera  $10$  cellules en  $\pi$ , assemblées en cascade, soit une ligne artificielle représentant une ligne de  $200 \text{ kms}$ .

#### CALCUL DES DIFFERENTS PARAMETRES.

$$T = \frac{x}{V_0} = \frac{200}{3 \cdot 10^5} = 0,66 \text{ m}\mu\text{s} \quad \delta = \frac{z}{\rho} = \frac{R}{L} = \frac{5,5}{40 \cdot 10^{-3}} = 137,5$$

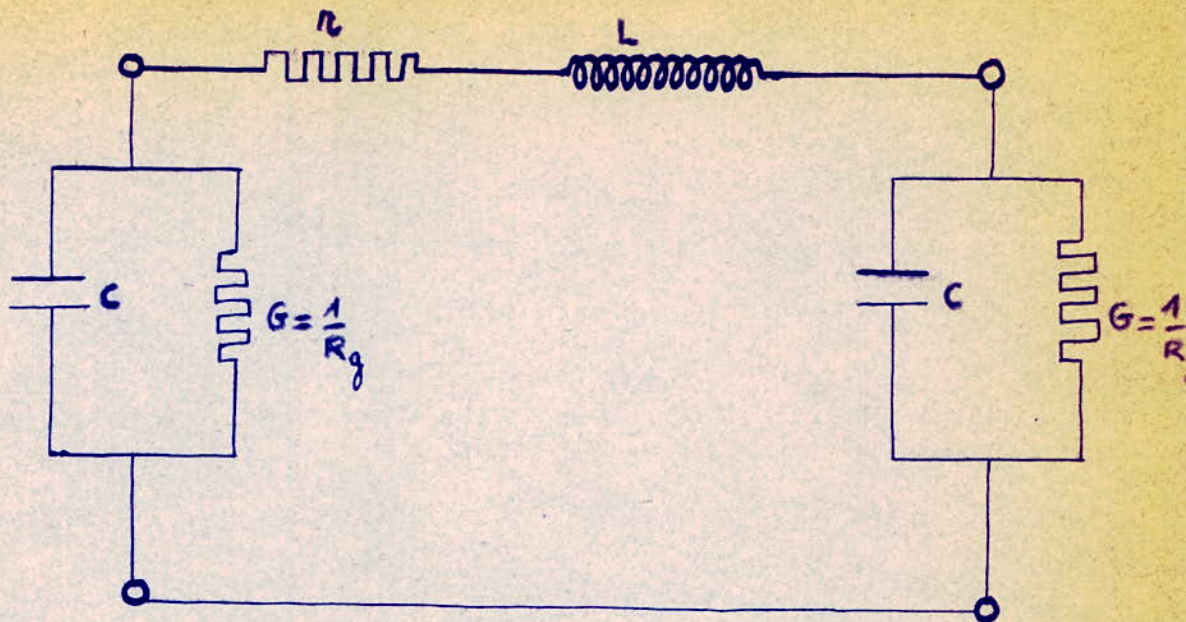
$$\text{Soit } \delta T = 0,66 \cdot 10^{-3} \times 137,5 = 0,091$$

$$\text{et } e^{-\delta T} = 0,91$$

$$\alpha = \frac{\delta}{V_0} = \frac{137,5}{3 \cdot 10^5} = 46 \cdot 10^{-5} \text{ nepers/km}$$

$$\beta = \frac{1}{V_0} = 0,33 \cdot 10^{-5} \text{ A/km} \quad \text{ou } \beta\omega = 0,33 \cdot 10^{-5} \times 314 = 10^{-3} \text{ rd/km}$$

$$\text{Soit } n = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 \omega^2} = 1,13 \cdot 10^{-3} \text{ nepers/km}$$



STRUCTURE d'un TRONÇON de la LIGNE ARTIFICIELLE.

CELLULE EN TT

REPRÉSENTANT 20 kms de LIGNE.

$$L = 40 \text{ mH}$$

$$r = 5,5 \Omega$$

$$C = 0,068 \mu\text{F}$$

$$G = \frac{1}{R_g} \Rightarrow R_g = 136 \text{ K}\Omega$$

CHAPITRE 5 : COURBES THEORIQUES DU REGIME TRANSITOIRE EN FONCTION

DE LA PHASE D'ENCLenchEMENT .

Reprenons l'expression de la tension transitoire de sortie :

$$v_2(t) = 2 \left[ e^{-\delta T} \cdot f(t-T) \cdot U(t-T) - e^{-3\delta T} \cdot f(t-3T) \cdot U(t-3T) + \dots \right]$$

La tension appliquée est sinusoidale , donc de la forme :

$$f(t) = K \cos(\omega t + \varphi)$$

On a alors :

$$v_2(t) = 2K \left[ e^{-\delta T} \cdot \cos(\omega(t-T) + \varphi) \cdot U(t-T) - e^{-3\delta T} \cdot \cos(\omega(t-3T) + \varphi) \cdot U(t-3T) + \dots \right]$$

INFLUENCE DE L'INSTANT D'ENCLenchEMENT SUR LA TENSION TRANSITOIRE DE SORTIE .

L'étude de cette influence se fera en comparant les différentes courbes obtenues suivant les valeurs données à  $\varphi$ .

Pour la construction de ces courbes , nous allons utiliser les valeurs numériques des paramètres , que nous avons calculé lors de la réalisation de la maquette , soit :

$$\left. \begin{array}{l} T = 0,66 \text{ ms} \\ \delta = 137,5 \end{array} \right\} \Rightarrow e^{-\delta T} = 0,91$$

$\omega$  : étant la pulsation de l'onde appliquée , soit  $\omega = 314$  ( fréquence industrielle 50 Hz ) . L'onde a donc une période de 20 ms .

L'expression de  $v(t)$  devient :

$$v_2(t) = 2K \left[ 0,91 \cdot \cos(314(t-0,66) + \varphi) \cdot U(t-0,66) - (0,91)^3 \cdot \cos(314(t-1,98) + \varphi) \cdot U(t-1,98) \dots \right]$$

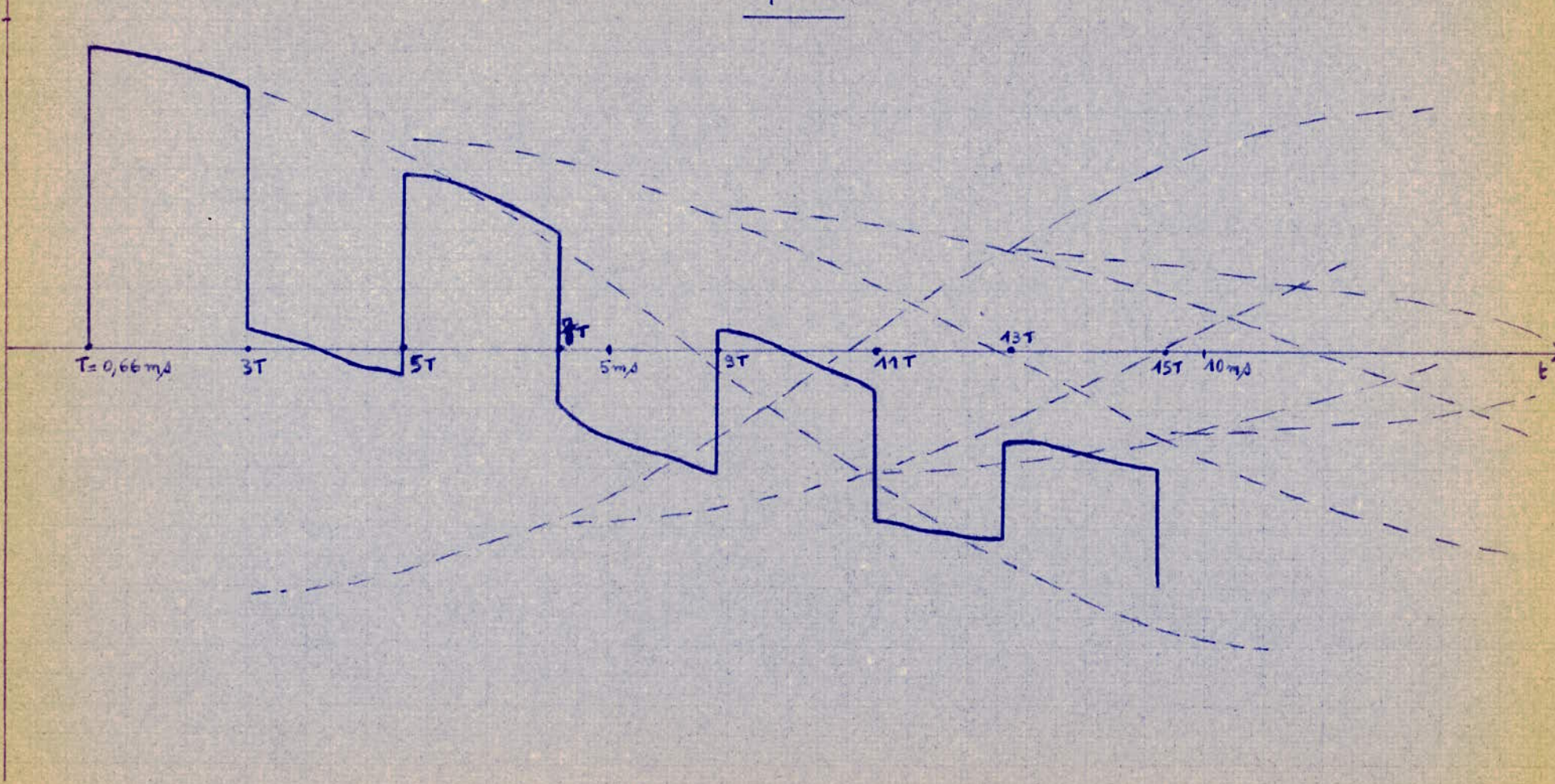
Nous tracerons 3 courbes correspondant à :  $\varphi = 0$  ;  $\varphi = \frac{\pi}{3}$  ;  $\varphi = \frac{\pi}{2}$

et on se limitera à 15 T .

