

VIVITRON

CRN - VIV - 56

**DECHARGES ELECTRIQUES
DANS UNE
MACHINE ELECTROSTATIQUE**

ANALYSE DES TRAVAUX DE
J.A. STANIFORTH ET C.M. COOKE

G. FRICK

Avril 1988

**CENTRE DE RECHERCHES NUCLEAIRES
STRASBOURG**

IN2P3
CNRS

UNIVERSITE
LOUIS PASTEUR

DECHARGES ELECTRIQUES

DANS UNE

MACHINE ELECTROSTATIQUE

ANALYSE DES TRAVAUX DE J.A. STANIFORTH ET C.M. COOKE

G. FRICK

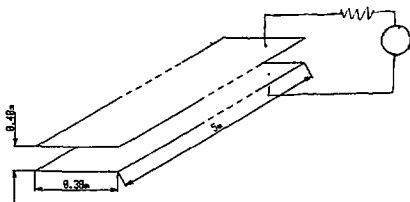
Avril 1988

Les questions de décharges électriques, d'énergie stockée, de phénomènes transitoires dans les accélérateurs électrostatiques ont fait l'objet de travaux et de réflexions constants depuis les débuts du projet Vivitron. Nous nous sommes associés les compétences de A. Staniforth (Salford - Daresbury), C. Cooke (M.I.T.), J.D. Larson (consultant pour le projet Vivitron) et d'autres encore. De nombreux documents ont été édités et plusieurs réunions de travail se sont tenues sur ces sujets. Le présent document a pour objet de faire une synthèse de ces travaux et de faire le point de la situation à ce jour.

I. RAPPEL DE MECANISMES DE BASE

La figure 1 montre un système électrostatique élémentaire représentant un condensateur à plaques parallèles alimenté par une source à grande résistance interne.

fig. 1



Pour l'exemple on prend des dimensions typiques pour un accélérateur électrostatique, et qui pourraient être celles d'un élément d'électrode discrète.

On considère que la tension appliquée est de 4 MV et que l'on fonctionne dans le SF₆ sous pression.

L'exemple cité correspond à un cas de champ uniforme de grand gap et de "relativement" grande énergie emmagasinée.

Le calcul donne les résultats suivants :

capacité	15 pF/m
inductance	741 μH/m
impédance caractéristique	222 Ω

1) Avant la décharge

Décrivons quelques situations typiques.

1a) Si la tension V est située à une valeur inférieure à celle de la tension de décharge le système décrit a un comportement strictement électrostatique. Le champ est uniforme entre les deux électrodes, il est égal à V/d soit $4\text{MV}/0,4\text{m} = 10\text{MV/m}$.

1b) Si on augmente lentement la tension, le champ atteindra des valeurs proches de la rupture. Le phénomène physique se caractérisera par l'apparition dans le gap de lucurs liées à la présence d'électrons libres en grande densité. Ces phénomènes peuvent disparaître mais également s'amplifier jusqu'au point de relier les 2 électrodes par un plasma continu, donc un conducteur. Toutes les charges électriques placées sur les électrodes vont s'y engouffrer ; le condensateur se décharge ; vu la grande résistance interne de la source la différence de potentiel va tomber à zéro. Le phénomène est décrit par la théorie de Raether (Kanal). Le phénomène a un caractère statistique, on peut donc établir un temps moyen, entre l'application d'une tension et le début de la décharge. En fait le temps observé dans les expériences est égal à la tenue d'un temps statistique et d'une durée de formation de la décharge (fig. 2a).

1c) Si la tension appliquée est à nouveau abaissée en dessous d'une valeur critique, en un temps inférieur à celui nécessaire à l'établissement de la décharge, il ne se passera rien et les phénomènes de pré-décharge vont disparaître.

1d) Si la tension appliquée augmente brusquement et atteint des valeurs supérieures à la valeur critique, sous forme d'une impulsion de tension par exemple, l'apparition de la décharge sera également différée d'un temps égal à la somme d'un temps statistique et d'un temps de formation. Ces durées seront d'autant plus faibles que la surtension sera plus élevée. A nouveau si l'impulsion a une durée inférieure à ces temps, il ne se passera rien (fig. 2b).

