

وزارة التعليم العالي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

ETUDE DE L'ATTENUATION
ET DE LA DISTORSION DE L'ONDE
DE Foudre PAR EFFET COURONNE

Proposé par :

Mr MAHFOUDI D.

Etudié par :

OULD AMROUCHE R.
MESSAOUDI B.

Dirigé par :

MAHFOUDI D.

REMERCIEMENTS

NOUS TENONS A REMERCIER MONSIEUR MAHFOUDI M. DJAFFAR POUR SON ENCADREMENT ET SES PRECIEUX CONSEILS, AINSI QUE MESSIEURS BOUBEKEUR ET MEKHALDI AINSI QUE Mme FERRAS POUR LES CORRECTIONS QU'ILS ONT APPORTES A CETTE ETUDE.

NOUS REMERÇONS AUSSI TOUS CEUX QUI ONT CONTRIBUE A NOTRE FORMATION. NOUS REMERÇONS ENFIN TOUS CEUX QUI DE LOIN OU DE PRES ONT COLLABORE POUR L'ELABORATION DE NOTRE TRAVAIL ET PARTICULIEREMENT O.SAID ET D.DALILA

OULD AMROUCHE RAMDANE

MESSAOUDI BRAHIM

S O M M A I R E

INTRODUCTION .

CHAPITRE I: LA Foudre

I.1: INTRODUCTION .

I.2: NATURE .

I.3: MODES D'ACTION DE LA Foudre SUR LES LIGNES .

I.3.1: COUPS DE Foudre DIRECTS .

I.3.2: COUPS DE Foudre INDIRECTS .

CHAPITRE II: EFFET COURONNE .

II.1: INTRODUCTION .

II.2: TENSION SEUIL D'APPARITION DE L'EFFET COURONNE

II.3: PERTES DUES A L'EFFET COURONNE .

II.4: METHODE DE REDUCTION DES PERTES DUES A L'EFFET COURONNE.

II.5: CONCEPTION D'UNE LIGNE BASEE SUR L'EFFET COURONNE .

II.6: INCONVENIENTS DE L'EFFET COURONNE .

II.7: AVANTAGES DE L'EFFET COURONNE .

CHAPITRE III: ANALYSE DE L'ATTENUATION ET LA DISTORSION DE L'ONDE
PAR L'EFFET COURONNE .

II.1: INTRODUCTION .

III.2: METHODE DES ECHANTILLONS EN LABORATOIRE .LES CYCLES (Q,U)

III.2.1: SCHEMA DE PRINCIPE .

III.2.2: PRINCIPE DE L'ETUDE.

III.2.3: MODELISATION DE L'EFFET COURONNE .

III.3: ANALYSE DES CYCLES (Q,U) .

CHAPITRE IV : INTERPRETATION DE LA DEFORMATION DE LA PROPAGATION LE LONG
DE LA LIGNE .

IV.1: INTERPRETATION : RETARD DE PROPAGATION .

IV.2: INTERPRETATION : DISSIPATION DE L'ENERGIE .

IV.3: COURBE (Q,U) ET EQUATION DE PROPAGATION .

IV.4: SOLUTION DES EQUATIONS DE PROPAGATION .

DISCUSSION .

CONCLUSION .

INTRODUCTION

Parmi les problemes majeurs preoccupant les specialistes en hautes tensions, autant economiquement que scientifiquement on peut citer celui des surtensions, definies comme etant des niveaux de tensions anormaux se produisant dans les circuits electriques. Ces surtensions sont susceptibles d'endommager les lignes, les machines et meme les postes electriques dans certains cas. mais peut on parler de Haute tension sans citer la foudre qui est un phenomene atmospherique, capable de causer d'enormes degats aussi bien materiels qu'humains.

Cette decharge peut frapper directement une ligne de Haute tension entrainant l'apparition d'une surtension, qui se propagera le long de la ligne sous forme d'onde.

L'onde, engendre un effet couronne tres important ce qui se traduit par une perte d'energie considerable et, par consequent, amene une reduction progressive de l'amplitude de l'onde, qui au bout d'un parcours de quelques kilometres se trouvera attenuée et distordue, d'ou l'objet de cette etude. Ce phenomene, qui est du a l'effet couronne, sera d'un effet benefique, dans le sens ou il reduit les contraintes dans les postes, par rapport aux valeurs que l'on utilise .

INTRODUCTION .

Des les premiers debuts des transports de l'energie electrique , les ingenieurs ont ete confrontes a la foudre et a ses effets sur leurs ouvrages ,que ce soient les lignes ou les postes d'extremites (postes de transformation, disjoncteurs...). Ils se sont rapidement apercus que ce phenomene atmospherique constitue l'une des contraintes majeures dont il fallait tenir compte .

On sait fort bien ,q'un coup de foudre tombant sur les cables d'une ligne aerienne entraine presque toujours un defaut qui, bien que fugitif, necessite le declenchement de la ligne . les perturbations de ce type sont heureusement beaucoup plus frequents que les degats proprement dits, dont on a appris a se proteger par des eclateurs ou des parafoudres, surtout dans le cas des reseaux a haute tension . On sait egalement qu'on peut reduire notablement le nombre de defauts par un aménagement convenable des lignes, consistant en l'installation de cables de garde et en une reduction de la resistance de prise de terre du pylone.

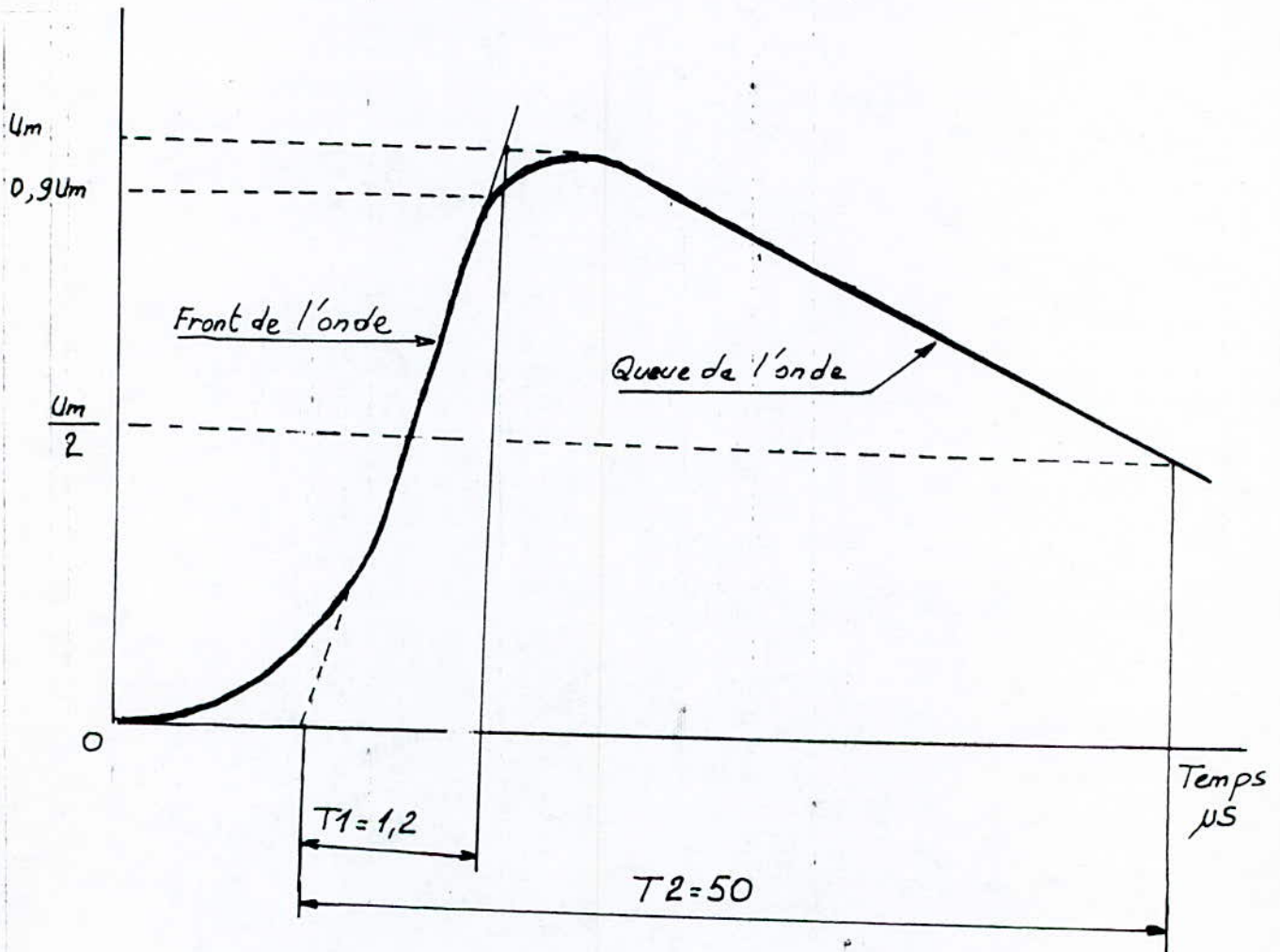
NATURE ET COMPORTEMENT DE LA Foudre

La foudre est une décharge électrique se produisant soit entre deux nuages, soit entre un nuage et le sol. Les décharges entre nuages et sol sont négatives dans 90% des cas; elles semblent se comporter comme des étincelles partants d'une plaque négative, qui frappent presque uniquement les points de l'électrode opposée à cette plaque où le champ électrique est le plus intense, c'est à dire les points à faible rayon de courbure ou s'avancant en avant de l'électrode.

C'est ainsi que les décharges de la foudre étant plus souvent négatives frappent de préférence les arbres, les pylônes et les fils des lignes électriques. Les potentiels des nuages orageux atteignent des valeurs de l'ordre de centaines de millions de volts; par contre le champ électrique au voisinage du sol pendant les orages reste relativement modéré, de l'ordre de 5 à 10 kV/m. L'intensité de courant, atteinte pendant la décharge, varie dans de très grandes proportions; il semble que les plus grandes valeurs soient de l'ordre de 200 kA et que les coups de foudre importants et assez fréquents correspondent à une valeur de 20 000 à 50 000 A. Toutes les décharges sont unidirectionnelles, avec une forme se rapprochant de l'onde type (Biexponentielle).

Onde de tension de foudre normale 1,2/50 μ S ou
onde choc de tension "selon les normes CEI"

Tension



- MODE D'ACTION DE LA Foudre SUR LES LIGNES ELECTRIQUES .

- Coup de foudre direct.

C'est le cas ou la decharge atteint directement ,soit un fil de la ligne , soit les trois fils simultanement .Les decharges electriques penetrantes dans la ligne ,s'y ecoulent dans deux sens ,en developpant un potentiel proportionnel au courant et a l'impedance caracteristique, resultante de l'ensemble des fils parcourus .

Remarquons que, dans le cas general, le potentiel en un point frappe par la foudre ,depend de l'impedance opposee au passage du courant; si cette impedance est tres grande le potentiel sera tel que l'objet frappe sera mis en miettes ou volatilise .

L'onde produite au point d'impact d'amplitude V_1 circule dans la ligne dans les deux sens .Les premiers isolateurs qu'elle atteint sont contournes et une partie de la decharge s'ecoule a la terre par le pylone metallique ,l'amplitude de l'onde transmise au dela etant alors reduite a la valeur V_2 de la tension de contournement des chaines d'isolateurs; il peut y avoir plusieurs isolateurs successifs contournes ,et a partir du dernier l'amplitude de l'onde est reduite a cette valeur V_2 .