La méthode de construction de ces courbes a été donnée lors de l'étude générale .

$\vec{v}_2(t)$

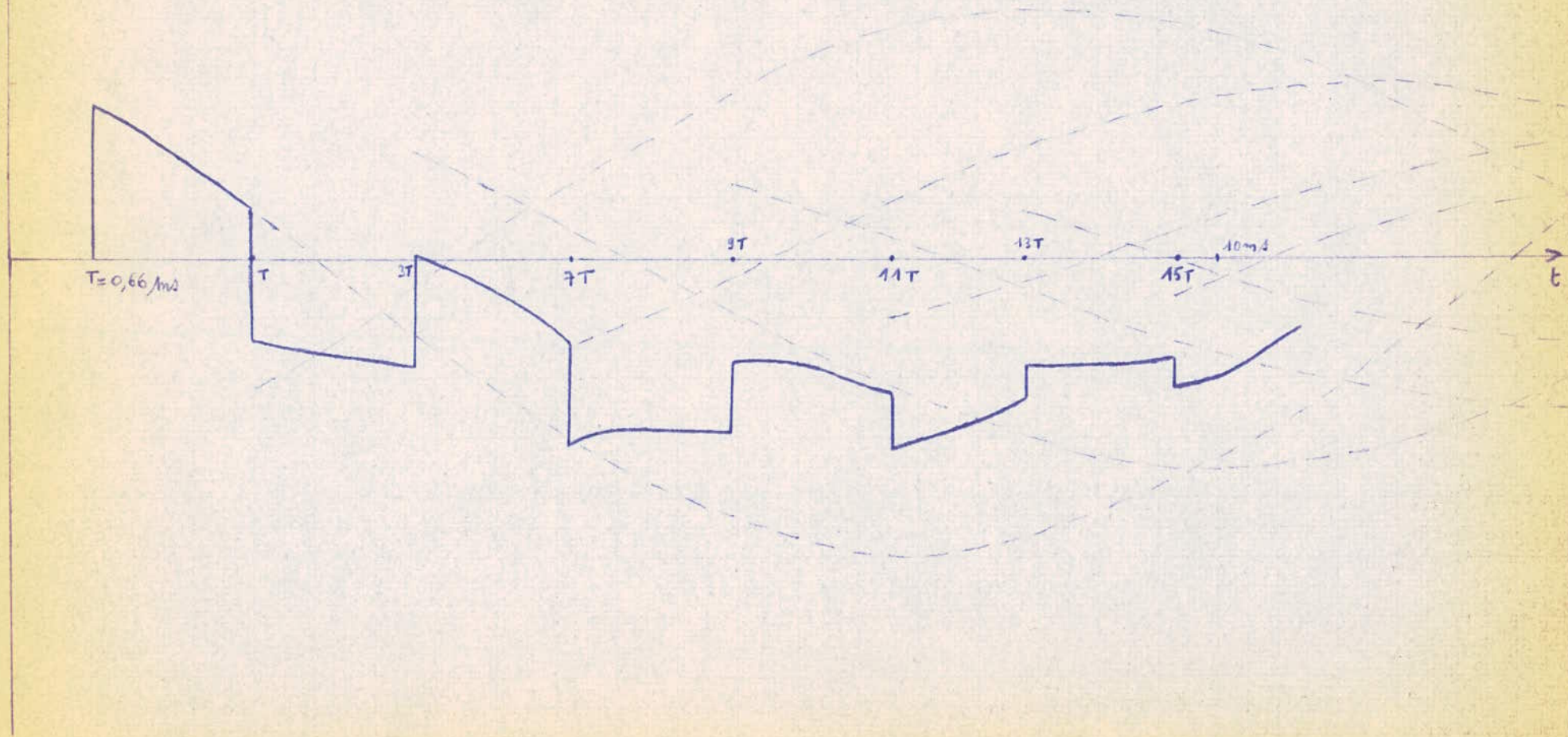
$\varphi = 0$





$v_2(t)$

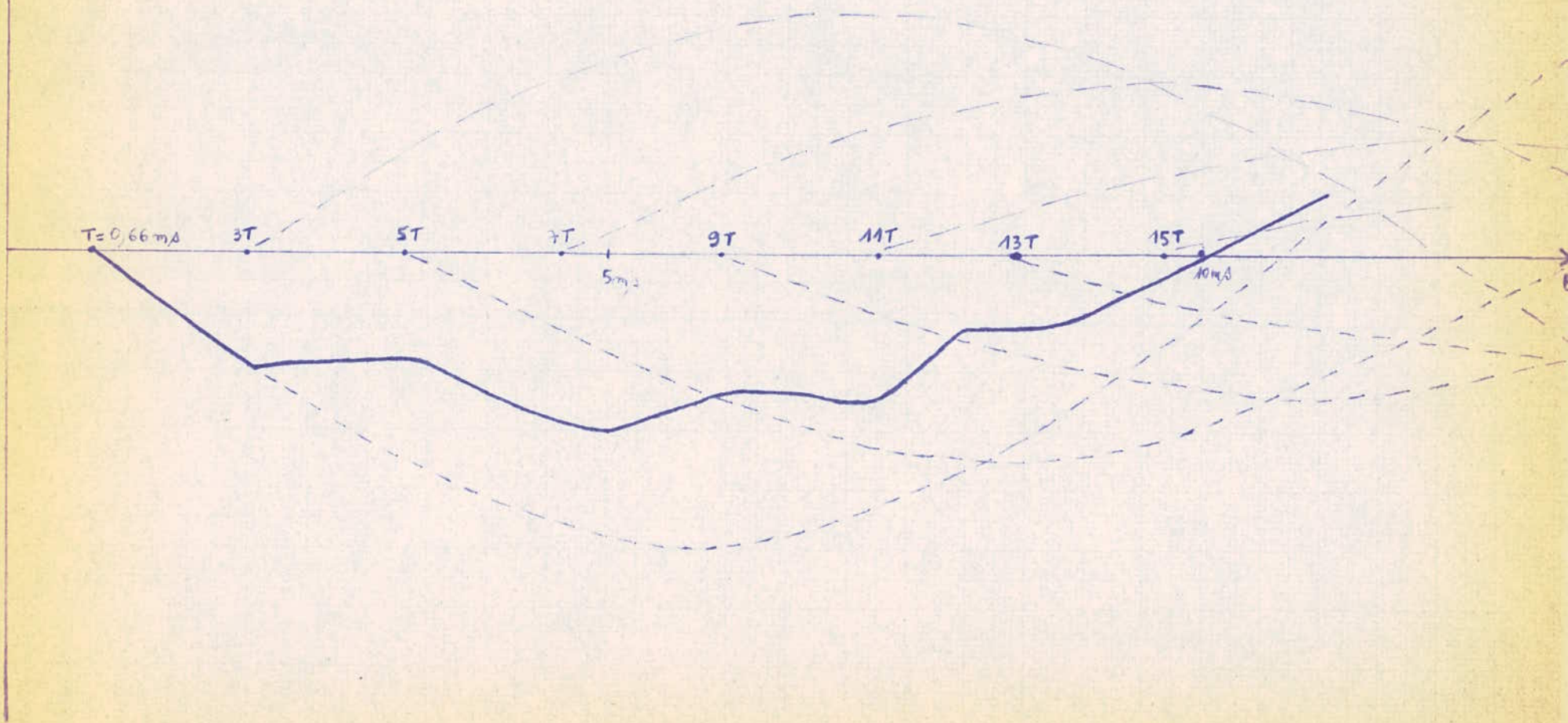
$\varphi = \frac{\pi}{3}$



$v_2(t)$

$$\varphi = \frac{\pi}{2}$$

2K



$T = 0,66 \text{ ms}$

$3T$

$5T$

$7T$

$9T$

$11T$

$13T$

$15T$

5ms

10ms

COMPARAISON DES 3 COURBES .

Pour  $\varphi = 0$ , la tension atteint au temps  $t = T$  une valeur égale à  $1,8 K$  ( $K$  étant l'amplitude maximum de la tension appliquée) et jusqu'à  $t = 3T$ , elle suivra la fonction  $1,8K \cos \omega t$ . A  $t = 3T$ , elle subit une chute brusque, atteignant  $0,1 K$ . On assiste ici à des variations brusques de tension (fronts raides) qui peuvent faire subir à la ligne des contraintes assez importantes.

Pour  $\varphi = \frac{\pi}{3}$ , la tension atteint son maximum ( $1,16 K$ ) au voisinage de  $\pi$ ; là aussi, il y a des fronts raides mais d'amplitudes moins importantes que dans le cas  $\varphi = 0$ . La courbe correspondant à  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , quand à elle, semble plus aplatie et ne présente pas de fronts raides. De plus, c'est pour elle, que l'on obtient le minimum de surtension ( $1,09 K$ ).

On pourrait tracer d'autres courbes pour différentes valeurs de  $\varphi$ , et on verra que lorsque  $\varphi$  augmente de  $0$  à  $\frac{\pi}{2}$ , la surtension diminue et la raideur des fronts devient de moins en moins notable.

Ceci nous amène à dire, surtout pour les lignes à très haute tension, que si on veut limiter les contraintes qu'aura à subir la ligne lors de son enclenchement à vide, on a tout intérêt à enclencher au moment où cette tension passe par son zéro.

## Etude de la tension transitoire au point situé au centre de la ligne

Dans l'étude des surtensions de manœuvres, prises dans leur ensemble, on recherche les surtensions non pas en un point défini du réseau mais en plusieurs, et cela pour pouvoir donner une conclusion solide. Nous n'allons pas, bien sûr, le faire et on va se contenter d'étudier le régime transitoire de la tension en un autre point, ce sera le point situé au milieu de la ligne.