De nombreux travaux ont été effectués dans ce domaine, mais relativement moins souvent dans celui des tensions élevées et des grandes distances qui nous concernent.

fig. 2a

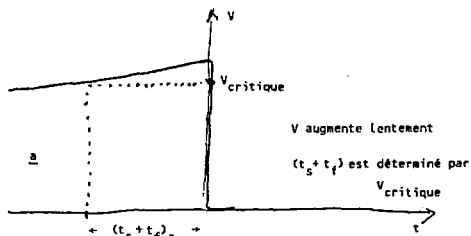
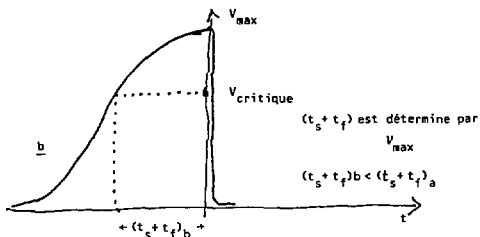


fig.2b



(e) Citons quelques travaux à titre d'illustration.

- Pfeiffer et al. a fait de nombreuses mesures en N_2 et SF_6 pour un gap de 8 mm, Les essais étaient faits avec des impulsions de temps de montée 1,5 ns, de durée 200 ns et d'amplitude max 150 kV. (La pression était 1 ou 2 bar).

- Retenons quelques chiffres.

Pour une valeur critique en tension entre 65 et 70 kV le temps de formation est de l'ordre de 10 ns selon le cas pour une distance entre électrodes de 8 mm, mais atteint des valeurs importantes, 100 - 200 nsec, lorsque la tension appliquée n'est que peu supérieure à la tension de décharge.

Le temps statistique dépend de beaucoup d'éléments, en particulier de l'ionisation du gaz par une cause extérieure, mais aussi des propriétés de surface des électrodes. On a noté que pour des surtensions inférieures à 0,5 %, ce temps statistique était dans les microsecondes. Une source de rayonnements extérieure (UV, radioactivité, rayons X) peut le rendre négligeable. Ce fait donne des explications à la différence du fonctionnement d'un accélérateur sans faisceau et avec faisceau.

Dans un travail publié par Machlitt et al. (Munich) on a mesuré les valeurs de ces temps avec des impulsions jusqu'à 100 kV dans le SF₆ à 6 - 8 bars, les électrodes étaient distantes de 0,08 à 0,5 mm. Il s'agissait d'étudier le comportement d'éclateurs. On a notamment mesuré un temps de thermalisation qui commence au début de la décharge et qui s'arrête lorsque l'arc est formé, ce temps vaut environ 0,5 ns dans les conditions qui nous intéressent. Le temps de formation est de l'ordre de 2 ns pour un facteur de surtension égal à 1. On cite une formule donnant le temps de formation

$$t_f = d/v_0 r^{1,4} \quad v_0 = 2 - 4 \text{ mm/nsec}$$

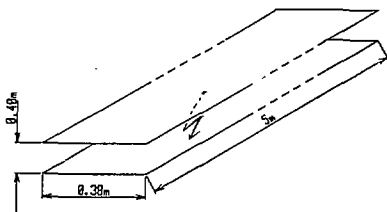
d est la distance entre électrodes

où $v_0 r^{1,4}$ est la vitesse de propagation de la prédécharge ; r est le facteur de surtension $r = V/V_d - 1$.

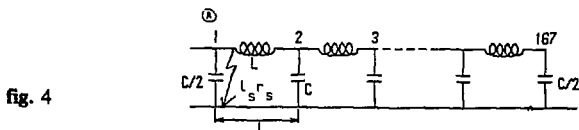
2) Après la décharge

Une fois le temps statistique et de formation passé, la décharge apparaît, le schéma du système change. A l'échelle des temps en cause on peut ignorer le système de charge des électrodes.

fig. 3



représentation électrique



l,c représentation de la ligne constituée par les électrodes

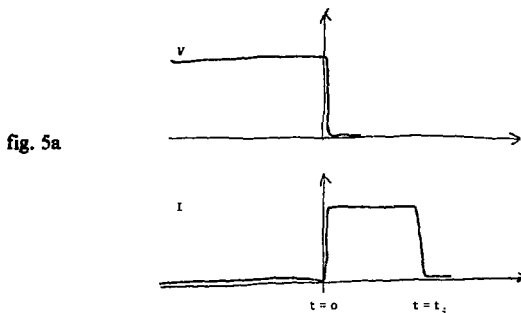
l_s inductance de l'arc

r_s résistance de l'arc

le point A est situé en n'importe quel lieu de l'électrode. Si les électrodes n'étaient pas longues il faudrait un réseau représenté à 2 dimensions.