Mais cette tension correspond a un effet couronne tres important, qui provoque une perte d'energie considerable, proportionnelle au carre de la difference $(V_2 - V_c)$, V_c etant la tension critique d'apparition de l'effet couronne, cette perte d'energie amene une reduction progressive de l'amplitude de l'onde qui au bout d'un parcours de quelques kilometres, est ramenee a une valeur V_2 depassant seulement de quelques centiemes la tension V_c .

Le coup de foudre direct presente des dangers considerable pour les organes de la ligne, fil qui peut etre volatilisee au point d'impact, chaines d'isolateurs detruites par un arc de contournement trop violent, et pour les elements des postes se trouvant assez rapproches du point d'impact pour que les causes de reduction de l'amplitude de l'onde n'aient pas eu la possibilite de jouer.

2- COUP DE FODRE INDIRECT

Lorsque la foudre frappe directement un pylone metallique ou un fil de garde, la decharge s'ecoule a la terre sous forme d'onde parcourant dans les deux sens le fil atteint et les pylones qui y sont relies. Le potentiel atteint par le pylone depend de la valeur du courant qui le parcourt et de l'impedance apparrente offerte par le pylone.

Cette impédance est surtout constituée par la résistance de terre du pylône; lorsque cette résistance est importante, alors le potentiel atteint par le sommet du pylône est suffisant pour que les chaînes d'isolateurs soient contournées à l'envers, de la traverse vers la ligne, et qu'une onde mobile soit ainsi injectée dans la ligne, avec une amplitude au moins égale à la tension de contournement de la chaîne. Cette onde parcourt alors la ligne dans les deux sens et y subit l'amortissement dû aux diverses pertes d'énergie, dont la seule importante est celle de l'effet couronne.

L'amplitude des ondes d'origine indirecte se trouvant pratiquement limitée à la tension de contournement des chaînes d'isolateurs, ces ondes sont beaucoup moins redoutables que celle provenant du coup de foudre direct.

le toronage, les éraflures, les dépôts de poussières, de rouille, de pollution industrielle, voire de petits insectes. Toutes ces aspérités de nature diverses créent un renforcement local du champ électrique (gradient superficiel) et ont pour conséquence une réduction du niveau de la tension d'apparition des aigrettes. On voit donc apparaître, dès maintenant l'influence notable de l'état de surface qui sera introduit dans les calculs par l'intermédiaire d'un coefficient.

C'est l'importance du champ électrique à proximité d'un conducteur qui est à l'origine de l'ionisation du gaz en particulier dans les régions de fortes courbures (effet de pointes).

Il existe un grand nombre de modes d'émission de charges dues à l'ionisation des gaz, mais le phénomène fondamental est toujours la dissociation des atomes en électrons et ions positifs. Les charges de signe opposée à celle du conducteur sont immédiatement attirées vers celui-ci et sont neutralisées, alors les charges de même signe sont repoussées vers l'extérieur par le champ électrique et comme ils ne restent jamais libres et s'attachent rapidement à des atomes ou molécules neutres pour former des ions négatifs. tout se passe comme si le conducteur émettait, sous l'effet du phénomène d'ionisation, des ions de même polarité que lui (négative).

Chapitre II : Effet Couronne

1- Introduction :

Lorsqu'un fil mince de quelques millimètres de diamètre est porté à une tension suffisante il se forme autour de lui une gaine lumineuse de couleur bleu-violette dont l'épaisseur augmente avec la tension appliquée. C'est la présence de cette lueur uniforme, autour du conducteur, qui a donné naissance à l'expression "EFFET COURONNE".

Les premières expériences sur l'effet couronne datent du début du siècle ; le chercheur américain F.W.PEEK, considéré comme étant le véritable pionnier de l'étude scientifique sur l'effet couronne, qui vers 1920 établit une loi empirique exprimant le seuil d'apparition de la lueur, loi célèbre encore en usage.

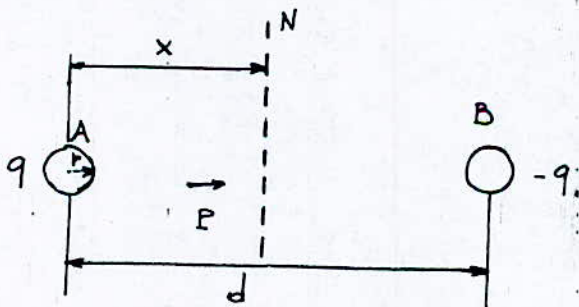
Pour les conducteurs utilisés sur les lignes de transport d'énergie, l'effet couronne perd cet aspect de gaine lumineuse uniforme ; il se discretise en lueur localisée, désignée par le nom d'"aigrettes". Cette discretisation, est grandement favorisée dans le cas des conducteurs industriels par la présence des irrégularités de surface telles que

Mais si la curiosité scientifique fut sans doute la motivation originale des chercheurs, les premiers transports d'énergie à haute tension montrèrent rapidement que l'effet couronne était une source de pertes, et ce furent alors les préoccupations d'ordre économique qui inciterent à poursuivre les recherches et à approfondir l'étude des mécanismes mis en jeu.

II- TENSION SEUIL D'APPARITION DE L'EFFET COURONNE :

Considérons une seule phase d'une ligne de transport d'énergie, soit r le rayon de chaque conducteur, et d la distance séparant les conducteurs de sorte qu'on ait $d \gg r$, et soit q la charge électrique répartie par unité de longueur sur le premier conducteur et $-q$ sur le second conducteur. Si la différence de potentiel entre les deux conducteurs est V , et en considérant le plan N où la tension est nulle, le potentiel de A est $V/2$ et celui de B est $-V/2$. Considérons un point P , situé à une distance x du conducteur A , point où l'on veut déterminer l'intensité du champ électrique [4]

En p on place une charge unité positive.



Le champ électrique du au conducteur A sera repulsif et celui du a B sera attractif .

L'expression du champ électrique en P sera alors :

$$- E_x = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 x} + \frac{q}{2\pi\epsilon_0 (d-x)} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{x} + \frac{1}{d-x} \right]$$

La difference de potentiel entre les deux conducteurs est :

$$- V = - \int_{d-r}^r E_x dx = \int_r^{d-r} \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{x} + \frac{1}{d-x} \right] dx$$

$$= \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left[\ln x - \ln(d-x) \right]_r^{d-r}$$

$$= \frac{q}{2\pi\epsilon_0} 2 \ln \frac{d-r}{r} = \frac{q}{\pi\epsilon_0} \ln \frac{d-r}{r} \quad (2.1)$$

Sachant que r est tres petit devant d d'ou $d-r \approx d$

$$V = \frac{q}{\pi\epsilon_0} \ln \frac{d}{r} \quad (2.2)$$

L'expression du champ E_x a une distance x du centre du conducteur a est donnee par:

$$E_x = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{d}{x(d-x)}$$

tirant q a partir de l'equation de V on a:

$$q = \frac{\pi\epsilon_0 V}{\ln \frac{d}{r}}$$

en remplaçant dans l'expression de E_x on obtient:

$$E_x = \frac{\pi\epsilon_0 V}{\ln \frac{d}{r}} \cdot \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{d}{x(d-x)}$$

$$= \frac{V}{2 \ln \frac{d}{r}} \cdot \frac{d}{x(d-x)}$$

$$= \frac{V' \cdot d}{x(d-x) \ln \frac{d}{r}} \quad \text{avec } V' = \frac{V}{2} \quad (2.3)$$

L'intensite du champ est maximale pour $x=r$ c-a-d a la surface du conducteur

$$E_r = E_{\max} = \frac{V' \cdot d}{r(d-r) \ln \frac{d}{r}} \approx \frac{V'}{r \ln \frac{d}{r}}$$

Alors :

$$V' = r E_{max} \cdot \ln \frac{d}{r}$$

La tension disruptive est définie comme étant une tension à partir de laquelle apparaît une disruption complète du diélectrique. Pour ce niveau de tension, l'intensité du champ électrique à la surface du conducteur est égale à la rigidité diélectrique de l'air et est notée $E_0 = 30 \text{ kV/cm}$ (à 20°C et à 760 mm de Hg). À une température et à une pression quelconque :

$$E_{max} = E_0 \delta \quad (2.5)$$

ou δ est le facteur de correction de la densité de l'air qui est donné par l'expression suivante :

$$\delta = \frac{3,92b}{273+t} \quad (2.6)$$

b: pression barométrique exprimée en cm de mercure (Hg)

t: température en degré Celsius ($^\circ\text{C}$)

Cependant l'expression de la tension critique est :

$$V' = r E_0 \delta \ln \frac{d}{r}$$

(2.7)

Quand la tension appliquée est proche de la valeur de la tension critique, l'effet couronne débute mais n'est pas visible parce que les ions entourants le conducteur doivent recevoir une certaine quantité finie d'énergie pour causer d'autres ionisations par collisions.

Pour un champ radial, il doit atteindre une valeur E_v à la surface du conducteur pour que le champ atteigne une valeur E_0 à une distance finie de la surface du conducteur.

La distance entre E_v et E_0 est appelée "distance-énergie". Selon PEEK, cette distance est égale à $(r+0,301\sqrt{r})$ pour deux conducteurs parallèles, $(r+0,308\sqrt{r})$ pour des conducteurs coaxiaux.

Il est clair que E_v n'est pas aussi constante que E_0 , E_v est fonction de la taille du conducteur :

$$E_v = E_0 \delta \left[1 + \frac{0,3}{\sqrt{r \delta}} \right] \quad (\text{kV/cm})$$

(2.8)

Cette relation est valable pour deux conducteurs en parallèle.

Si V_c est la tension critique visuelle alors :

$$V_c = E_v \cdot r \cdot \ln \frac{d}{r}$$

Principe de l'étude :

Le principe de l'étude consiste à appliquer une surtension $V(t)$ à un échantillon de conducteur d'une quinzaine de mètres de longueur, et à mesurer la charge d'espace $q(t)$ injectée par effet couronne dans son voisinage. À partir de l'analyse de la relation expérimentale $q=f(u)$ on peut déterminer par le seul calcul l'atténuation supplémentaire de propagation et la déformation subie par l'onde.

Pratiquement on relève un cycle charge-tension à plusieurs niveaux de tension.