Reprenons, l'expression donnant l'équation symbolique de la tension en un point quelconque de la ligne lorsque la tension est appliquée à l'extrémité  $x = X$  (Voir page 12):

Soit:

$$V(p, x) = F(p) \cdot \left[ e^{-n(X-x)} - e^{-n(3X-x)} + e^{-n(5X-x)} - \dots \right] \\ + F(p) \cdot \left[ e^{-n(X+x)} - e^{-n(3X+x)} + e^{-n(5X+x)} - \dots \right]$$

Faisons  $x = \frac{X}{2}$ , on aura:

$$\text{en posant : } V\left(p, \frac{X}{2}\right) = V_{\frac{1}{2}}(p)$$

$$V_{\frac{1}{2}}(p) = F(p) \cdot \left[ e^{-n(x - \frac{x}{2})} - e^{-n(3x - \frac{x}{2})} + e^{-n(5x - \frac{x}{2})} \dots \right]$$

$$+ F(p) \cdot \left[ e^{-n(x + \frac{x}{2})} - e^{-n(3x + \frac{x}{2})} + e^{-n(5x + \frac{x}{2})} \dots \right]$$

$$V_{\frac{1}{2}}(p) = F(p) \cdot \left[ e^{-\frac{n}{2}x} - e^{-\frac{5}{2}nx} + e^{-\frac{9}{2}nx} \dots \right]$$

$$+ F(p) \cdot \left[ e^{-\frac{3}{2}nx} - e^{-\frac{7}{2}nx} + e^{-\frac{11}{2}nx} \dots \right]$$

Soit encore :

$$V_{\frac{1}{2}}(p) = F(p) \cdot \left[ e^{-\frac{n}{2}x} + e^{-\frac{3}{2}nx} - e^{-\frac{5}{2}nx} - e^{-\frac{7}{2}nx} + e^{-\frac{9}{2}nx} + e^{-\frac{11}{2}nx} \dots \right]$$

or,  $nx = (p + \delta)T$ , d'où :

$$V_{\frac{1}{2}}(p) = F(p) \cdot \left[ e^{-\frac{1}{2}(p+\delta)T} + e^{-\frac{3}{2}(p+\delta)T} - e^{-\frac{5}{2}(p+\delta)T} \dots \right]$$

Si  $v_{\frac{1}{2}}(t)$  est l'original de  $V_{\frac{1}{2}}(p)$ , on aura :

$$v_{\frac{1}{2}}(t) = e^{-\frac{\delta T}{2}} \cdot f(t - \frac{T}{2}) \cdot U(t - \frac{T}{2}) + e^{-\frac{3\delta T}{2}} \cdot f(t - \frac{3}{2}T) \cdot U(t - \frac{3}{2}T)$$

$$- e^{-\frac{5\delta T}{2}} \cdot f(t - \frac{5}{2}T) \cdot U(t - \frac{5}{2}T) - e^{-\frac{7\delta T}{2}} \cdot f(t - \frac{7}{2}T) \cdot U(t - \frac{7}{2}T) \dots$$

sachant que :  $f(t) = K \cos(\omega t + \varphi)$ , on aura :

$$v_{\frac{1}{2}}(t) = K e^{-\frac{\delta T}{2}} \cdot \cos\left[\omega\left(t - \frac{T}{2}\right) + \varphi\right] \cdot U\left(t - \frac{T}{2}\right)$$

$$+ K e^{-\frac{3\delta T}{2}} \cdot \cos\left[\omega\left(t - \frac{3}{2}T\right) + \varphi\right] \cdot U\left(t - \frac{3}{2}T\right) \dots$$

Là, aussi on assiste à un phénomène d'ondes mobiles, retardées l'une par rapport à l'autre de  $T$  et subissant chacune une atténuation.

Au bout de 2 réflexions, l'onde subit une inversion, d'où la signification des signes plus et moins.

La construction de cette courbe, ou plutôt de ces courbes car on va faire varier  $\varphi$ , se fait de la même façon que dans le cas de l'extrémité ouverte.

Pour pouvoir comparer ces courbes, à celles trouvées précédemment, nous allons les tracer à la même échelle et cette fois-ci, on se contentera de 2 courbes, l'une correspondant à  $\varphi = 0$  et l'autre à  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ; en sachant que :  $T = 0,66 \text{ ms}$  et  $e^{-\delta T} = 0,91$

### Comparaison des deux courbes entre elles

Comme dans le cas précédent, la courbe correspondant à  $\varphi = \frac{\pi}{2}$  présente de légères variations de tensions dont la raideur des fronts est presque insignifiante, contrairement à la deuxième, laquelle nous montre les bonds brusques que subit la tension, lors de son passage au point considéré.

Là aussi, le minimum de surtension est obtenu pour  $\varphi = \frac{\pi}{2}$

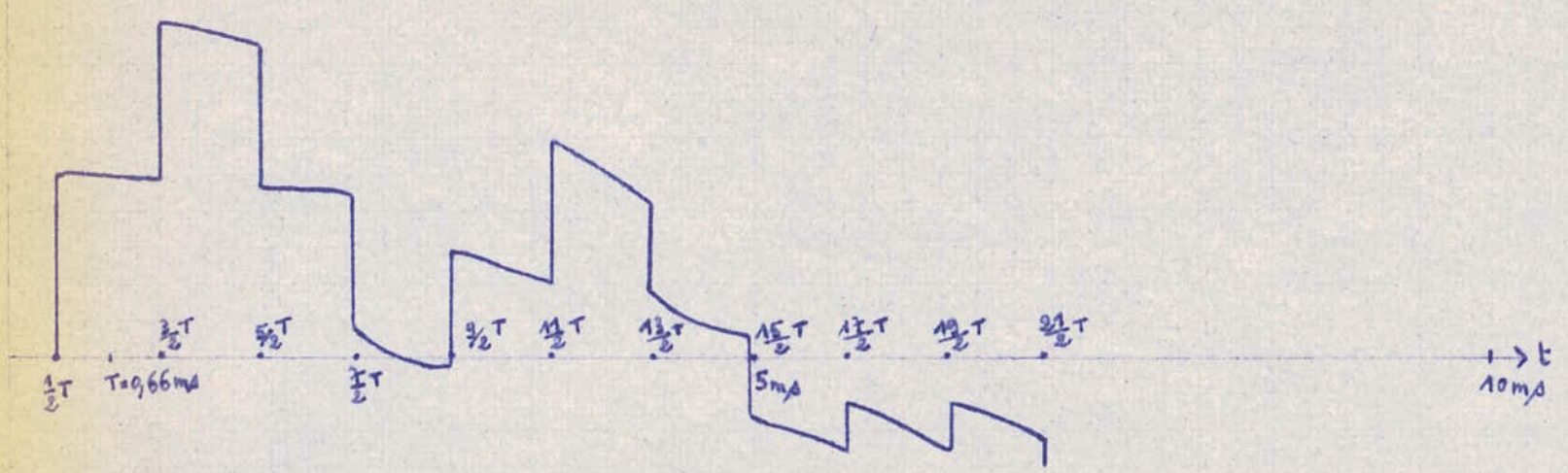
### - Conclusion -

Ces quelques exemples nous montrent l'importance que joue

$v_{\frac{1}{3}}(t)$

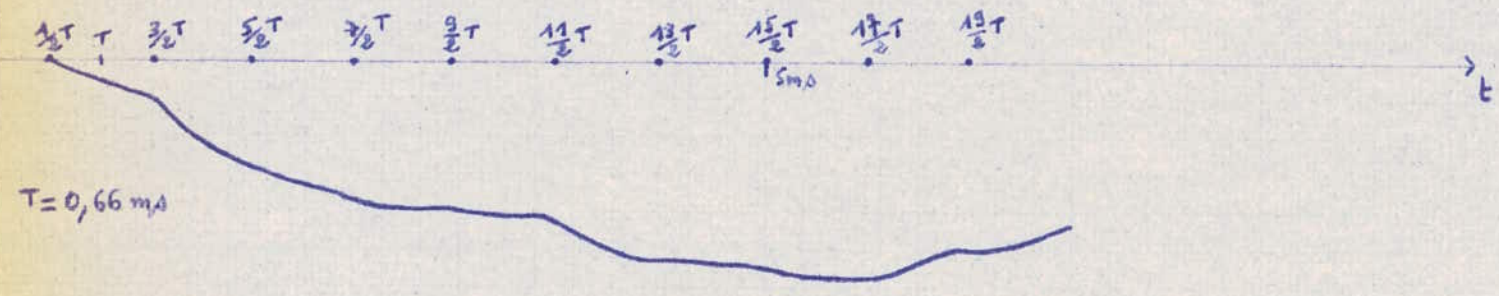
$\varphi = 0$

2K -



$v_1(t)$   
2K

$$\varphi = \frac{\pi}{2}$$





le facteur  $\varphi$  sur l'allure des courbes transitoires et que le minimum de surtension, en un point est obtenu pour  $\varphi = \frac{\pi}{2}$  .

De plus, les courbes homologues ( $\varphi = c \frac{L}{v}$ ), tracées en deux points différents et à la même échelle, nous montrent que c'est l'extrémité ouverte qui subit le maximum de surtensions et les variations les plus brusques, par rapport aux autres points de la ligne (généralisation).

Ce qui nous aide à confirmer la conclusion faite précédemment, à savoir que l'enclenchement d'une ligne à vide, au moment où la tension passe par son zéro, permet de limiter les contraintes qu'auront à subir, aussi bien la ligne que l'ensemble du matériel du réseau.