2a) Approximation où l'impédance de l'arc est nulle, $r_s = l_s = 0$.

Le potentiel en A et le courant dans l'arc sont donnés par le schéma suivant :



Si A est à une extrémité

$$t_i = L/c_0 \quad \text{longueur de la ligne/vitesse de la lumière}$$
$$500/3.10^{10} \text{ cm/s} = 17 \cdot 10^{-9} \text{ sec}$$

La valeur de I est déterminée par l'impédance caractéristique $I = V/Z_0$ soit
 $4 \text{ MV}/227 \Omega = 18 \text{ 000 A}$.

Ce schéma n'est pas physique, en effet l'énergie dissipée dans l'arc est nulle.
Or celui-ci ne se maintient que par l'énergie qui est dégagée.

La valeur de cette énergie est égale à $\frac{1}{2} CV^2 = 600 \text{ joules}$

La puissance du phénomène $W = 600 \cdot 10^9/17 = 35 \text{ MW}$

Charge déposée $Q = C \cdot V = 300 \mu\text{Cb}$

$$I = Q/t = 18 \text{ 000 A}$$

2b) On attribue à r_s et l_s les valeurs issues de l'expérience. C. Cooke propose ainsi :

$$r_s = 1 - 100 \Omega$$

$$l_s = 15 \text{ l nH } 15 \times 1$$

$$l_s = 600 \text{ nH}$$

$$l \text{ longueur de l'arc} = 40 \text{ cm}$$
$$l_s \omega \text{ pour } f = 200 \text{ MHz} = 72 \Omega$$

Cette fois-ci le calcul devient plus complexe.

Le courant ne pourra pas s'établir instantanément et le système entrera en oscillations amorties.

2c) Le calcul de A. Staniforth.

Cet auteur décompose la ligne en inductance et capacité élémentaires ; pour l_s il introduit une inductance d'arc de $1,4 \times 1 \text{ nH}$ et surtout une résistance variable en fonction du courant qui la traverse.

$$r_a = \frac{\rho^{1/3} \cdot 7 \cdot 10^{-4} \times l}{\int_0^1 i(t)^{2/3} dt}$$

ρ densité du gaz dg/m^3

Cette formule a été vérifiée et trouvée en bon accord avec l'expérience. Le calcul du comportement du circuit devient complexe et ne peut être mené qu'à l'aide d'un ordinateur. On montre que la résistance r_s varie entre 3 et 4 ordres de grandeur pendant les premières ns.

C'est ce résultat qui nous intéresse.

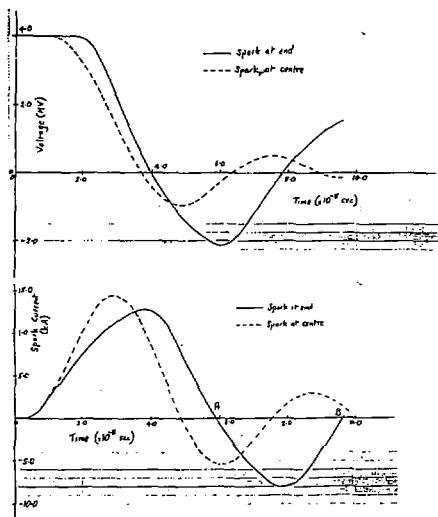


fig. 5b

2d) Remarques

- On trouve des résultats différents selon le point où l'arc a lieu.
- I_{\max} environ 13 000 A, inférieur à la valeur du modèle simple de ligne
- Ce max n'est atteint qu'après 40 nsec.
- Tension et courant sont déphasés.
- Il y a une oscillation amortie.
- L'énergie est dissipée dans l'arc en 40 - 60 nsec.

- La fréquence de l'oscillation est située entre 13 et 20 MHz.
- L'amortissement est rapide (il dépend de r_s).
- L'énergie est dissipée en moins de 40 ns entièrement dans l'arc.