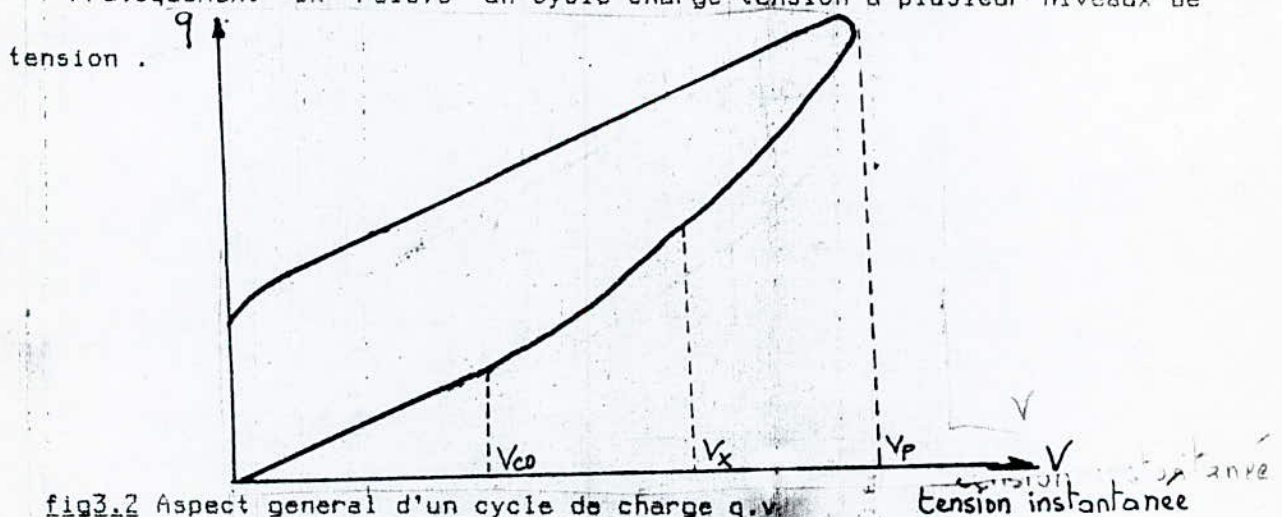


fig3.2 Aspect general d'un cycle de charge q, v

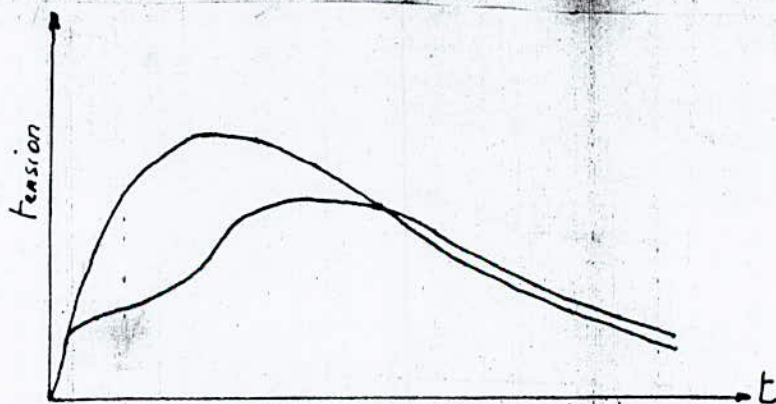


fig3.3 Atténuation et distorsion de l'onde.

MODELISATION DE L'EFFET COURONNE

Le developpement d'un modele simulant l'effet couronne doit remplir deux conditions :

- La reponse du modele doit suivre les courbes $Q-V$ experimentales.
- Le modele doit etre suffisamment simple pour permettre une simulation analogique et numerique. [2]

Un circuit approprie pour le modele est donne par la figure suivante [2]:

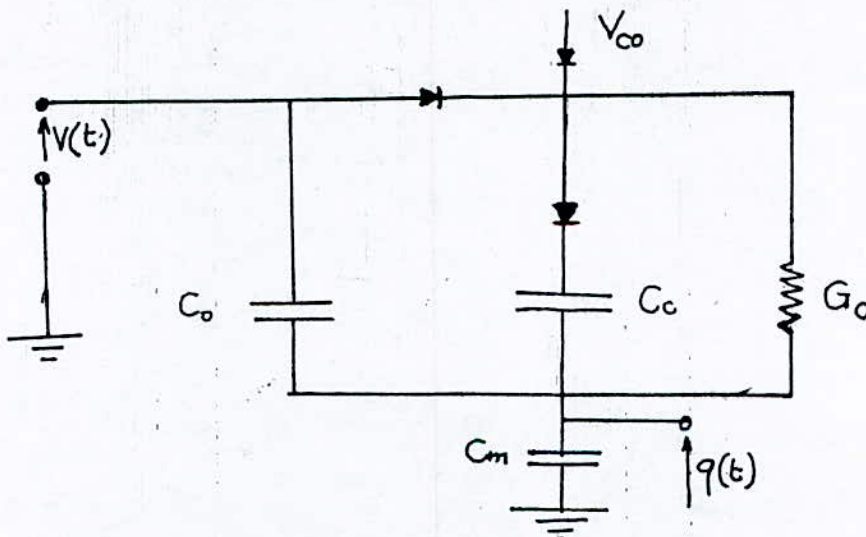


fig. 3.4. Modele de l'effet couronne

- C_c : capacite supplementaire introduite par l'effet couronne.
- C_o : capacite geometrique du conducteur.
- G_c : conductance representant la liaison avec la terre, formee par les charges d'espace en mouvement.
- C_m : Capacite de mesure.

Quand une impulsion, de valeur de crête V_{cr} , est appliquée au circuit, la charge $q(t)$ dans la capacité C_m augmente linéairement avec la tension appliquée $V(t)$, et ceci, tant que $V(t)$ reste inférieure à la valeur de la tension seuil d'apparition de l'effet couronne V_{co} . Le premier segment de la courbe $q-v$ obtenue a une pente correspondant à la capacité C_o .

Dès que la tension seuil V_{co} est excédée, deux éléments C_c et G_c entrent dans le circuit. Les techniques digitales ont montré que G_c n'a pas d'influence sur cette partie de la courbe, celle-ci aura, donc, pour pente C_c .

Quand la tension de crête V_{cr} est dépassée et pour des tensions $V_o < V(t) < V_p$, G_c reste seule en parallèle avec C_o . Pour cet interval de la tension, la courbe a une pente négative et approximativement égale à C_o , et dès que la tension devient inférieure à V_{co} , la courbe suit à nouveau une pente égale à C_o .

ANALYSE DES CYCLES Q-V

Pour pouvoir poursuivre l'analyse des cycles, on a été conduit à faire une schématisation par une succession d'approximation linéaire.

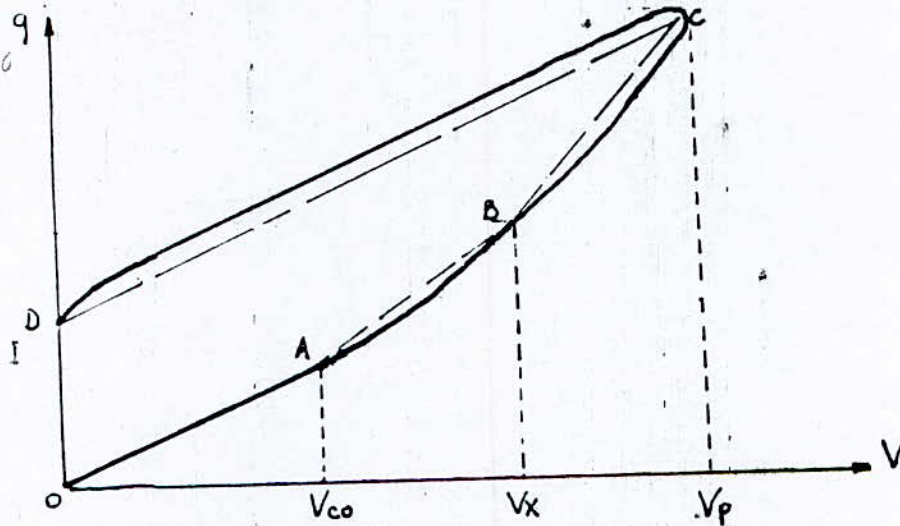


fig 3.5 Approximation linéaire d'un cycle q-v

L'observation des diagrammes expérimentaux montre qu'une telle schématisation théorique est acceptable. La phase de croissance de la tension est décrite par trois segments rectilignes (OABC) et la phase de décroissance par un seul segment (CD).

a/ La droite OA correspond à la zone de tension inférieure à la tension critique V_{co} ; sa pente "q/v" est donc égale à la capacité géométrique C.

Alors
 b/ Le domaine (ABC) du cycle correspond a la phase d'activite couronne, au cours de laquelle les charges d'espaces sont crees. La pente du segment (AB) fournit une capacite dynamique "couronne" notee $F1(V)$, de meme pour la pente du segment qui fournit la capacite $F2(V)$. Les deux capacites dependent toujours de la tension appliquee. Il est vraisemblable que l'existence du segment d'ionisation (BC) correspond a une transition "streamer-leader" et au developpement leader.

$$E_{max} = E_0 \delta$$

Remarque : Les cycles des conducteurs de faible diametre ne presentent pas de coude en "B" et par consequent, la partie representant l'activite couronne du cycle est representable par un seul segment. Pour les gros conducteurs, ce coude existe systematiquement en polarite positive et seulement pour les chocs de plus forte amplitude en polarite negative.

$$\delta = \frac{3,926}{273 + t}$$

c/ Domaine de decroissance de la tension: Il peut etre caracterise par le segment (CD), dont la pente fournit une capacite notee $F3(V)$ qui est sensiblement egale a la capacite geometrique, C , du conducteur. Le segment (CD) est parallele au segment (OA).

L'interpretation physique de ce fait est la suivante :

$$V = r E_0 \delta L_n \frac{d}{r}$$

Alors :

$$V' = r E_{\max} \ln \frac{d}{r}$$

A une temperature et a une pression quelconque :

$$E_{\max} = E_0 \delta$$

ou est la densite relative de l'air et est donnee par l'expression suivante :

$$\delta = \frac{3,92b}{273+t}$$

(2.6)

b: pression barometrique exprimee en cm de mercure (Hg)

t: temperature en degre Celsius ($^{\circ}\text{C}$)

Pendant l'expression de la tension critique est :

$$V' = r E_0 \delta \ln \frac{d}{r}$$

(2.7)

Quand la tension appliquée est proche de la valeur de la tension critique, l'effet couronne débute mais n'est pas visible parce que les ions entourants le conducteur doivent recevoir une certaine quantité finie d'énergie pour causer d'autres ionisations par collisions.

Pour un champ radial, il doit atteindre une valeur E_v à la surface du conducteur pour que le champ atteigne une valeur E_0 à une distance finie de la surface du conducteur.

La distance entre E_v et E_0 est appelée "distance-énergie". Selon PEEK, cette distance est égale à $(r+0,301\sqrt{r})$ pour deux conducteurs parallèles, $a(r+0,308\sqrt{r})$ pour des conducteurs coaxiaux.

Il est clair que E_v n'est pas aussi constante que E_0 , E_v est fonction de la taille du conducteur :

$$E_v = E_0 \delta \left[1 + \frac{0,3}{\sqrt{r \delta}} \right] \quad (\text{kV/cm})$$

(2.8)

Cette relation est valable pour deux conducteurs en parallèle.

Si V_c est la tension critique visuelle alors :

$$V_c = E_v \cdot r \cdot \ln \frac{d}{r}$$

15

Le gradient du potentiel pour un conducteur d'une ligne sera en consequence superieur a celui du conducteur lisse equivalent, donc la tension seuil pour un conducteur en faisceaux de brins sera inferieure a celle d'un conducteur lisse.

Les irregularites sur la surface d'un tel conducteur sont augmentees du fait du depot de la rouille et de la poussiere sur la surface, ceci reduisant encore plus la tension d'apparition de l'effet couronne. Le rapport moyen de cette tension correspondant a un tel conducteur et un conducteur lisse est compris entre 0.85 et 1 et il est note m_0 .