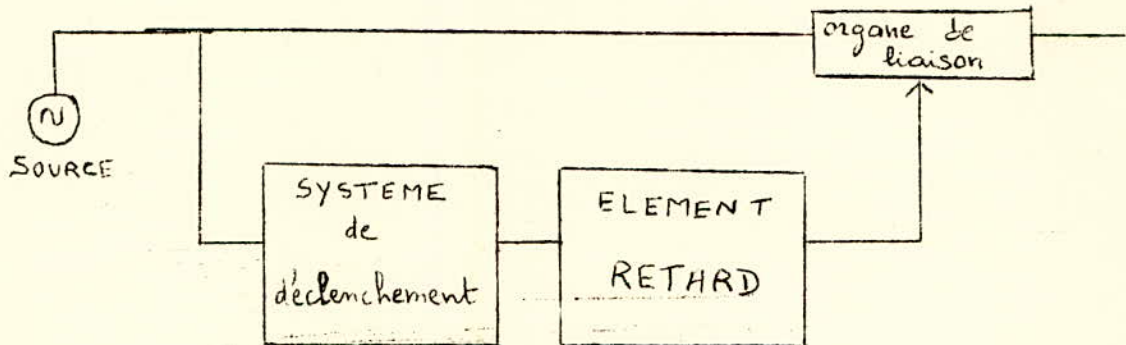
## CHAPITRE : 6 : CIRCUIT DE COMMANDE D' ENCLENCHEMENT .

### 6-1 INTERET DU SYSTEME DE COMMANDE .

Nous avons vu précédemment l'importance qu'avait l'instant d'enclenchement sur la forme du régime transitoire . Cette conclusion est purement théorique , reste maintenant à confirmer expérimentalement ce-ci .

Aussi devons nous disposer d'un système de commande qui puisse nous permettre de choisir l'instant de la période de l'onde appliquée , auquel s'effectue l'enclenchement . De plus , le temps de réponse du circuit doit être le plus instantané possible afin d'avoir la mise sous tension au moment voulu .

### 6-2 SCHEMA SYNOPTIQUE DU CIRCUIT DE COMMANDE .



Le système de commande doit comporter un organe de liaison qui aura pour rôle de mettre la ligne sous tension dès qu'il recevra l'ordre d'un système de déclenchement . Un élément retard réglable , intercalé entre le déclencheur et l'organe de liaison , permettra le choix de l'instant voulu d'enclenchement .

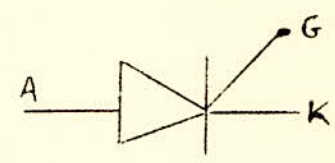
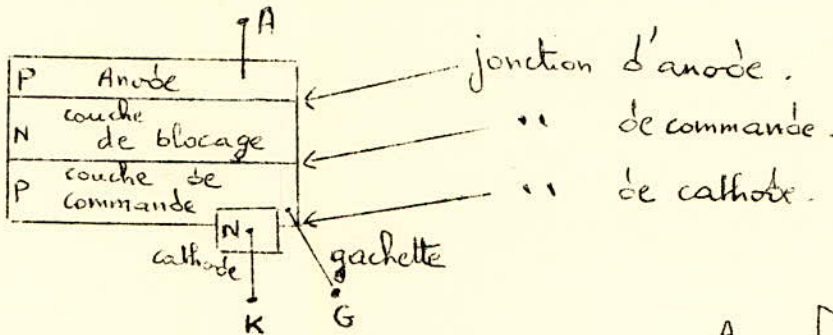
### 6-3 REALISATION DU CIRCUIT DE COMMANDE .

L'idée , d'utiliser des relais électromagnétiques comme organes de liaison , est à éviter car ces derniers présentent des temps de réponse relativement lents et instables . Aussi , allons nous utiliser des thyristors lesquels sont des relais statiques de puissance , présentant de nombreux avantages :

rapidité de réponse, fonctionnement silencieux, robustesse, insensibilité aux chocs et aux vibrations, etc .....

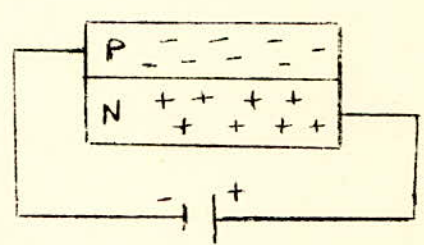
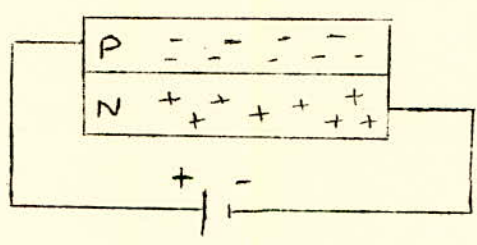
LE THYRISTOR .

C'est un semi-conducteur ( en silicium ) composé de 4 zones de conductibilité différentes alternativement de type P et de type N .



- structure d'un thyristor -

- symbole -



- jonction sous tension directe ;

- jonction sous tension inverse :

jonction passante -

jonction bloquée -

Amorçage du thyristor .

La tension anodique, étant positive, la jonction de commande est sous tension inverse . Elle assure le blocage en sens direct .  
 On dit que le thyristor est bloqué ; pour le débloquent, on applique une tension positive entre la cathode et la gachette : le thyristor devient alors passant . On dit qu'il est amorcé .  
 L'amorçage est donc provoqué par une impulsion positive sur la gachette . Dès qu'il y a amorçage, il y a circulation d'un courant important dans le thyristor .

De plus, pour pouvoir amorcer le thyristor, il faut garder un effet transistor entre les jonctions d'anode et de commande.

On vient de trouver dans le thyristor, un organe de liaison convenable, reste maintenant à le commander.

L'ordre d'amorçage du thyristor doit être fait au moment voulu de l'enclenchement de la ligne, aussi devons nous avoir un système devant déclencher pour une RÉFÉRENCE donnée de la tension appliquée, et un autre système, réglable, pouvant retarder cette impulsion de commande, et permettre donc le choix de l'instant de mise sous tension de la ligne.

Le rôle d'élément retard, réglable, peut être parfaitement rempli par un univibrateur. Une bascule, associée à un circuit ET, peut constituer l'élément d'obtention d'une référence.

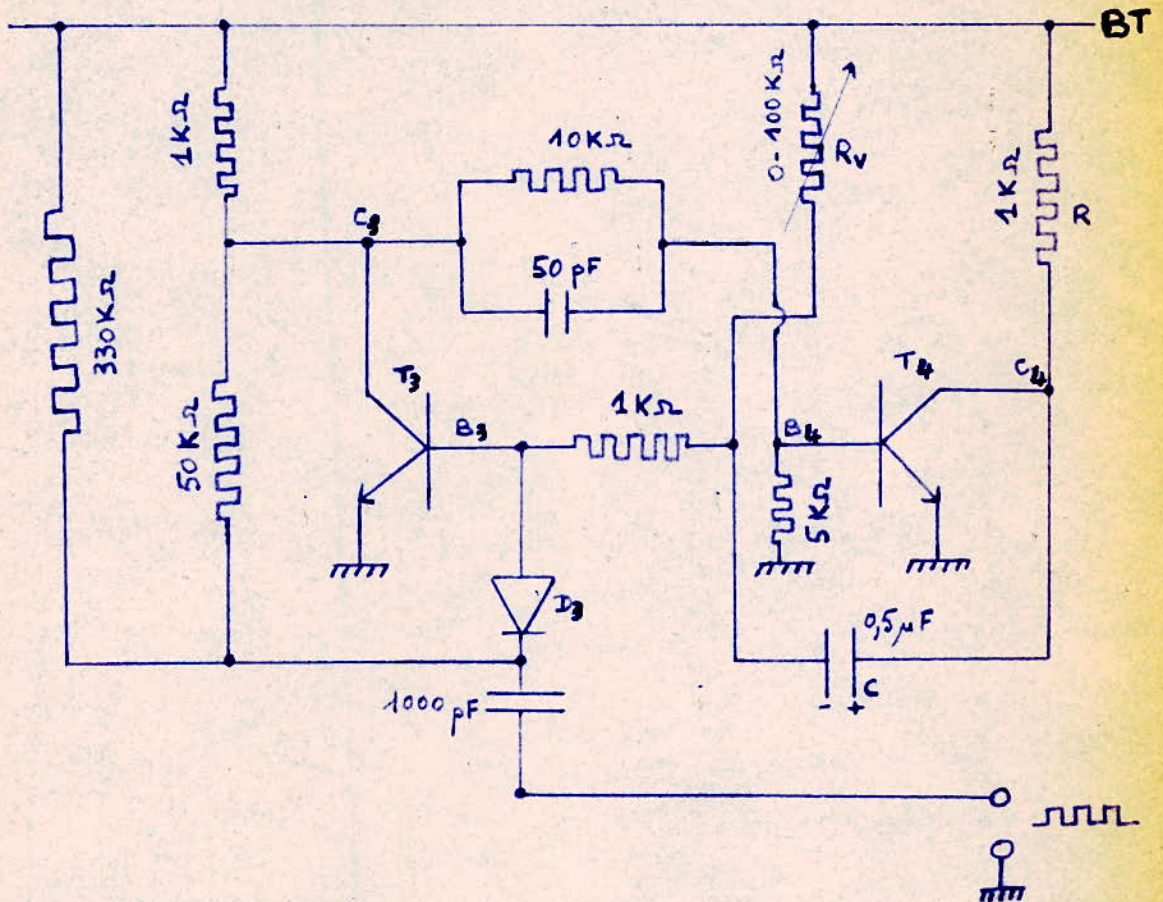
#### L'UNIVIBRATEUR.

C'est un montage électronique à 2 étages, pour lequel un des étages est conducteur tant qu'aucun signal extérieur ne vient le faire changer d'état. Lorsque ce signal arrive, les 2 étages changent d'état et demeurent dans le nouvel état pour une durée déterminée (suivant le réglage), puis reviennent automatiquement à leur position stable. L'univibrateur sert donc à retarder les impulsions et la durée de l'état instable dépend d'une constante de temps RC.