Un schéma dans le temps serait maintenant le suivant :

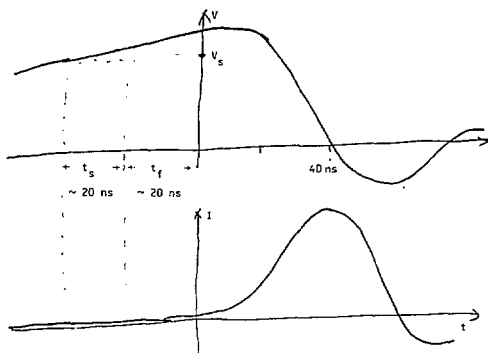


fig.5c

Ce schéma simple, traité avec rigueur, nous facilitera la compréhension pour les situations plus compliquées auxquelles nous nous intéressons et où le calcul n'est pas toujours faisable.

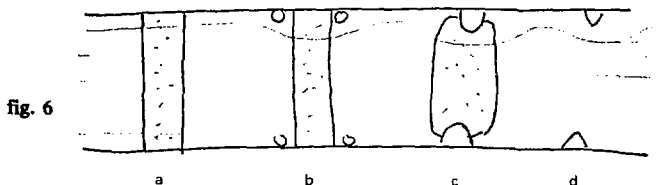
◇◇◇◇◇◇◇◇

II. MODELISATION

1a) Modèles réalistes

Le modèle décrit précédemment est un schéma à champ uniforme et diélectrique homogène. Dans la réalité il faut imaginer des électrodes séparées par des isolateurs.

1a) La figure 6 montre quelques schémas possibles.



La solution a n'est pas praticable. Il faudrait un contact idéal entre diélectrique et conducteur. Il y a risque très grand d'endommagement au point triple. Le champ est le même en tout point, le risque de décharge à proximité de l'isolant est à prendre en compte.

Les solutions b et c sont acceptables, elles diminuent le champ à proximité du point triple et de la zone de contact diélectrique-conducteur.

Mais, nous sommes dans une situation nouvelle par rapport au cas étudié en I. 2.

Le champ n'est plus uniforme dans tout l'espace.

Il est augmenté dans la partie centrale de l'isolateur.

Le mécanisme de décharge électrique sera modifié, la grande densité d'électrons apparaîtra non pas près des électrodes, mais dans cette zone centrale.

En tout état de cause la tenue en tension est diminuée, caractéristique de tout système à *champ non uniforme*.

Les temps statistique ou de formation seront plus faibles.

Par contre le phénomène transitoire n'est pas modifié de façon significative.

On conservera une évolution du type du § I. 2 c.

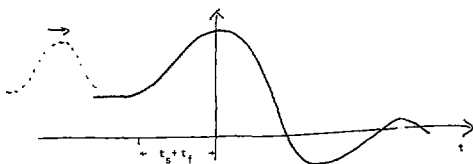
On comprend qu'il faut protéger les isolateurs en créant à proximité une zone à champ élevé (éclateur), fig. 6d. On peut s'interroger sur l'efficacité de ceux-ci.

Si la tension monte lentement, tel qu'en figure 5c, les temps statistique et de formation ne jouent aucun rôle et probablement les éclateurs fonctionnent correctement.

Si la tension varie, par contre, sous forme impulsionnelle, avec une forte surtension, une onde de tension se propagera sur la ligne. Elle peut atteindre l'éclateur avant l'isolant. La différence de temps est de l'ordre de a/c (a distance éclateur-isolant) par exemple pour 30 cm \sim 1 ns. Ce temps est inférieur aux valeurs admises pour le temps de formation et statistique. Il n'y a donc apparemment aucune protection efficace par un éclateur pour une onde de tension.

La figure 7 montre un exemple d'onde de tension que l'on peut imaginer. On note une constante de temps du front de tension de 20 - 30 ns. En supposant un temps de formation du même ordre de grandeur on voit que la tension sur l'isolateur pourrait être double avant que l'éclateur ne fonctionne.

fig. 7



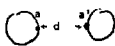
1b) Champ non homogène

fig. 8



structure
coaxiale

E_{max} sur
l'électrode
centrale



structure
bifilaire

E_{max} en
a - a'



électrodes
discrètes

$E_a > E_b$
 $E_{a'} < E_a$



électrode
colonne

$E_a > E_b$

Quelques observations :

- si V est la tension appliquée, et d la distance entre électrodes, un système à champ uniforme ($E = V/d$) a toujours une tension de décharge V_s plus élevée qu'un système à champ non uniforme de même V/d .