Des valeurs de m_0 sont donnees ci-dessous

-Cable lisse : $m_0 = 1$

-Cable rugeux : $m_0 = 0.83 - 0.98$

-Cable a 7 faisceaux : $m_0 = 0.83 - 0.87$

-Cable avec plus de 7 faisceaux : $m_0 = 0.9$

L'expression finale pour la tension critique d'apparition de l'effet couronne, en tenant compte des conditions atmospheriques et de l'etat de la surface du conducteur est donnee par :

$$V' = r E_0 \delta m_0 \ln \frac{d}{r} \text{ (kV)} \quad (2.9)$$

$$E_v = \frac{V_v}{r \ln \frac{d}{r}} = E_0 \cdot \delta \cdot \left[1 + \frac{0,3}{\sqrt{r \cdot \delta}} \right] \quad (\text{kV/cm})$$

$$V_v = r E_0 \cdot \delta \cdot \left[1 + \frac{0,3}{\sqrt{r \cdot \delta}} \right] \cdot \ln \frac{d}{r} \quad (2.10)$$

Dans le cas où le facteur d'irrégularité, m , est pris en considération :

$$\begin{aligned} V_v &= E_0 m_0 \delta \cdot r \left[1 + \frac{0,3}{\sqrt{r \cdot \delta}} \right] \ln \frac{d}{r} \\ &= 21,2 m_0 \delta r \left[1 + \frac{0,3}{\sqrt{r \cdot \delta}} \right] \ln \frac{d}{r} \quad (\text{kV}) \quad (2.11) \end{aligned}$$

où r est le rayon du conducteur, en cm

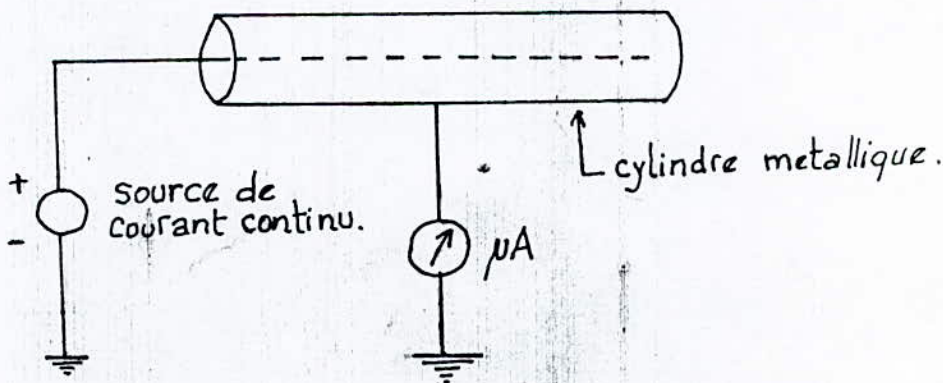
Cette expression de la tension d'apparition de l'effet couronne est donnée pour le cas du beau temps. L'approximation des pertes pour un mauvais temps est obtenue en multipliant par 0,8 le deuxième membre de cette expression.

Puisque la surface du conducteur est irrégulière, l'effet couronne ne débute pas simultanément sur toute la surface mais en des lieux différents du conducteur. Ceci est appelé l'effet couronne local.

III- PERTES DUES A L'EFFET COURONNE

Les ions produits par le champ électrique constituent des charges spatiales (charges d'espace) qui se déplacent autour du conducteur. L'énergie nécessaire aux charges pour rester en mouvement est fournie par le générateur de choc. Il est nécessaire de fournir une énergie additionnelle par le générateur de choc. Cette énergie correspond aux pertes par effet couronne.

Un banc d'essai peut être utilisé pour mesurer les pertes couronne dans le cas du courant continu dans un cylindre :



PEEK a realise un certain nombre d'experiences pour etudier l'effet des parametres sur les pertes dues a l'effet couronne, et a deduit la relation empirique suivante:

$$P = 241 \cdot 10^{-5} \frac{(f+25)}{\delta} \sqrt{\frac{r}{d} (V_p - V_0)^2} \text{ kW/km / phase}$$

f est la frequence du generateur de la centrale de production d'energie electrique, δ est le facteur de correction de la densite de l'air, V_p est la tension de service en kV, V_0 est la tension seuil d'apparition de l'effet couronne.

L'equation est donnee pour le cas du beau temps. L'approximation des pertes pour un mauvais temps est obtenue en multipliant par 0.8 la valeur de V_0 au cas du beau temps.

Avec un conducteur parfaitement lisse et cylindrique, il n'y a pas de pertes par effet couronne jusqu'a ce la tension seuil soit atteinte, alors les pertes prennent une valeur definie par l'equation precedente. Pour des tensions superieures, la loi devient quadratique.

La relation empirique de PEEK a certaines limites et donne des resultats corrects seulement si la frequence du generateur est comprise entre 25 et 120 Hz. Une legere erreur sur m_0 , facteur d'irregularite, conduira a des resultats erronees si cette relation est utilisee.

- FACTEURS AFFECTANT LES PERTES PAR EFFET COURONNE

Les facteurs affectant les pertes par effet couronne sur les lignes aeriennes de transport d'energie sont :

- Facteurs electriques.
- Facteurs atmospheriques.
- Facteurs dependants du conducteur.

* Facteurs electriques, frequence et forme d'onde du generateur :

D'apres l'equation (2.12), les pertes dues a l'effet couronne sont fonction de la frequence. Plus la frequence est elevee, plus les pertes seront grandes, ceci montre que les pertes en continu sont moindres qu'en alternatif. Dans le cas de l'alternatif, les harmoniques de 3^e ordre sont presentes, donc les pertes seront encores plus grandes par rapport a celles a 50 Hz.

-CHAMP ELECTRIQUE AUTOUR DU CONDUCTEUR:

Le champ électrique autour du conducteur est non seulement fonction de la tension mais dépend aussi de la configuration des conducteurs (nappe, triangle...). Si la configuration est en nappe, le champ à proximité du conducteur placé au milieu est supérieur à celui des autres conducteurs. Donc la tension seuil d'apparition de l'effet couronne est inférieure pour les conducteurs placés au milieu, d'où l'effet couronne sera plus important en comparant avec les conducteurs extrêmes. La hauteur par rapport au sol des conducteurs influe sur les pertes dues à l'effet couronne. Plus la hauteur est petite, plus les pertes seront grandes. Si les lignes sont irrégulièrement espacées, les gradients à la surface et les pertes par effet couronne seront inégaux.

FACTEURS ATMOSPHERIQUES

D'après l'équation (2.12) il est clair que les pertes par effet couronne sont fonction du facteur de correction de la densité de l'air qui apparaît directement au dénominateur de l'expression.

Les pertes sont inversement proportionnelles à δ ; puisque les

perdes sont inversement proportionnelle a $(V-V_0)$, si δ diminue alors V_0 diminue et $(V-V_0)^2$ augmente. V etant la tension de service en kV. Ceci montre que l'effet de sur l'effet couronne est tres important. Pour des valeurs plus basses, la pression doit etre basse et la temperature plus elevee. C'est pour cette raison que les pertes par effet couronne son plus importantes en regions montagneuses que dans les plaines.

- EFFET DE ROUILLE, PLUIE, NEIGE ET GRELE :

Les particules de rouille sur les conducteurs causent une diminution de la tension seuil d'effet couronne local ce qui augmente les pertes par effet couronne.

Lors de mauvaises conditions atmospheriques comme la pluie, la neige, la tension d'apparition de l'effet couronne est reduite d'ou augmentation des pertes par effet couronne.

- FACTEUR DEPENDANT DU CONDUCTEUR :

D'apres l'expression (2.12) les dimensions du conducteur apparaissent deux fois en r et en d

- les pertes $\propto \sqrt{\frac{r}{d}}$

Il apparait d'apres la premiere relation ,que les pertes sont proportionnelles a la racine carree aux dimensions (r , d) du conducteur, plus le diametre du conducteur augmente plus les pertes seront importantes.

Mais d'apres la deuxieme expression ,puisque V_0 est approximativement proportionnelle au rayon du conducteur ,plus le rayon du conducteur augmente ,plus petit sera le facteur $(V-V_0)^2$. En pratique ,il a ete determine que le second effet de proportionnalite est plus important que le premier sur les pertes par effet couronne .

Pour des tensions de service de 380 kV et plus ,un conducteur par phase produit d'importantes pertes par effet couronne .On utilise deux,ou plus conducteurs par phase.De cette maniere le diametre moyen geometrique (G.M.D) des conducteurs ,donc la tension seuil d'apparition de l'effet couronne ,augmente et alors les pertes par effet couronne diminuent.

- PROFIL DU CONDUCTEUR

La forme du conducteur qui peut etre cylindrique,plate,ovale,...etc.Pour un conducteur cylindrique la repartition du champ est uniforme,les pertes

par effet couronne seront inferieures a celles des conducteurs ayant d'autres formes.

CONDITIONS A LA SURFACE DU CONDUCTEUR :

Les conducteurs sont exposes aux conditions atmospheriques. Des debris se deposedent sur la surface du conducteur qui diminueront la tension d'apparition de l'effet couronne et augmenteront les pertes par effet couronne .

ECHAUFFEMENT DU CONDUCTEUR PAR LE COURANT DE CHARGE :

L'echauffement du conducteur par le courant de charge reduit indirectement les pertes par effet couronne. Sans cet echauffement le conducteur aurait tendance a avoir une temperature plus basse que l'air environnant. En l'absence de l'echauffement, la rosee sous forme de gouttelettes d'eau sur le conducteur dans un temps brumeux ou tres humide, induit un effet couronne supplementaire. L'echauffement du au courant de charge est suffisant pour eviter une telle condensation.

Durant les pluies, l'echauffement du conducteur n'a pas d'influence sur l'effet couronne mais, apres la pluie , il accelere l'assechement de la surface conducteur; le temps durant lequel l'eau reste sur la surface du conducteur est reduit, les pertes aussi.

- METHODES DE REDUCTION DES PERTES DUES A L'EFFET COURONNE

Ces pertes peuvent être réduites par l'utilisation de :

- Conducteurs à grand diamètre
- Conducteurs en faisceaux
- Deux ou plusieurs conducteurs par phase

Il a été discuté de l'influence de l'utilisation des conducteurs à grand diamètre et en faisceaux pour la réduction des pertes, l'idée d'utiliser des conducteurs creux est la même c'est à dire avoir le même diamètre sans augmenter son poids. Dans une des conceptions, un ou plusieurs faisceaux de fils de cuivre sont tressés sur un noyau.

CONCEPTION D'UNE LIGNE BASEE SUR L'EFFET COURONNE

Il est souhaitable d'éviter les pertes par effet couronne sur les lignes de transport d'énergie par beau temps. De mauvaises conditions atmosphériques, comme la pluie, augmentent les pertes dues à l'effet couronne et diminuent la tension seuil d'apparition d'effet couronne. En tenant compte de cette diminution, il n'est pas pratique de concevoir des lignes de haute

tension qui seront a l'abri de l'effet couronne meme par mauvais temps, les dimensions des pylones et des conducteurs ne sont pas economiques. Etant donne que le mauvais temps dans une region particuliere ne dure qu'une courte periode de l'annee ,les pertes moyennes par effet couronne ,sur toute l'annee ,seront tres reduites .

Une ligne de transport typique peut avoir ,par beau temps ,des pertes de 1kW par 1500 m (triphase) et 20 kW par mauvais temps .

- INCONVENIENTS DE L'EFFET COURONNE

i- Il ya des pertes de puissance bien determinees meme si elles ne sont pas importantes par beau temps.

ii- Quand l'effet couronne est present, la capacite effective du conducteur augmente .ceci accroit le courant de charge.

- AVANTAGES DE L'EFFET COURONNE

Il reduit l'amplitude des surtensions ,et applatit le front de l'onde due a la foudre,aux manoeuvres ou aux incidents .Ceci est la consequence des pertes par effet couronne .Il agit en quelque sorte comme une valve de securite.

ANALYSE DE L'ATTENUATION ET DE LA DISTORSION DE L'ONDE PAR EFFET COURONNE

Introduction :

Lors de sa propagation le long des conducteurs des lignes, l'onde de surtension atmospherique subit ,sous l'influence de l'effet couronne ,une deformation en meme temps qu'une reduction d'amplitude.