#### La bascule

C'est un montage électronique à 2 étages, à couplage croisé par résistance - capacité; la sortie de chaque étage attaquant l'entrée de l'autre. En l'absence d'impulsions, les 2 étages restent indéfiniment dans l'un quelconque des 2 états stables, celui qu'avait provoqué la dernière impulsion reçue.

# L'UNIVIBRATEUR



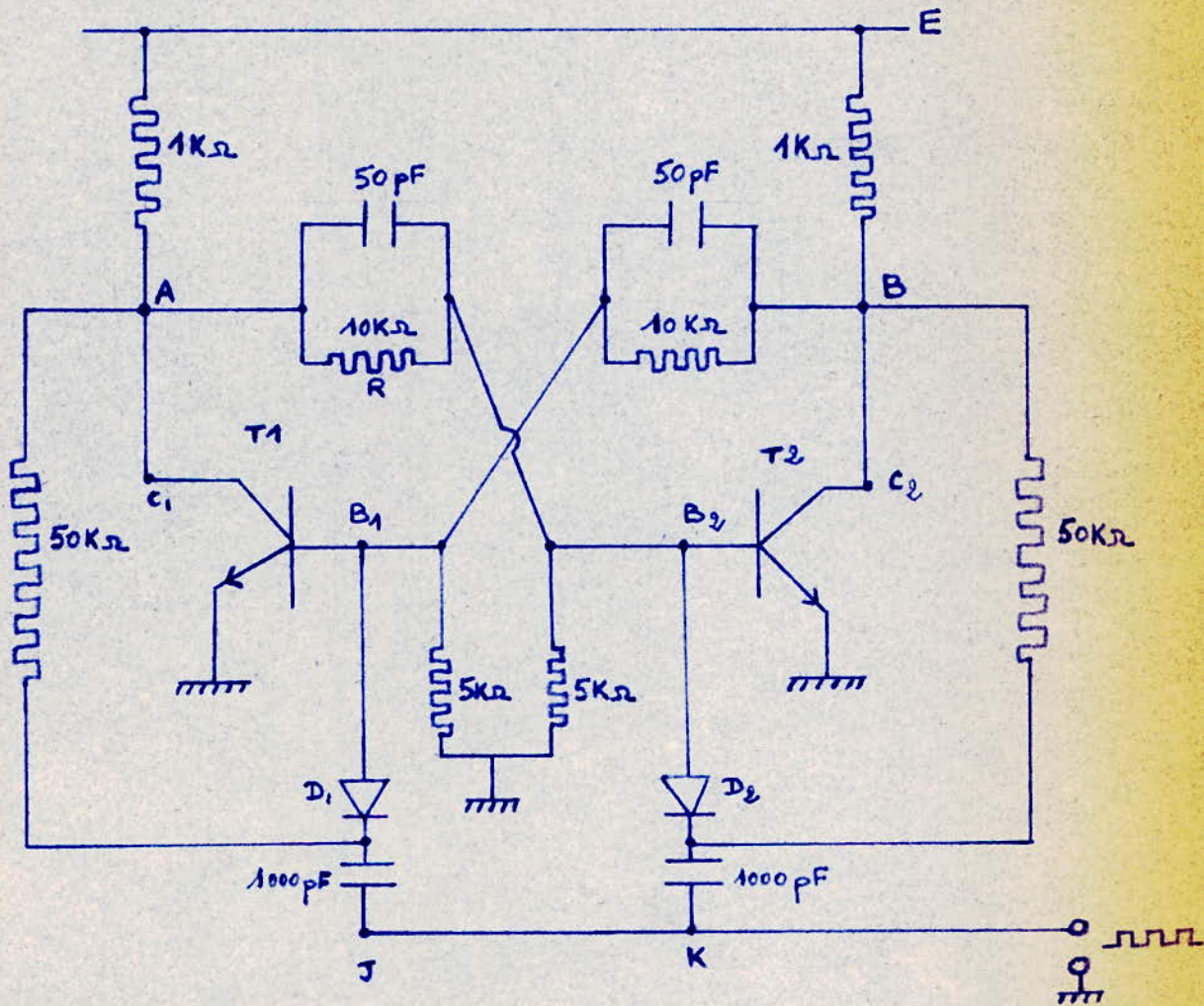
## Fonctionnement

Au repos  $T_3$  saturé,  $C$  se charge (au potentiel de **BT**) par l'intermédiaire de  $R \Rightarrow T_4$  est bloqué. Une impulsion négative transmise par  $D_3$  à  $B_3$  bloque  $T_3$  et sature  $T_4$ . Le condensateur  $C$  se décharge alors dans  $R_v$ , d'où saturation de  $T_3$  et blocage de  $T_4$  (état initial).

La durée de décharge de  $C$  correspond au retard du signal de sortie (donné en  $C_3$ ).

# LA BASCULE

(montage symétrique)



## Fonctionnement

Supposons  $T_1$  saturé et  $T_2$  bloqué  $\Rightarrow V_{c1} \approx V_{b1}$ . Une impulsion négative en K ne sera pas transmise (car  $T_2$  déjà bloqué). L'impulsion négative en J sera transmise par  $D_1$  vers  $B_1 \Rightarrow$  blocage de  $T_1$ .  $V_{c1}$  tend à augmenter, d'où impulsion positive en  $B_2$  (par  $R = 10\text{K}\Omega$ )  $\Rightarrow T_2$  se sature. Il y a eu donc basculement.

Dès qu'une impulsion se produit, le système bascule, c'est à dire que chacun des étages changent d'état et il y restera en attendant l'arrivée d'une autre impulsion.

#### 6-4 SCHEMA ET FONCTIONNEMENT DU SYSTEME PROPOSE .

##### A) DECOMPOSITION DU SYSTEME .

Cinq grandes parties :

- 1- Deux thyristors montés en têtes bêche pour laisser passer les 2 alternances de la tension. Deux transformateurs d'impulsions donnant aux secondaires une impulsion de 2 volts : tension d'amorçage.
- 2- Deux circuits de mise en forme, l'un ayant pour rôle, la transformation des signaux sinusoidaux de la source en créneaux ; l'autre, le maintient de l'allumage des thyristors.
- 3- Un univibrateur.
- 4- Une bascule.
- 5- Un circuit ET, devant ramener la bascule à son état initial.

##### B) FONCTIONNEMENT DU SYSTEME .

###### Etat initial de la bascule .

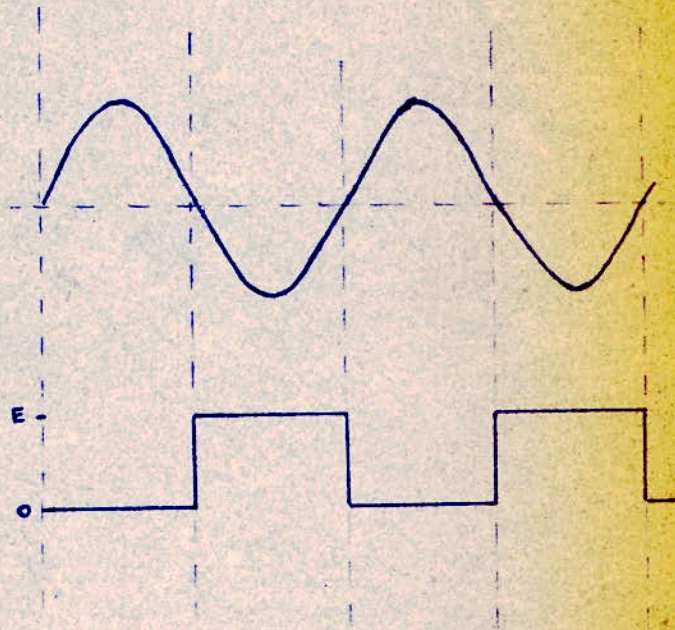
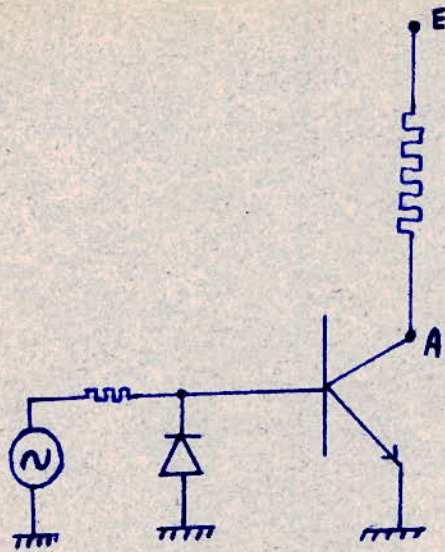
En appuyant sur le bouton poussoir M, l'entrée J de la bascule qui est initialement au potentiel BT, se met à la masse : cette brusque chute de tension se traduit par une impulsion négative qui va attaquer la base de T1 et donc bloquer ce dernier. Le potentiel du collecteur de T1 va donc augmenter et la base de T2 subit une impulsion positive, d'où saturation de T2.

L'état initial de la bascule sera donc : T1 bloqué, T2 saturé.