- les phénomènes précurseurs de décharge apparaissent là où la valeur locale du champ est la plus élevée, c'est-à-dire à proximité des électrodes. Ceci entraîne une contribution, propre aux électrodes, qualité de la surface, nature du matériau, impuretés, etc ...

- les phénomènes précurseurs ne peuvent pas se développer au loin de ces zones, car le champ diminuant accentue les phénomènes de recombinaison, de diffusion, diminue le gain d'énergie des électrons. Le phénomène se propage mal.

- donc il y a un paradoxe, la valeur de décharge V_s est certes moindre pour un champ inhomogène, cependant une telle structure est plus stable, les phénomènes précurseurs mettant plus long temps à se propager et seront donc plus facilement arrêtés si la perturbation de tension disparaît. Il y a un temps de formation plus grand. Ceci est encore plus vrai s'il y a apparition d'effet corona.

- le projet d'un système électrostatique va comprendre les zones à champ quasi-uniforme (partie droite de la "courbe") et des zones à champ uniforme (partie gauche de la "courbe"). Le choix de ces zones permettra de créer des espaces protégés (à gauche) et des "éclateurs" (à droite).

- dans une analyse de phénomènes transitoires on modélisera en R, L, C ou en lignes de transmission et on supposera que l'arc apparaît en un point choisi. Celui-ci ne peut évidemment que correspondre à un espace "éclateur".

La modélisation efface le caractère champ uniforme ou non uniforme du système sans altérer notablement les conclusions. L'analyse comprend donc 2 démarches :

- premièrement : où a lieu la décharge (ceci dépend fortement de la distribution du champ ("droite-gauche"))
- deuxièmement : comment se développe la décharge (ceci ne devrait pas dépendre fortement de la distribution du champ).



En se rappelant ces principes, nous allons commenter quelques travaux sur les phénomènes transitoires suivant les décharges dans les accélérateurs électrostatiques.

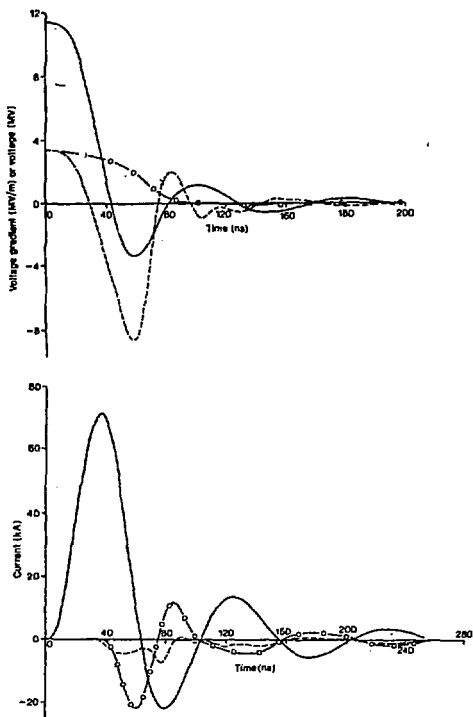
2) Structure du type machine électrostatique

A. Staniforth a étudié plusieurs cas.

a) un travail expérimental sur un générateur 1,5 MV.

On y a déterminé par l'expérience les inductances et résistances e. autres caractères de la décharge entre le terminal et le réservoir.

b) un travail expérimental et d'interprétation autour de la machine pilote de Daresbury ($V_{max} = 10$ MV). On a notamment déterminé expérimentalement la valeur de la résistance et de l'inductance de l'arc et calculé la variation de V et I en fonction du temps.



Terminal-pressure vessel breakdown at section 8.
Voltage gradient or terminal voltage; —, voltage of initial spark; ----, voltage gradient along the column at section 8; o-o-o-o, voltage gradient along the column at section 30.
Spark channel currents; —, current in the initial spark; —, on column at section 5; o-o-o-o, on tube at section 2.

fig. 9

La figure 9 qui illustre ces résultats montre des traits similaires à l'exemple simple des deux électrodes parallèles.

Le programme de calcul développé a également indiqué, moyennant des hypothèses appropriées, les séquences de décharge le long de la colonne.

c) en partant du formalisme utilisé on a effectué un calcul similaire pour le Tandem de Daresbury.

Pour 20 mV, I_{\max} atteint 320 kA. La tension passe à zéro après 160 ns, la première alternance de courant a une durée de 250 ns.

d) Commentaires.