Ce phenomene est du a la dissipation d'energie par injection de charges d'espace autour du conducteur ;ce processus a lieu des que la tension appliquee depasse la tension seuil d'apparition d'effet couronne.

L'etude de ce phenomene est d'une grande importance dans la mesure ou elle nous permet d'avoir une connaissance considerablement ameliee des contraintes electriques affectants les ouvrages et,par consequent ,une meilleure mise en oeuvre des moyens de protection .

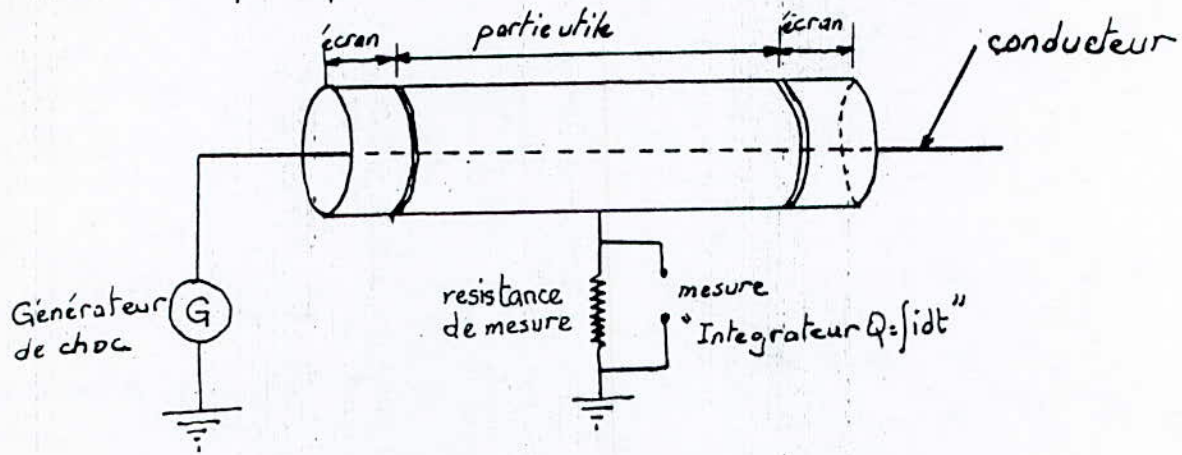
Une des methodes utilisees, pour aborder l'etude du phenomene d'attenuation et de distorsion ,est celle qui consiste a etudier le comportement, d'echantillons de courte longueur de conducteurs, a des tensions de chocs en laboratoire .Cette methode se prete bien a l'analyse de plusieurs echantillons et a l'obtention de lois generales.

L'expansion de la technologie des ordinateurs a rendu possible la comprehension de l'attenuation et distorsion d'apres les changements globaux dans les formes d'ondes.

La formulation et la resolution des equations de propagation qui representent correctement les caracteristiques de propagation de l'onde de tension avec effet couronne ,sont entrain de devenir un des meilleurs moyens d'evaluation de l'attenuation et de la distorsion .

METHODE DES ECHANTILLIONS EN LABORATOIRE. LES CYCLES Q.V

Schema de principe:



C'est un dispositif (à échelle réduite) consistant à l'utilisation des nasses ; ce sont des cages en grillage de forme cylindrique, dans l'axe desquelles sont tendus les conducteurs soumis aux essais. L'avantage de ces dispositifs est de permettre la détermination précise des paramètres électriques ; notamment des gradients superficiels qui sont appliqués aux échantillons de conducteurs ; d'autre part l'élimination des effets d'extrémités gênants est aisée ; il suffit de ménager aux deux bouts des écrans qui ne participent pas à l'élaboration des données expérimentales.

La phase d'activite d'ionisation etant terminee,il reste dans l'espace les charges lourdes (ions positifs et negatifs) dont le deplacement sous l'effet du champ electrique local est faible.Ce faible mouvement n'a qu'un effet imperceptible sur la capacite apparente $F3(V)$.

d/ Le point A du cycle definit une tension U_{co} ,qui doit correspondre a l'initiation de l'effet couronne. Les experiences ont montre que cette tension est fluctuante et qu'elle croit avec l'amplitude de l'onde de choc appliquee.Elle croit en moyenne plus pour les ondes a front raide que pour les ondes a front lent;plus pour les petit conducteurs que pour les gros.

INTERPRETATION DE LA DEFORMATION DE PROPAGATION LE LONG DE LA LIGNE :

A partir d'un cycle de charge (q, v), on peut concevoir deux interprétations possibles de la déformation de propagation le long de la ligne. Pour cela, considérons une onde de surtension exprimée par $V_1(t)$ au point de la ligne d'abscisse x , et par $V_2(t)$ au point d'abscisse $x + \Delta x$, dans le sens de la propagation de l'onde fig(3.3).

1er INTERPRETATION : Retard de propagation .

Appliquons à un élément dx de ligne, les équations classiques des telegraphistes (voir annexe).

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\partial v}{\partial x} = L \cdot \frac{di}{dt} \\ \frac{di}{\partial x} = C \cdot \frac{dv}{\partial t} \end{array} \right.$$

En notant que

$$C = \frac{\partial q}{\partial v} -$$

Les équations de propagation seront alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\partial v}{\partial x} = L \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = \frac{\partial q}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \end{array} \right.$$

ou :

v, i : représentent respectivement la tension et le courant en un point de la ligne d'abscisse x .

q : représente la charge par unité de longueur.

Dans la deuxième équation, le terme a les dimensions d'une capacité que nous appellerons capacité dynamique $F_i(V)$. Cette capacité est une fonction de V et est donnée par la pente instantanée du cycle ; elle est toujours supérieure à la capacité géométrique C du conducteur.

En présence d'effet couronne, la deuxième équation devient donc :

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = F_i(V) \cdot \frac{\partial v}{\partial t}, \quad i = 1, 2, 3$$

Le nouveau système d'équations définit une vitesse de propagation :

$$v = \frac{1}{\sqrt{L F_i(v)}}$$

(voir annexe)

On peut alors interpreter la deformation subie par l'onde de tension en supposant que chaque tranche d'onde comprise entre V et $V + \Delta V$ se deplace avec une vitesse differente, inferieure a C , la vitesse de la lumiere, determinee par la capacite dynamique $F_i(V)$ instantanee.

Le retard Δt , caracteristique de la distorsion s'exprimera par :

$$\Delta t = \Delta x \cdot \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{c} \right)$$

2eme Interpretation : Dissipation d'energie

L'energie dissipee par les charges d'espace au cours d'un cycle de tension s'ecrit :

$$W = \int_{\text{cycle}} v \cdot dq$$

Et par consequent peut etre calculee a partir de la surface de ce cycle. Sur la ligne, le phenomene est plus difficile a analyser. Nous supposerons ici que chaque tranche verticale elementaire (fig 3.9) se propage toujours avec la vitesse de la lumiere. En depit de la dissipation d'energie.

Dans ces conditions, la capacité qui détermine la vitesse de propagation est bien C_{geo} : on supposera alors que l'impédance caractéristique de la ligne reste dans tous les cas : (voir annexe)

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C_{geo}}}$$

L'énergie transportée par une onde de tension est donc donnée par :

$$W = \frac{1}{Z} \int_0^{\infty} v^2(t) dt$$

Avec ces hypothèses, l'énergie dissipée le long du tronçon Δx vaut :

$$W_1 - W_2 = \frac{1}{Z} \int_0^{\infty} [v_1^2(t) - v_2^2(t)] dt$$

Par tronçon Δx , suffisamment court, on pourra alors écrire :

$$\frac{1}{Z} \int_0^{\infty} [v_1^2(t) - v_2^2(t)] dt = \Delta x \cdot w$$

L'énergie W d'un cycle dépend de l'amplitude et de la

forme de l'onde de tension $V(t)$, de sorte que le cycle à prendre en compte dans l'expression ci-dessus, pour calculer la distorsion totale sur une longueur de propagation l , évolue constamment au fur et à mesure que l'onde $V(t)$ se modifie. Le calcul pratique doit donc être discretisé par élément x suffisamment court pour que la modification de cette onde reste faible, de manière à pouvoir utiliser le même cycle tout au long de cet élément.

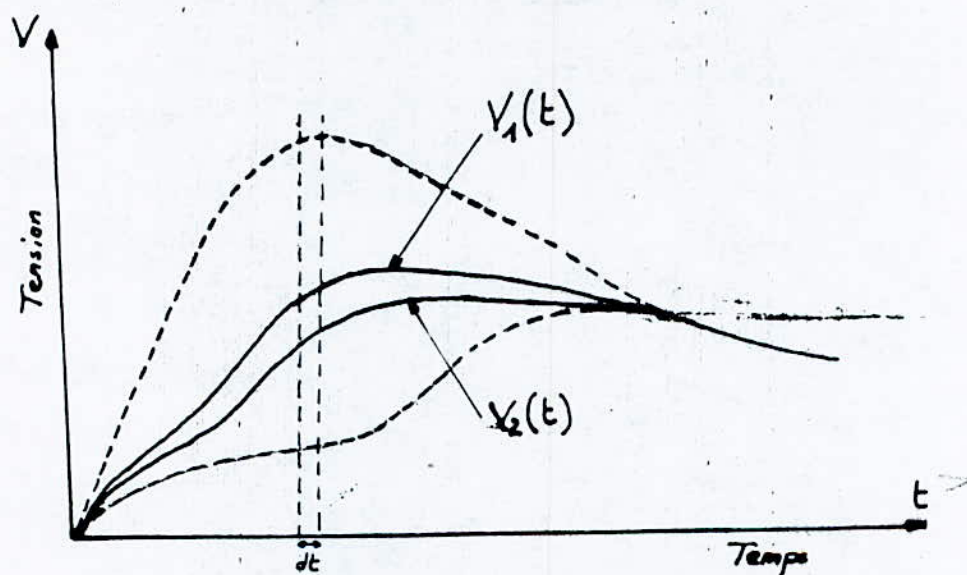


fig 3.6 Interpretation de la distorsion de l'onde par l'énergie dissipée.

COURBE Q-V ET EQUATIONS DE PROPAGATION

La figure 3.7 nous donne un exemple d'une courbe q-v d'une section de ligne pour une onde de tension. Une proportionnalité apparaît entre q et v jusqu'à ce que la tension seuil, V_{co} , d'apparition de l'effet couronne du conducteur est atteinte. La pente de la courbe est égale à la capacité géométrique C.

Lorsque V_{co} est dépassée, l'effet couronne est généré à partir du conducteur et la charge q augmente rapidement relativement à la tension V et ce jusqu'à la valeur de tension de crête. Lorsque la tension devient inférieure à la valeur de la tension de crête, la pente de la courbe redevient approximativement égale à C.