###### Mise en forme .

Voir le schéma en page suivante :

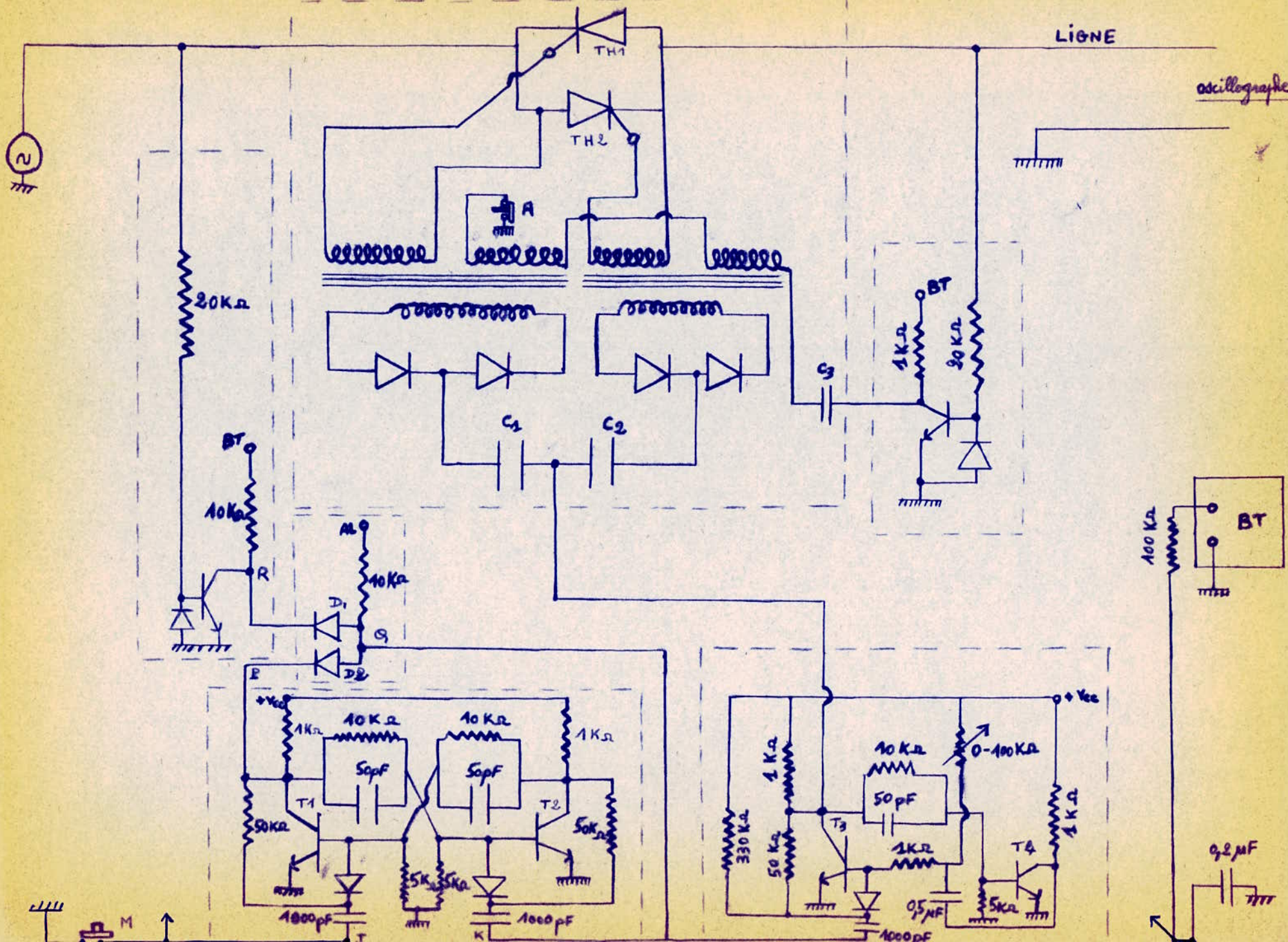
## MISE EN FORME



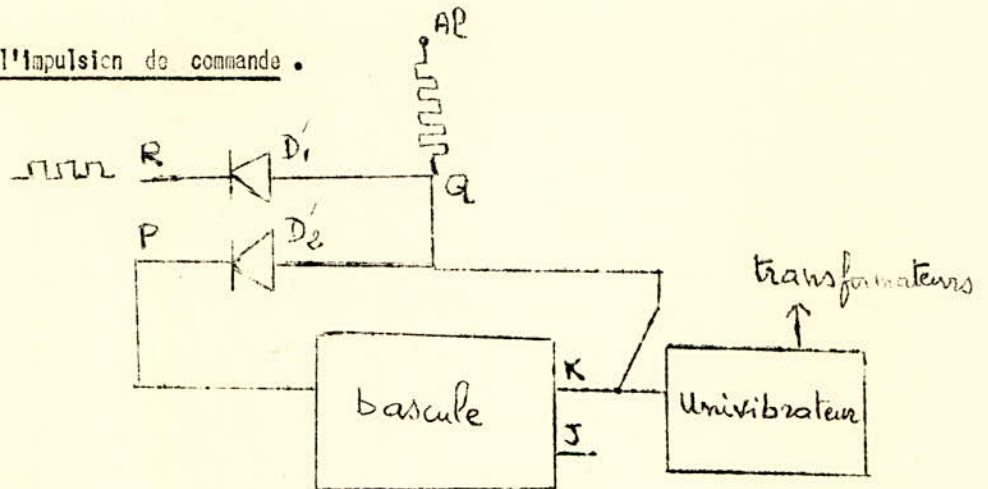
### Principe

L'alternance positive de l'onde sinusoïdale sature le transistor, il y a alors circulation d'un courant dans le collecteur, d'où chute de tension en A. L'alternance négative est transmise par la diode vers la terre, le transistor est donc bloqué, il n'y a pas de courant dans le collecteur et le point A est au potentiel E.





Naissance de l'impulsion de commande.



L'impulsion de commande naît à la sortie (Q) du circuit ET. P, étant la sortie de la bascule, se trouve au potentiel BT (car T1 bloqué). Lorsque R est au potentiel E, la porte Q est bloquée (car D1 et D2 le sont). Lorsque R passe de E à 0, D1 se débloque, d'où circulation d'un courant dans D1 et chute de potentiel en Q : d'où naissance d'une impulsion négative, qui va attaquer d'une part l'univibrateur et la bascule, d'autre part.

Une impulsion négative, sur la base de T2 (par l'entrée K de la bascule), bloque celui-ci et sature T1, d'où chute de tension en P ; la diode D2 se débloque alors, une impulsion positive (à travers D2) va attaquer la base de T2 et donc le saturer ce qui provoquera le blocage de T1 : la bascule retombe alors à son état initial.

Entre temps, l'impulsion négative qui attaque l'entrée de l'univibrateur, bloque T3 et sature T4, autrement dit fait passer l'univibrateur de son état stable (T3 saturé et T4 bloqué) à son état instable, et au bout du temps de réglage, l'impulsion négative est renvoyé vers les transformateurs d'impulsions.

RECAPITULATION ET FONCTIONNEMENT GENERAL DU CIRCUIT.

Nous venons de voir qu'une impulsion négative naît lors du front descendant de la sinusoïde mise en forme (donc lorsque l'onde sinusoïdale passe par zéro en venant des valeurs négatives).

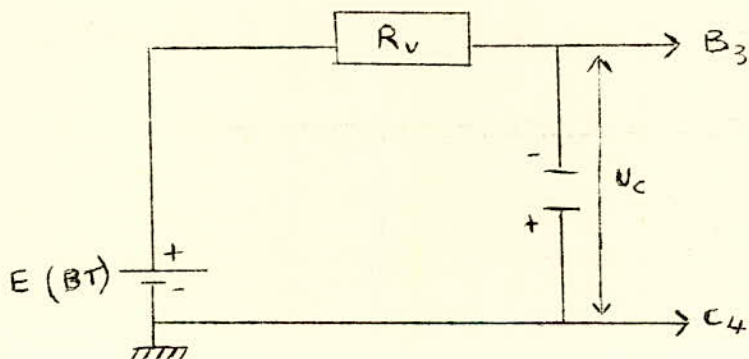
Cette impulsion négative, d'une part ramenait la bascule à son état initial, et d'autre part subissait un retard dans l'univibrateur pour être renvoyé vers les transformateurs d'impulsions. Là, on fait un repérage convenable des bornes équivalentes de chacun des 2 transformateurs, afin d'avoir toujours une impulsion positive sur chacune des gâchettes des thyristors. Suivant que c'est l'anode de l'un qui est positive (cas de l'alternance positive), ou la cathode de l'autre qui est négative, l'un des deux thyristors se débloquent et permet le passage de l'une des alternances. Cette dernière mise en forme par le deuxième circuit assurera l'allumage du second thyristor (par l'intermédiaire des transformateurs), donc le passage de l'autre alternance, laquelle à son tour jouera le même rôle que la précédente.

ON assiste donc, à la fin de chaque demi-période, à l'allumage d'un thyristor, lequel permettra le passage de la demi-période suivante.

Le bouton A permet la mise hors tension de la ligne, car il assure l'ouverture du circuit de maintien de l'allumage des thyristors, et par conséquent le blocage de ces derniers.

### C) REGLAGE DE L'UNIVIBRATEUR.

Nous avons vu précédemment que la notion de retard dans l'univibrateur était liée ou plus exactement égale à la durée de la décharge de la capacité C, cette durée peut être déterminée à l'aide du schéma équivalent suivant :



Dès que le transistor  $T_4$  conduit, l'intensité du courant dans le circuit équivalent vaut :

$$i = I e^{-t/R_V C}$$

Au temps  $t_1$ , on a : 
$$I = \frac{U_C + E}{R_V} = \frac{2E}{R_V}$$

Lorsque :  $V_{be_3} = 0$ , le temps  $t = t_2 - t_1$  est écoulé.