- l'auteur s'interroge sur la validité du procédé de calcul. En particulier il se demande s'il n'y a pas de dissipation d'énergie dans les modes électromagnétiques d'ordre plus élevé. Il répond positivement à la première question, du moins pour le Vivitron, après une étude expérimentale spécifique. De même il dit qu'on peut négliger les modes plus élevés.

- les décharges entre terminal et réservoir sont provoquées par l'introduction d'une pointe. On ne dit rien sur l'origine "naturelle" des décharges.

- l'énergie emmagasinée atteint des valeurs notables, 200 kJ ; pour le Tandem de Daresbury. Elle est dissipée presque entièrement dans l'arc.

- on se trouve dans une situation de champ inhomogène typique de ces machines (par exemple $r_i/r_e = 1/3$). La décharge ne cause aucun dommage dans le gap, mais la tension qui se renverse provoque de nombreuses décharges secondaires dans la colonne avec un décalage de 80 à 400 ns par rapport au début de la décharge primitive dans le gap principal. Le courant de ces décharges peut atteindre 80 kA La propagation le long de la colonne se fait avec une vitesse $8 \cdot 10^7$ m/sec

III ENERGIE STOCKEE DANS LES MACHINES ELECTROSTATIQUES

Voici quelques estimations d'énergie stockée :

machine simple étage	7	MV	4	kJ	(163 pF)*
Tandem sans électrodes discrètes	13	MV	60	kJ	(710 pF)
Tandem avec électrodes discrètes	18	MV	114	kJ	(703 pF)
Vivitron	35	MV	440	kJ	(720 pF)
Daresbury	20	MV	200	kJ	(500 pF)
	30	MV	300	kJ	(333 pF)
le modèle élémentaire fig. 1	4	MV	600	J	(75 pF)
un compteur proportionnel	2	kV	1	μJ	
100 gr TNT			400	kJ	

* capacités calculées selon la loi $W = 1/2 CV^2$.

La libération de l'énergie stockée signifie la mise en mouvement des charges électriques. Dans un système à électrodes discrètes elles sont réparties sur une grande étendue, (champ plus faible) contrairement aux machines classiques où tout est concentré au terminal.

◇ ◇ ◇ ◇

IV PHENOMENES TRANSITOIRES DANS LE VIVITRON

1) Etude selon A. Staniforth

Le calcul prend des dimensions qui ne peuvent plus être maîtrisées.

Règle de conduite adoptée par A. Staniforth.

Le schéma Vivitron précise que chaque électrode discrète voit en face d'elle :

a) une portion du réservoir avec laquelle elle constitue un condensateur plan C//.

b) l'électrode voisine avec laquelle elle constitue un deuxième condensateur CD.

Toutes ces capacités peuvent être calculées facilement et en principe le procédé de A. Staniforth peut être appliqué.

Le choix suivant a été fait :

a) Dans une première étude, pas de C//. On se met dans le cas d'un "entassement" d'électrodes discrètes. Par contre on fait une simulation rendant compte des électrodes colonne. Pour simplifier, on calcule le cas d'un Vivitron avec 3 électrodes discrètes (16 MV) dans une seule direction radiale.

On imagine une décharge en un point que l'on s'impose entre 2 électrodes.

La figure 10 montre un des cas traités.

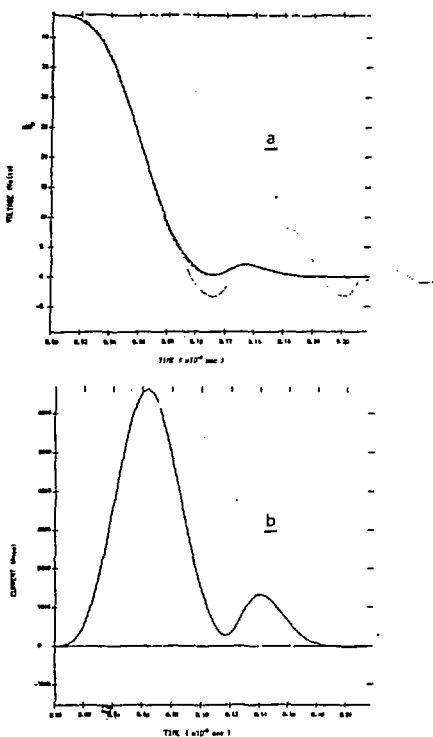
Le rapport traite six cas différents.