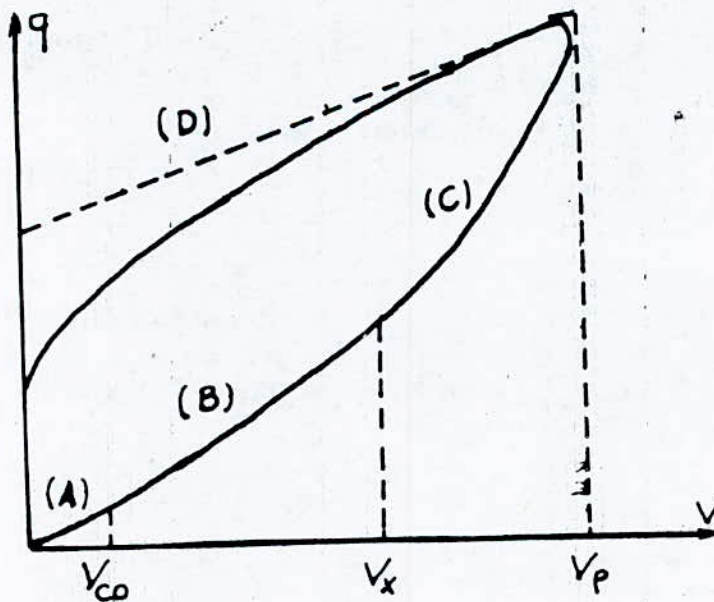


Fig.3.7 Courbe q-v

(A) Quand $0 < V < V_{co}$ et $\frac{\partial V}{\partial t} > 0$,

$$F(V) = \frac{\partial q}{\partial V} = C$$

(B) Quand $V_{co} < V < V_x$ et $\frac{\partial V}{\partial t} > 0$,

$$F(V) = C + \frac{m_1 k_1 (V - V_{co})^{m_1 - 1}}{V}$$

(C) Quand $V_x < V < V_p$ et $\frac{\partial V}{\partial t} > 0$,

$$F(V) = C + \frac{m_2 k_2 (V - V_{co})^{m_2 - 1}}{V}$$

(D) Quand $0 < V < V_p$ et $\frac{\partial V}{\partial t} > 0$,

$$F(V) = C$$

Avec

$$k_i = \sigma_{ci} \sqrt{r/2h} \times 10^{-11} \text{ (F/m)} \quad (i = 1 \text{ ou } 2)$$

Les raisons de ce choix sont données en annexe.

Comme il est montré à la figure 3.9, soit la distance x mesurée à partir de l'entrée de la ligne :

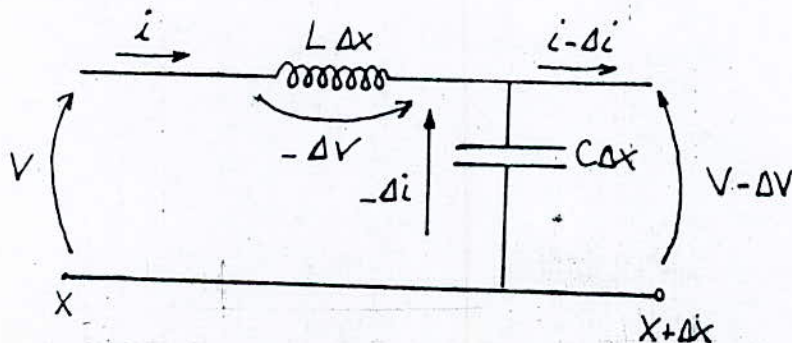


fig 3.9

La chute de tension est donnée par : (voir annexe)

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = L \frac{\partial i}{\partial t}$$

de même, la décroissance en courant est donnée par :

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = C \frac{\partial v}{\partial t} \quad \text{avec} \quad C = \frac{\partial q}{\partial v}$$

Les équations de propagation seront alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\partial v}{\partial x} = L \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = \frac{\partial q}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \end{array} \right.$$

Pour déterminer la tension et courant à une position x de la ligne, et à un temps donné, le système d'équations précédent est calculé pour les conditions initiales suivantes :

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

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

Et les conditions limites suivantes :

$$V(0, t) = e(t)$$

$$V(l, t) = 0$$

ou

$e(t)$: tension appliquee au debut de la ligne.

l : longueur de la ligne

$\frac{\partial q}{\partial v}$, dans le systeme d'equation, est donnee par la courbe $q-v$

SOLUTION DES EQUATIONS DE PROPAGATION

Les equations de propagation sont resolues par la methode des differences finis. La ligne, representee a la fig. 3.10 par un schema equivalent de type Γ a ete divisee en distance infinitesimales, Δx .

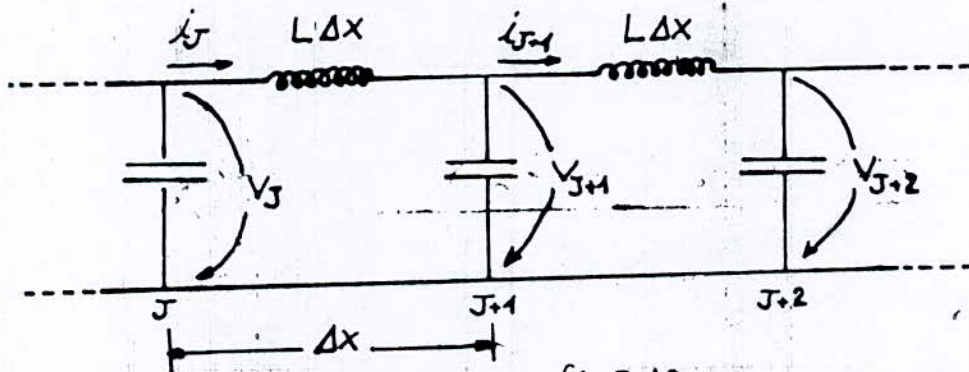


Fig 3.10

Pour la résolution des équations de propagation, les deux paramètres, espace x et temps t , seront respectivement représentés par les indices J et I

Les termes $\partial i / \partial x$ et $\partial v / \partial t$ nous donnent :

$$\frac{\partial i}{\partial x} = \frac{i_J^I - i_{J-1}^I}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{v_J^{I+1} - v_J^I}{\Delta t}$$

En remplaçant ces termes dans l'équation,

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = \frac{\partial q}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial t}$$

on obtient l'expression suivante :

$$v_J^{I+1} = v_J^I + \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right) \cdot \left\{ i_{J-1}^I - i_J^I \right\} / F_J(v_J^I)$$

$$(J = 1, 2, \dots, N)$$

Dans la courbe $q-v$, q est une fonction de v

$$F_J(v_J^I) = \left\{ q_J^I - q_J^{I-1} \right\} / \left\{ v_J^I - v_J^{I-1} \right\}$$

Ce qui nous donne:

$$F_J(v_J^I) = \left\{ q_J(v_J^I) - q_J(v_J^{I-1}) \right\} / \left\{ v_J^I - v_J^{I-1} \right\}$$

$$(J=1, 2, \dots, N)$$

$F_J(v_J^I)$ est un coefficient différentiel du premier ordre en chaque point de la courbe q-v. Chaque point de la ligne a une courbe caractéristique différente.

En raison de la difficulté de résolution des équations, si ces différences entraient en considération, une seule courbe q-v sera utilisée le long de la propagation, alors le terme $F_J(v_J^I)$ peut être remplacé par $F_J(v_J^I)$.

Les termes $\frac{\partial V}{\partial x}$ et $\frac{\partial i}{\partial t}$ nous donnent:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{V_{J+1}^{I+1} - V_J^{I+1}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial i}{\partial t} = \frac{I_J^{I+1} - I_J^I}{\Delta t}$$

En remplaçant ces termes dans l'équation,

$$-\frac{\partial V}{\partial x} = L \frac{\partial i}{\partial t}$$

On obtient l'expression suivante:

$$i_J^{I+1} = i_J^I + 1/L \cdot (\Delta t / \Delta x) \cdot \left\{ V_J^{I+1} - V_{J+1}^{I+1} \right\}$$

Les conditions initiales seront:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_J^0 = 0 \quad (J = 1, 2, \dots, N) \\ i_J^0 = 0 \end{array} \right.$$

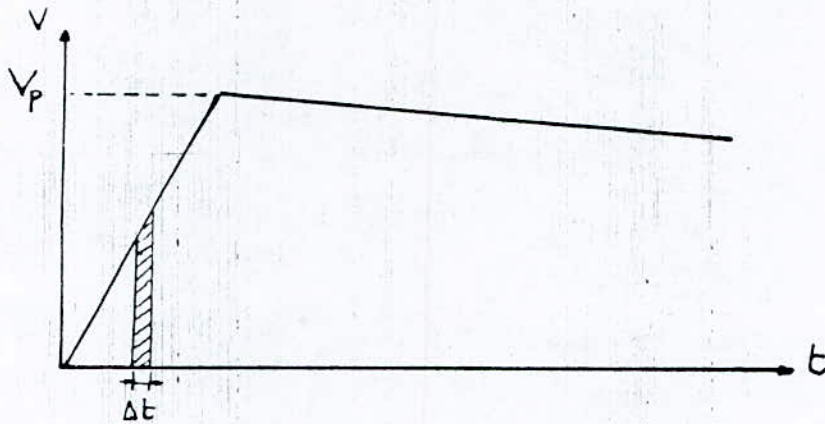
Et les conditions limites seront

$$V_0^{I+1} = e^{I+1}$$

La methode, qui sera adoptee pour le calcul de l'attenuation et de la distorsion a partir des equations de propagation, consiste a faire deplacer a partir du point d'impact des tranches verticales elementaires de l'onde, de largeur $\Delta t = 0.01$ microseconde a travers les elements de largeur $\Delta x = 3$ metres.

Pour faciliter les calculs on prendra, au point d'impact une onde normalisee $1.2/50 \mu s$ linearisee fig.3.11

La duree de l'onde sera prise egale a $4 \mu s$, l'onde sera donc divisee en $N=400$ tranches verticales elementaires.