$V_{be_3}$  : étant la tension entre la base et l'émetteur de  $T_3$ .

$$U_{R_V} = E = R_V I e^{-t/R_V C}$$

soit :

$$U_{R_V} = E = R_V \left( \frac{2E}{R_V} \right) \cdot e^{-t/R_V C}$$

$$1 = 2 \cdot e^{-t/R_V C} \Rightarrow t = \ln 2 \times R_V C$$

$$t = 0,69 R_V C$$

Dans notre cas :

$$C = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ F} \quad R_V = \text{variable jusqu'à } 100 \text{ K}\Omega$$

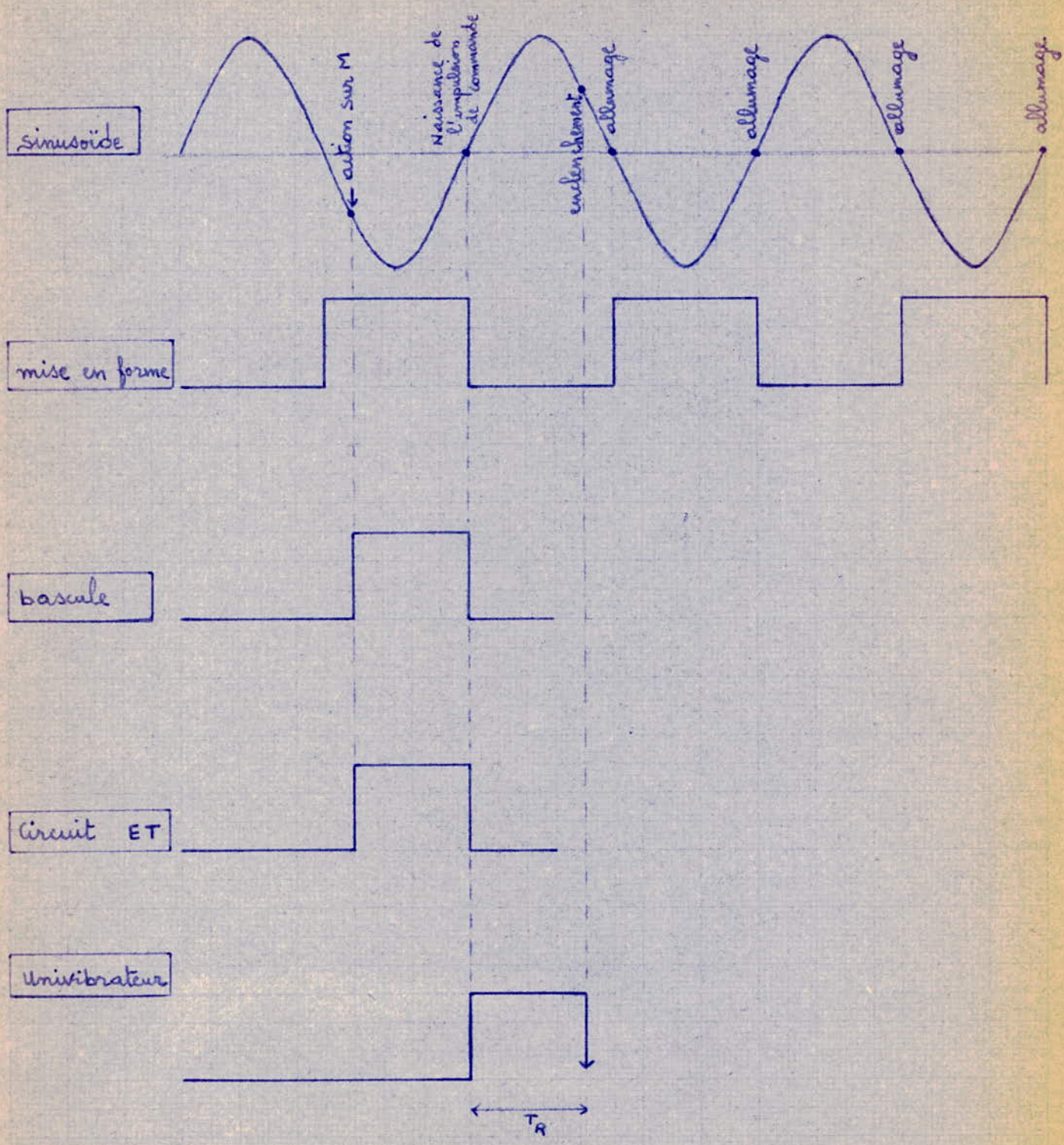
on aura :  $t = 0,69 \times 0,5 \cdot 10^{-6} \times 10^5 = 34,5 \text{ ms}$ .

$R_V$  nous permet donc le réglage du retard, pour des valeurs comprises entre 0 et 34,5 ms (on voit qu'on couvre largement une période de l'onde appliquée).

d'où :

$$R_V = \frac{t}{0,69 \cdot C}$$

# Etude graphique du circuit de commande.

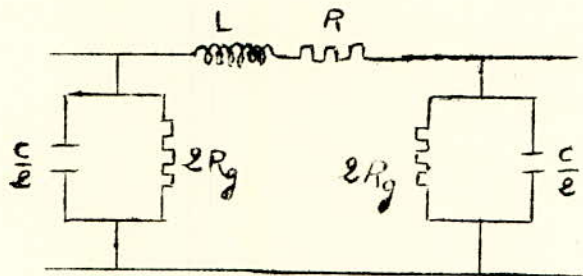


7-1 Présentation de la maquette de ligne .

Nous avons vu, lors de la réalisation de celle-ci, qu'elle était constituée de 10 cellules en  $\pi$ , montées en cascade, et qu'elle représentait 200 kms de ligne, soit :

$$\frac{200}{6000} = \frac{1}{30} \text{ de longueur d'onde .}$$

car la longueur de l'onde est voisine de :  $\frac{300000}{50} = 6000 \text{ kms}$



$$R = 5,5 \Omega$$

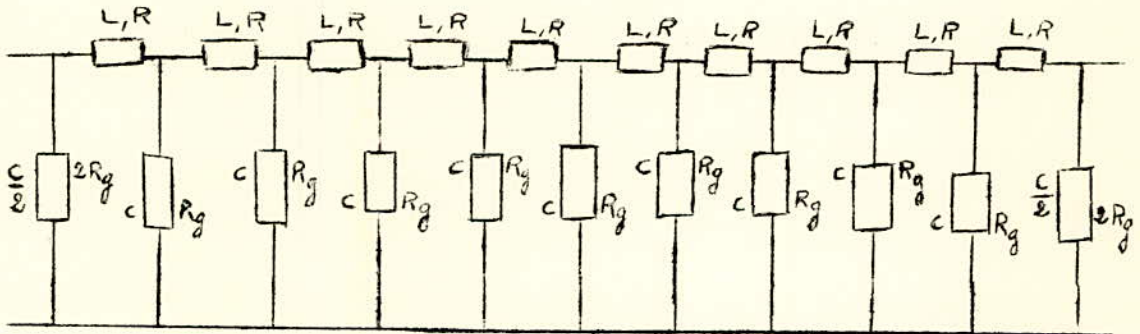
$$L = 40 \text{ mH}$$

$$C = 0,13 \mu\text{F}$$

$$R_g = 68 \text{ K}\Omega$$

Structure d'une cellule .

La résistance  $5,5 \Omega$  représente la résistance interne de la bobine . Cette dernière est constituée par un support en bois ( longueur = diamètre = 3,5 cms ) sur lequel est enroulé un fil de cuivre de 0,95 mm de diamètre, représentant 1000 spires .

STRUCTURE DE LA LIGNE .

L'ensemble des constituants de la ligne artificielle est contenu dans un ensemble en bois . Les bobines sont placées au dessous sur le fond du meuble dans une cage blindée en grillage conducteur que l'on reliera à la terre , afin de permettre l'écoulement des charges induites et de rendre négligeables , les inductances mutuelles entre bobines .

Sur le grillage est posée une plaquette de liaison , permettant les connexions internes et sur laquelle reposent les condensateurs et les résistances de pertes transversales .

Seuls l'entrée , la sortie et le milieu de la ligne ( de même que la terre ) ont été matérialisés par des bornes ménagées sur le couvercle .

#### REMARQUE :

Seuls les points de jonction de deux sections consécutives , correspondent à des points de la ligne réelle .

#### 7-2 Présentation du circuit de commande .

Cette maquette a été montée , suivant le schéma donné précédemment , sur une plaquette de plexiglas , comportant des bornes :