Quelques remarques en conclusion.

- le modèle ne reflète plus le Vivitron,

- dans le cas de décharges radiales les effets restent confinés à l'intérieur du système formé par les 2 électrodes concernées.

Dans certains cas (lorsque l'énergie emmagasinée entre 2 électrodes est plus grande) l'onde de tension peut aller d'une section à l'autre et provoque de nouvelles décharges.



- a) Evolution de la tension entre le terminal et la première électrode en cas de décharge
- b) Variation du courant dans l'arc.

fig. 10

- Il n'y a dans ce modèle aucune possibilité de propagation azymutale.
- A. Staniforth avait étudié le cas des électrodes connectées et non connectées. Le premier cas, retenu pour la discussion, est celui qui est recommandé.
- le phénomène se tient dans ~ 100 ns
- le courant maximum est relativement faible 6500 A à 12000 A
- l'énergie totale n'est jamais libérée en une seule fois.

b) Une deuxième étude a été faite sur le modèle dit azimutal. A nouveau il s'agit d'un système à 3 électrodes discrètes, mais à 7 branches, comme dans le Vivitron. Pour une première série de calculs il n'y a pas de couplage dans le sens axial. Les données introduites correspondent à une longueur fictive de 0,7 m et de 7 m.

Les calculs conduisent aux résultats suivants :

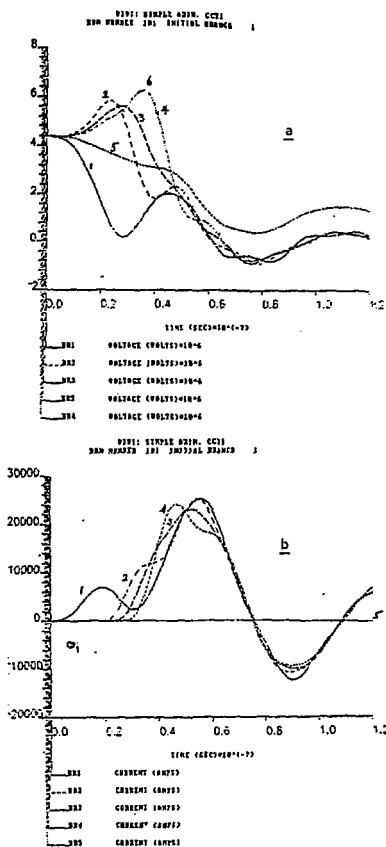
b1) si l'arc est créé entre l'électrode extérieure et le réservoir la tension sur cette électrode décrit une oscillation amortie avec faible excursion négative, le premier minimum est atteint après 20 ns. Les d et p entre les électrodes suivantes vers le centre de la machine augmentent jusqu'à 1,5 fois la valeur initiale avec des constantes de temps similaires. Beaucoup d'autres électrodes sont affectées par le phénomène, sans qu'on observe toujours de surtension notable. Voir fig. 11.

Bien sûr les surtensions mentionnées donnent lieu à d'autres décharges sur les électrodes concernées. Le courant peut atteindre 25 kA au maximum, à 60 ns environ de l'instant de déclenchement et est sensiblement en phase pour toutes les électrodes concernées.

b2) si l'arc est déclenché entre l'électrode la plus proche du terminal et ce dernier, on observe sensiblement le même phénomène qui s'étend cette fois-ci de l'intérieur vers l'extérieur. A nouveau seules les électrodes voisines sur un rayon sont concernées. L'intensité maximum est toujours situé entre 20 et 30 kA.

b3) Un troisième calcul se fait avec une extension en longueur (7m) mais sans couplage entre électrodes.

Cette fois-ci l'amortissement est plus lent, les temps plus longs, 50 ns environ, pour atteindre le premier minimum, les excursions de tension sont du même ordre de grandeur. Des surtensions donnant lieu à décharge vont être observées du côté opposé. La courbe des intensités atteint son maximum après 100 ns et avec des intensités de 150 kA au maximum.



a) Modèle azimutal. Exemple de variations de la tension entre électrodes pour différents modèles.
 b) Evaluation du courant dans l'arc.

fig. 11

b4) Un quatrième calcul a été fait en considérant 2 plans azimutaux et en les couplant mutuellement. La longueur coaxiale correspondrait à 1,418 m.