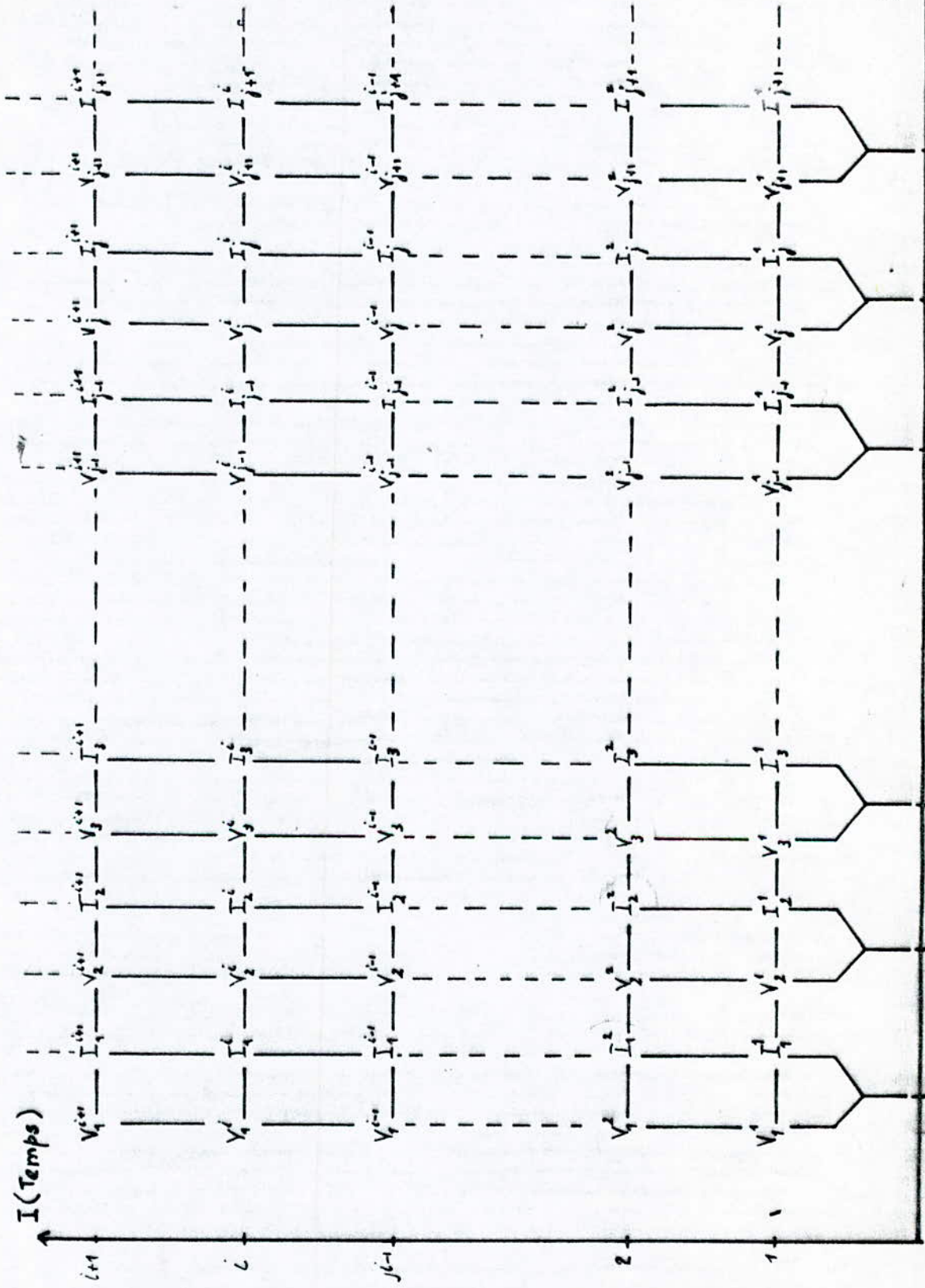


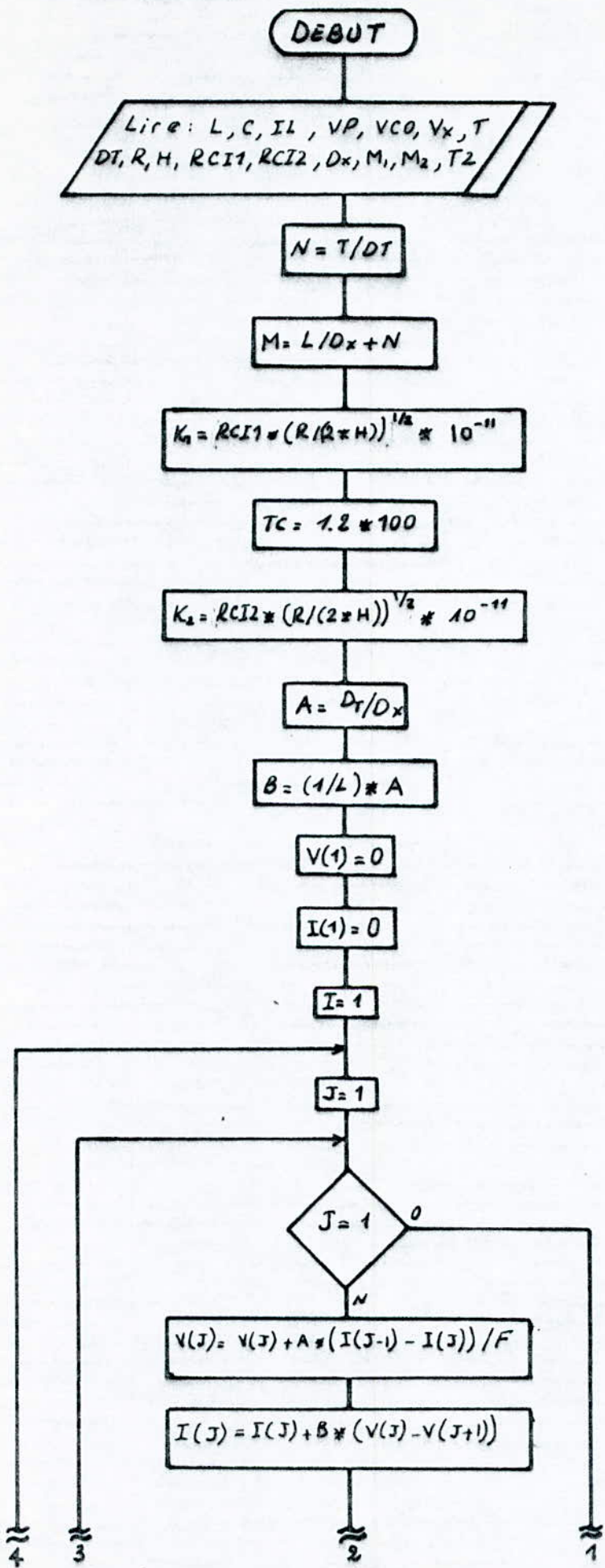
Pour l'établissement de l'organigramme on utilise le plan I, J fig dont l'axe des abscisses représente les conditions initiales et l'axe des ordonnées représente les conditions limites .

On débute les calculs en prenant la première tranche de l'onde correspondant au premier Δt c'est à dire $I=1$, ceci pour les conditions initiales et $J=1$ pour les conditions limites. Connaissant v_1^1 , tirée des conditions initiales, on peut calculer i_1^1 à partir de l'expression de $\frac{I}{J}$ donnée par les équations de propagation, connaissant i_1^1 on calcule v_2^1 et ainsi de suite tout en gardant $I=1$, et ceci jusqu'à atteindre le point correspondant à la distance où on veut connaître la forme de l'onde. On revient ensuite au point de départ, on prend la deuxième tranche correspondant au deuxième Δt , c'est à dire $I=2$, I gardant cette valeur, J varie de la même manière que précédemment : on tire v_1^2 des conditions initiales, v_2^2 correspondant à v_2^1 qui sera prise en considération dans les calculs à la place de v_2^1 (v_2^2 représente la tension de la tranche de l'onde précédente à $I=2$).

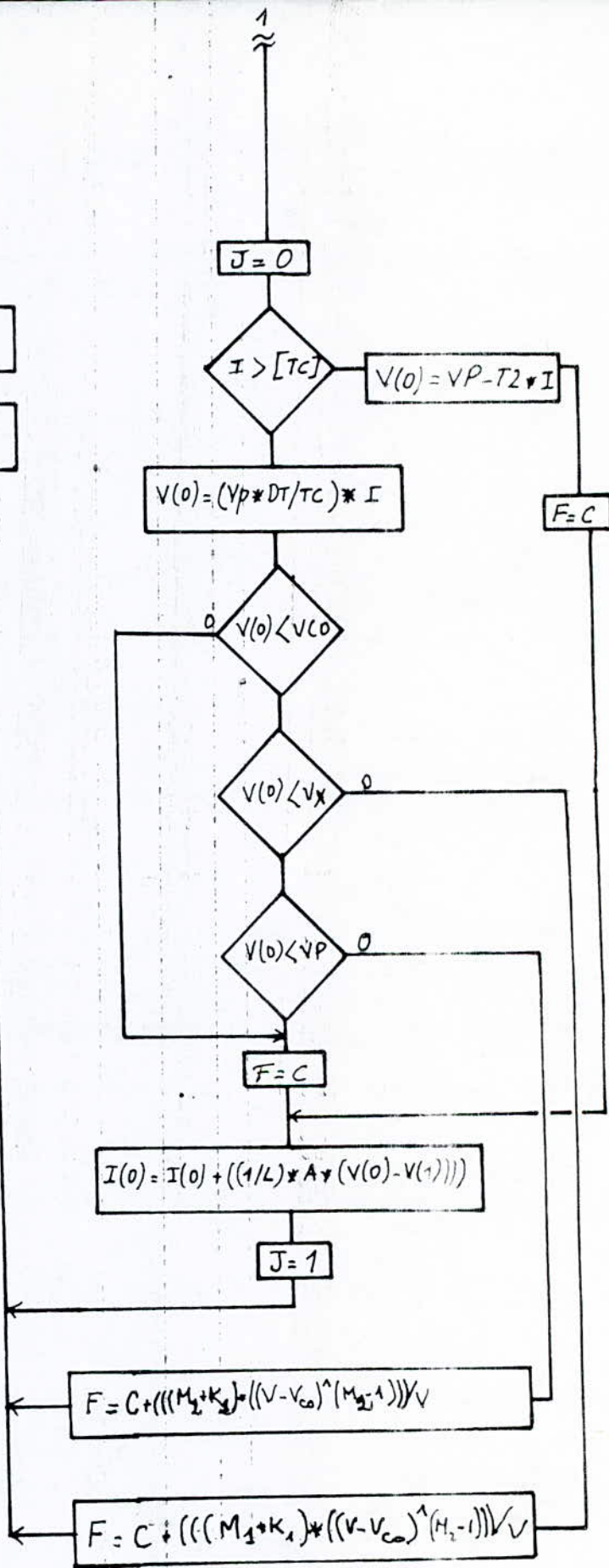
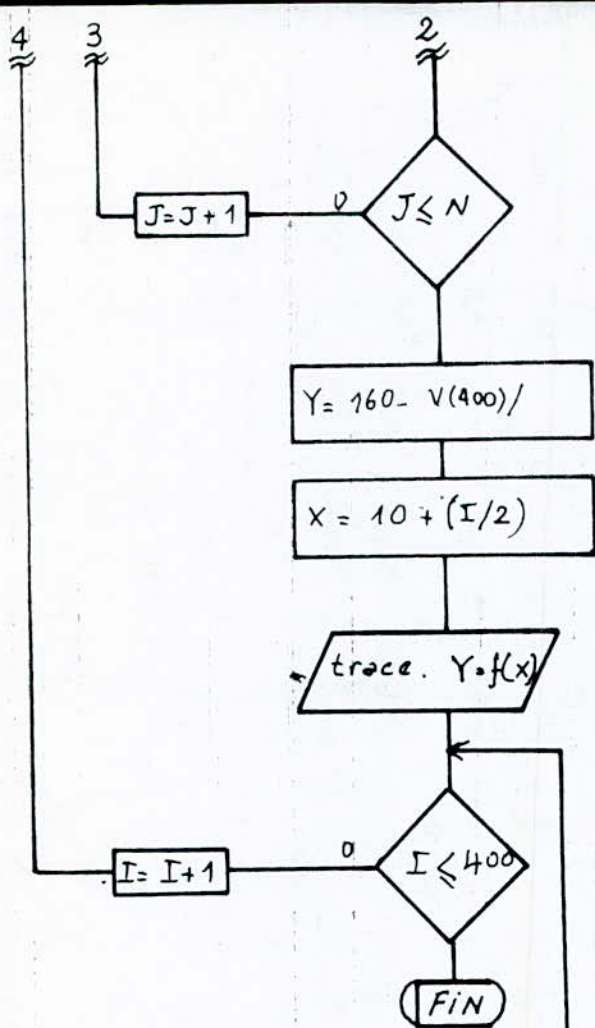
Donc connaissant v_1^2, v_2^1 et i_1^1 , on peut calculer i_1^2 et ainsi de suite. Ces opérations sont répétées jusqu'à $I=400$.