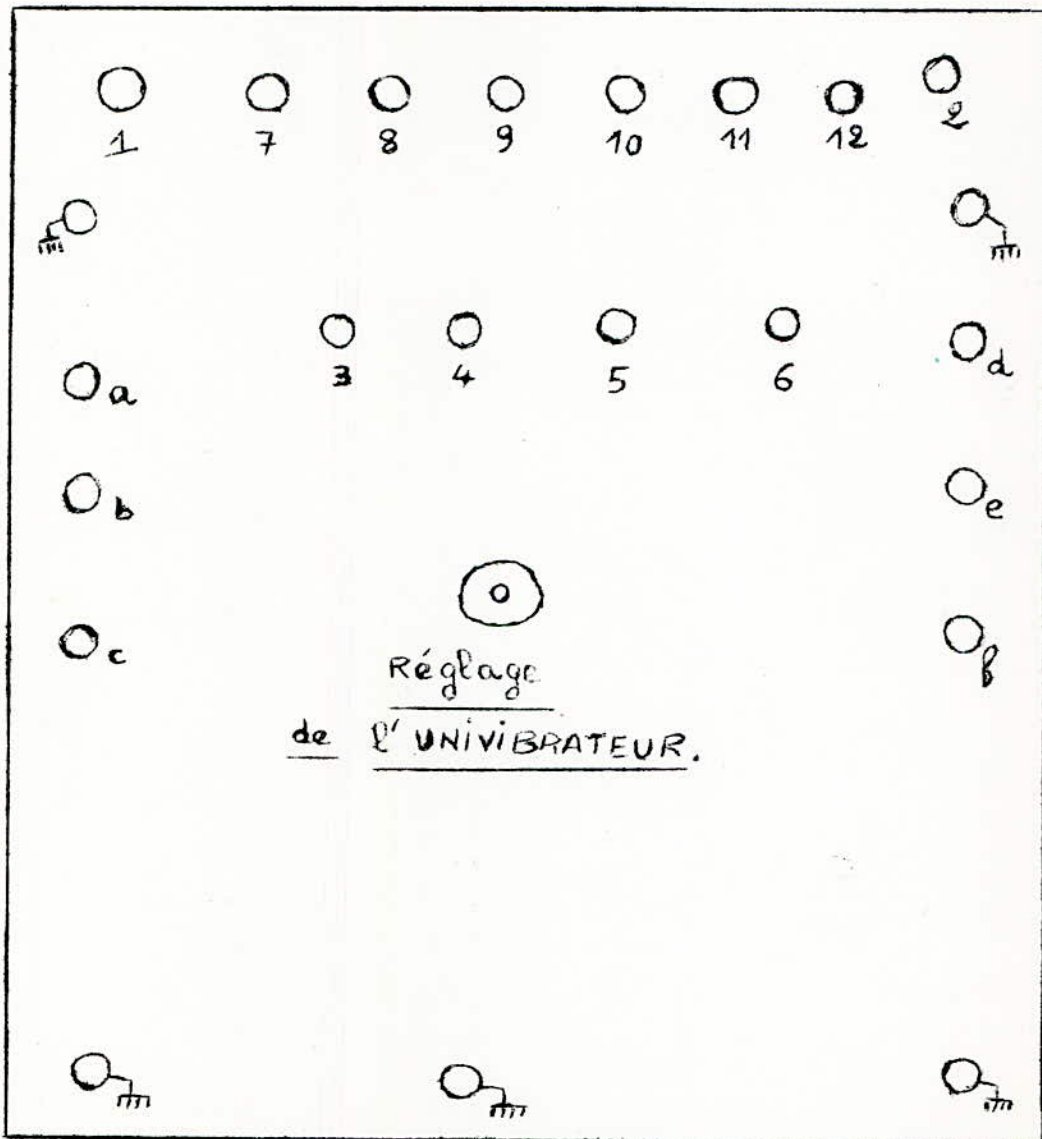
rouges : pour les alimentations des différents montages et pour les bornes des transformateurs d'impulsions .

bleues : pour la masse ( toutes ces bornes ont été reliées intérieurement ) .

#### Repérage des bornes .

- 1 - Signal d'entrée ( source ) .
- 2 - Entrée de la ligne .
- 3,4,5,6 - Primaires des transformateurs d'impulsions .
- 7,8,9,10,11,12 - Secondaires des transformateurs d'impulsions .

- a - Alimentation du premier circuit de mise en forme .
- b - Alimentation du circuit ET .
- c - Alimentation de la bascule .
- d - Alimentation du deuxième circuit de mise en forme .
- e - Alimentation de l'univibrateur .
- f - Alimentation BT pour l'initialisation de la bascule .





Caractéristiques des thyristors utilisés .

Type M 2N1595

Tension inverse de blocage :	50 V					
Courant direct efficace :	1,6 A					
Puissance maximale d'entrée :	0,1 W					
Puissance caractéristique minimale :	0,01 W					
Entrée :	<table> <tr> <td rowspan="2">{</td> <td>Courant direct ( pointe ) :</td> <td>0,1 A</td> </tr> <tr> <td>Tension directe ( pointe ) :</td> <td>10 V</td> </tr> </table> inverse	{	Courant direct ( pointe ) :	0,1 A	Tension directe ( pointe ) :	10 V
{	Courant direct ( pointe ) :		0,1 A			
	Tension directe ( pointe ) :	10 V				

La gachette répond à 10 mA

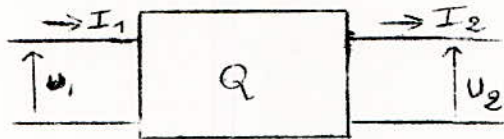
Caractéristiques des transistors utilisés .

Type 2N 2222 ( NPN )

Tension base-collecteur ( max ) :	60 V					
Courant maximum	<table> <tr> <td rowspan="2">{</td> <td>pointe :</td> <td>800 mA</td> </tr> <tr> <td>moyen :</td> <td>150 mA</td> </tr> </table>	{	pointe :	800 mA	moyen :	150 mA
{	pointe :		800 mA			
	moyen :	150 mA				
Gain en courant :	B 40					
Puissance totale à 100 °C :	0,5 W					

CHAPITRE 8 : ESSAIS SUR LA LIGNE .8-I Mesure de l'impédance caractéristique .Théorie :

Considérons un quadripole symétrique , on aura :



$$U_1 = A U_2 + B I_2$$

$$I_1 = C U_2 + A I_2$$

où  $\begin{bmatrix} A & B \\ C & A \end{bmatrix}$  est la matrice caractéristique du quadripole .

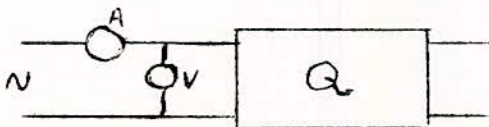
$$Z_0 = \left( \frac{U_1}{I_1} \right)_{I_2=0} = \frac{A}{C}$$

$$Z_{cc} = \left( \frac{U_1}{I_1} \right)_{U_2=0} = \frac{B}{A}$$

l'impédance caractéristique est telle que :  $Z_c = \frac{U_2}{I_2} = \frac{U_1}{I_1}$

$$Z_c = \frac{A U_2 + B I_2}{C U_2 + A I_2} = \frac{A Z_c + B}{C Z_c + A} \Rightarrow C Z_c^2 = B$$

d'où : 
$$Z_c = \sqrt{\frac{B}{C}} = \sqrt{Z_0 \cdot Z_{cc}}$$

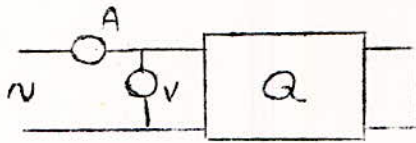
Manipulation .Essai à vide ;

$$V_1 = 30 \text{ v}$$

$$I_1 = 13,6 \text{ mA}$$

$$\text{d'où : } Z_0 = \frac{V_1}{I_1} = 2200 \Omega$$

Essai en court-circuit ;



$$V_1 = 30\text{V} \quad I_1 = 198 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow Z_{cc} = \frac{V_1}{I_1} = 151 \Omega$$

On a alors l'impédance caractéristique :

$$Z_c = \sqrt{Z_0 \cdot Z_{cc}} = 577 \Omega$$

$$Z_c = 577 \Omega$$

L'introduction d'un wattmètre dans le circuit, en vue d'obtenir l'argument de  $Z_c$  n'a rien donné, ce qui veut dire que  $Z_c$  se comporte comme une résistance.

Théoriquement,  $Z_c$  est une résistance et vaut :

$$Z_c = \sqrt{\frac{P}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-3}}{6,8 \cdot 10^{-9}}} = 540 \Omega$$

On voit que le résultat est assez satisfaisant, bien qu'il y ait une différence de  $37 \Omega$ . Cette dernière est due d'une part à l'imprécision de l'appareillage, et d'autre part à la non exactitude de  $\epsilon$  et  $c$ .

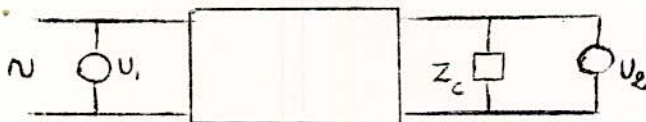
### 8-2 Mesure de la constante de propagation .

Elle est telle que :  $U_2 = U_1 e^N$

soit :

$$N = \ln \frac{U_2}{U_1}$$

Manipulation .



$$U_2 = 30\text{V}$$

$$U_1 = 26\text{V}$$

$$N = \ln \frac{U_2}{U_1} = \ln \frac{30}{26} = \ln 1,15 = 0,14$$

Soit par Km :  $n = \frac{0,14}{200} = 0,7 \cdot 10^{-3}$

$$n = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ nepers/Km}$$

CONCLUSION .

Cette étude nous aura permis de dresser un tableau sur le régime transitoire dans la ligne à vide .

Les hypothèses "lignes sans pertes ou lignes satisfaisant à la condition de HEAVISIDE" nous ont permis, à l'aide de relations relativement simples, d'expliquer le comportement de la ligne à vide, en régime transitoire . Pratiquement de telles lignes n'existent pas, aussi faut-il s'attendre à des divergences sensibles entre les résultats du calcul et ceux de l'expérience . En effet on n'aurait observé ni un front infiniment raide, ni un angle vif : les différences sensibles auraient été constatées aux passages des fronts, lesquels sont détériorés du fait de l'effet pelliculaire .

Il nous est très regrettable de n'avoir pas pu enregistrer ces courbes, l'oscillographe ayant fait défaut . On aurait alors eu une allure très schématique de la solution .

Ce qu'il faut surtout retenir, c'est que l'étude des phénomènes transitoires sur modèle est très délicate dans la mesure où elle nécessite des modèles précis (surtout en ce qui concerne les lignes) .

Dans le projet d'un futur réseau TH1, il faut prédéterminer les niveaux de surtensions qu'aura à subir le matériel et étudier les moyens appropriés permettant de limiter ces contraintes . Cette prédétermination peut être obtenue par différents procédés :

- \_ Essais réels sur des réseaux existants à tensions inférieures ;
- \_ Essais sur modèle analogique ;
- \_ Essais sur modèle numérique .

Dans ces 2 derniers cas, se évidemment le problème de la représentativité du réseau sur modèle, laquelle représentativité est encore à l'ordre du jour, vu son importance .

## BIBLIOGRAPHIE

- METZGER ( tome2) : Electronique des impulsions : circuits à constantes  
uniformément réparties .
- CAHEN ( tome 2 ) : Régimes transitoires .
- BULLETIN EDF : Serie B N° 3 ( 1970 ) .
- BRICHANT : Le thyristor .
- THALMANN : Electronique et radioélectricité .