PLAN I, J

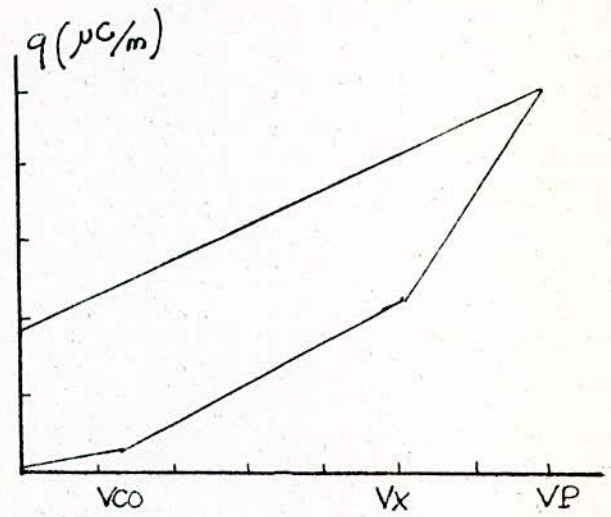
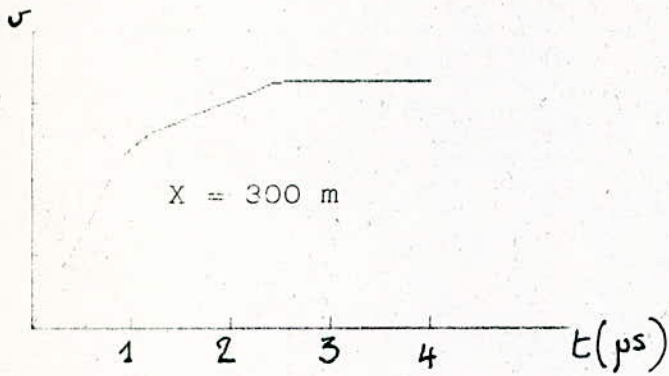




2



Soit un conducteur ayant comme paramètres, les valeurs indiquées ci dessous. L'atténuation et la distorsion d'une onde le parcourant est donnée par les courbes suivantes :



6,46 $\mu\text{C}/\text{div}$
225,7 kV/div

$V_{CO} = 303 \text{ kV}$
 $V_X = 1150 \text{ kV}$
 $V_P = 1580 \text{ kV}$
 $C = 8,88 \text{ pF}/\text{m}$, $L = 1,25 \text{ pH}/\text{m}$
 $\sigma_{C1} = 15$
 $\sigma_{C2} = 10$

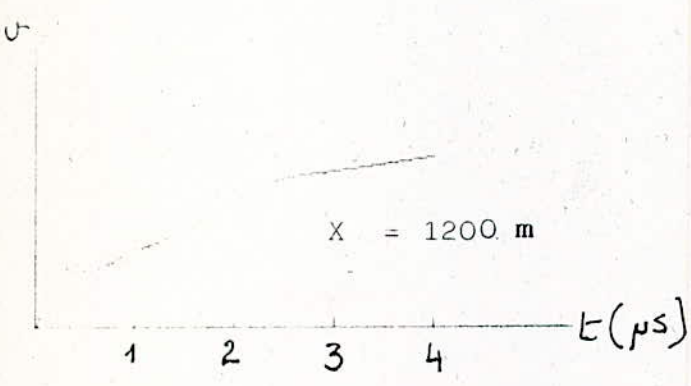
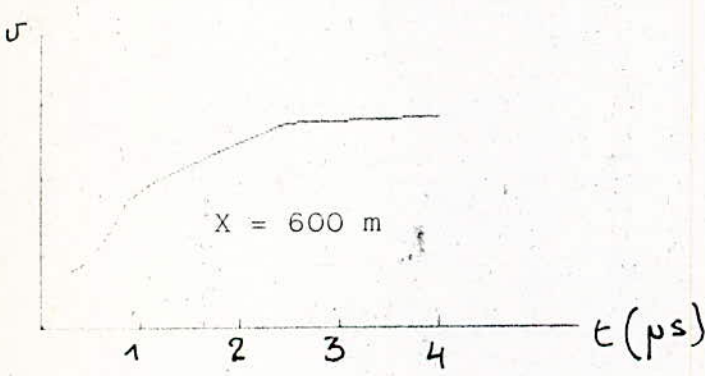
Soit :

$m_1 = 2,0$, $m_2 = 2,1$

Alors :

$k_1 = 2,5 \text{ pF}/\text{m}$

$k_2 = 1,68 \text{ pF}/\text{m}$



$V_P = 1580 \text{ kV}$

Echelle : 395 kV/div

DISCUSSION :

Pour trois distances differentes ,on remarque que la partie de l'onde ,corespondant a des niveaux de tensions inferieurs a V_{co} ,il n'a y a, ni attenuation, ni distorsion .ceci est du au fait que x et t ont ete pris egaux a, respectivement, $3m$ et $0,001$ us ,c'est a dire que cette partie de l'onde se propage a la vitesse de la lumiere et comme l'effet couronne n'est pas encore genere ,il n'y a pas de dissipation d'energie.

L'attenuation de l'onde en amplitude debute des que la tension excede V_{co} et devient de plus en plus importante lorsque la tension croit, et encore d'avantage lorsqu'elle excede V_x ;on remarque en plus de l'attenuation un aplatissement du front de l'onde et une augmentation du temps de crete ,ceci s'explique par le fait que l'augmentation de la capacite dynamique entraine une diminution de la vitesse de propagation de cette partie de l'onde.

CONCLUSION :

Une methode de calcul de propagation de l'onde de foudre avec effet couronne a ete decrite. Cette methode ,inclue le calcul et la resolution des equations non lineaires de propagation pour un systeme monophasé, basee sur de la courbe q-v. La methode des differences finies est appliquee pour la resolution des equations de propagation. Les differentes equations sont d'une forme tres simple. Le calcul numerique est possible pour une courbe q-v aleatoire, exprimee numeriquement.

A partir des resultats obtenus des calculs numeriques on peut evaluer, le taux d'attenuation de l'amplitude de l'onde, et le temps de crete apres un parcours de quelques kilometres.

Alors, les consequences de l'etude de la distorsion et de l'attenuation de l'onde due a l'effet couronne sont une connaissance considerablement amelioree, des contraintes electriques affectant les ouvrages a haute et tres haute tension, et permettent par suite une meilleure mise en oeuvre des dispositifs de protection.

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] INOUE .A : "Propagation analysis of overvoltage surges with corona based upon charge versus voltage curve" IEEE Transaction on power apparatus and systems vol.Pas104 Nr3 (1985),PP 655-622.
- [2]-KUDYON H.M. and SHIH C.H.: "A Non linear circuit model for transmission line in corona" IEEE Transaction on power apparatus and systems,VOL PAS-100 Nr3(1981)ppi420 ppi430
- [3]-"Les proprietes dielectriques de l'air et les tres haute tensions " GEORGES LE ROY ,CLAUDE GARY editions EYROLLES.
- [4]"Electrical power systems" C.L. WADHWA,John willey and sons 1983.
- [5]"Elements of power system analysis" W.D. STEVENSON International Student Company.
- [6]"Installations electriques a haute et basse tension " A.MAUDUIT DUNOD 1959.

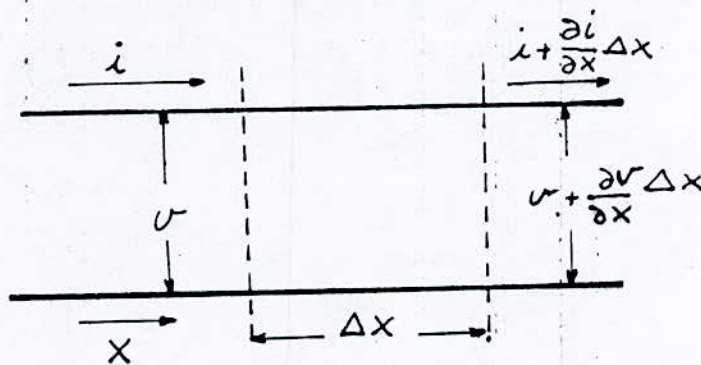
ANNEXE

EQUATIONS DE PROPAGATION :

L'étude des ondes sur les lignes de transport d'énergie électrique est très complexe, on considérera ici le cas des lignes sans pertes.

Les lignes sans pertes sont d'une bonne représentation pour les lignes à hautes fréquences où $L\omega$ et $C\omega$ sont largement supérieures à R et G . Pour les ondes de foudre sur les lignes de transport d'énergie, l'étude des lignes sans pertes est une simplification dans la mesure où elle nous permet d'interpréter le phénomène sans faire intervenir une théorie compliquée.

Supposons un élément d'une ligne représenté par une phase et le neutre, situé à une distance x du point d'impact. La tension v et le courant i sont fonctions des paramètres, espace x et temps t . [5]



La chute de tension le long de l'element Δx est :

$$i(R\Delta x) + (L\Delta x) \frac{\partial i}{\partial t}$$

et on peut écrire :

$$\frac{\partial v}{\partial x} \Delta x = - \left(Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \right) \Delta x$$

Le signe negatif est necessaire parceque $v + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \Delta x$ doit etre plus petit que v , pour des valeurs positives de i et $\frac{\partial i}{\partial t}$.

De la meme maniere , on obtient :

$$\frac{\partial i}{\partial x} \Delta x = - \left(Gv + C \frac{\partial v}{\partial t} \right) \Delta x$$

Considerant la ligne comme etant sans perte, R et G sont nuls , les equations seront alors :

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial x} = -L \frac{\partial i}{\partial t} \\ \frac{\partial i}{\partial x} = -C \frac{\partial v}{\partial t} \end{cases}$$

Ces equations sont connues sous le nom " EQUATIONS DES TELEGRAPHISTES " .

CALCUL DE LA VITESSE DE PROPAGATION DE L'ONDE

Du système d'équation précédent, on peut éliminer les termes en i , en procédant de la manière suivante:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = -L \frac{\partial^2 i}{\partial t \partial x}$$

et

$$\frac{\partial i^2}{\partial x \partial t} = -C \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$$

Ce qui nous donne, puisque le terme $\frac{\partial^2 i}{\partial t \partial x}$ est commun aux deux équations

$$\frac{1}{LC} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial v^2}{\partial t}$$

La solution de cette équation est exprimée en fonction de $(x-vt)$ et la tension sera exprimée par:

$$v = F(x - vt)$$

En faisant un changement de variable

$$u = x - vt$$

Ce qui nous donne: $\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial f(u)}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = -v \frac{\partial f(u)}{\partial u}$

et

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = V \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2}$$

De la meme maniere on obtient :

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2}$$

En remplaceant cette deuxieme derivee partielle dans l'equation on obtient :

$$\frac{1}{LC} \cdot \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} = V^2 \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2}$$

Ce qui nous donne la vitesse de propagation de l'onde :

$$V = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

CALCUL DE L'IMPEDANCE CARACTERISTIQUE Z DE LA LIGNE :

L'expression de l'onde de tension incidente est de la forme :

$$v = f(x - vt)$$

L'onde de courant resultant du mouvement des charges peut etre exprimee par :

$$i = \frac{1}{\sqrt{L/C}} f(x - vt)$$

Ce qui nous donne

$$\frac{v}{i} = \sqrt{L/C} = Z$$

Ce rapport v a i est appelé impédance caractéristique.

ENERGIE ABSORBEE PAR EFFET COURONNE.

L'énergie absorbée par effet couronne est donnée par la courbe q-v
quelle que soit la tension considérée.

$$W = \int_0^q V dq - \frac{cV^2}{2} \quad (1)$$

En admettant que la pente de la courbe est:

$$\frac{\partial q}{\partial V} = c + \frac{mk(V - V_{co})^{m-1}}{V} \quad (2)$$

quand

$$V_{co} \leq V \leq V_p \quad \text{et} \quad \frac{\partial V}{\partial t} > 0.$$

On utilise les équations (1) et (2), on obtient:

$$W = k(V - V_{co})^m \quad (3)$$

si $m=2$, l'équation (3) a une forme de l'équation de PEEK.