Cette fois-ci on verra l'onde de tension se déplacer à la fois radialement et axialement. C'est-à-dire on observera les mêmes phénomènes avec un déphasage sur les 2 plans azimutaux. A savoir, propagation de l'onde de tension de l'extérieur (origine de l'arc) vers l'intérieur. Les durées, les amortissements, les surtensions sont du même ordre de grandeur. Cette fois-ci le courant atteint 40 kA au maximum dans l'arc original et 20 kA dans les suivants.

b5) Le modèle azymutal ainsi décrit montre que la perturbation se propage en tournant ; évidemment aucune extension axiale n'est possible dans ce modèle.

2) Méthodes et justifications

Avant de tirer quelques conclusions utilisables pour notre propos, nous évoquons un autre travail effectué par A. Staniforth pour légitimer la méthode.

D'une façon générale cette méthode utilise une décomposition de circuits en éléments l , c , r . On peut faire une représentation suivant les lois habituelles dans le sens axial et dans le sens azimutal. Quant à l'arc, représenté par r_s et l_s , il constitue une singularité à l'endroit où il a lieu.

Une autre approche consiste à dire que l'ensemble du circuit représente une cavité résonnante. On peut l'étudier par les modèles de calcul et les modèles expérimentaux. Mais on ne peut plus y introduire la singularité constituée par l'arc. A. Staniforth a ainsi démontré que le Vivitron se comporte comme un résonateur favorisant le mode TEM (ligne coaxiale) qui, lui, peut s'analyser par la méthode indiquée ci-dessus.

Note : les valeurs de l et c introduites dans le calcul sont celles définies par la théorie de Kron ; c'est-à-dire, en partant des équations de Maxwell on transforme le formalisme des champs EH en un formalisme L,C. Le nombre d'éléments est lié à la dimension des matrices intervenant dans le calcul, ou bien encore à la capacité de l'ordinateur et le temps de calcul que l'on peut admettre.

V. CONCLUSION

1) Quelques conclusions pratiques pour le Vivitron ressortent du travail de A. Staniforth.

Il apparaît que l'on ne pourra pas calculer toutes les situations qui peuvent se présenter.

Deux modèles ont été utilisés, l'un purement axial, l'autre purement azimutal ;

- les constantes de temps sont situées entre 40 et 100 n sec

- ceci a comme conséquence que le courant maximum dans l'arc sera entre 20 et 40 kA. 150 kA correspond à un modèle non réaliste, azimutal à extension axiale, mais sans couplage dans le sens axial

- dans le modèle purement axial la décharge ne donne que peu de surtension

- dans le modèle azimutal simple et celui à 2 plans couplés, les surtensions atteignent 1,5 fois la valeur nominale

- l'étude de la propagation de l'onde de tension permet de prévoir les décharges secondaires. Dans le modèle axial pur, celles-ci restent confinées à l'espace situé entre 2 "cages d'écureuil". Il n'en est pas de même pour le modèle azimutal où la propagation est quasi instantanée dans le sens radial. Dans le modèle azimutal à 2 plans couplés, la propagation dans les deux plans est déphasée par rapport au 1er plan, mais suffisante pour provoquer des décharges secondaires.

- Dans un Vivitron réel avec extension axiale et extension radiale on peut imaginer le développement suivant. Par exemple une décharge dans la région centrale va donner lieu à une onde de tension qui se propagera de part et d'autre dans le sens longitudinal, préférentiellement en raison d'une impédance caractéristique plus faible, et dans le sens azimutal avec moins d'intensité. Cette propagation à la fois linéaire et de rotation affectera l'ensemble du système d'électrode. Ainsi toutes les électrodes seront concernées, mais de façon plus importante les deux concernées par l'arc initial. Des décharges secondaires peuvent apparaître sur la partie de la colonne correspondante et également sur les électrodes voisines, dans le même plan radial ou azimutal. Elles ne seront donc plus confinées dans l'espace entre deux électrodes comme l'indiquait le modèle axial simple.

L'intensité dans l'arc devrait être intermédiaire entre celle évaluée par le modèle axial et le modèle azimutal.

Les évolutions dans le temps restent similaires à celles qui ont été présentées.

Après une telle décharge la machine n'est pas complètement déchargée à moins qu'il n'apparaisse d'autres perturbations décalées dans le temps.

2) Analyse des phénomènes transitoires par C. Cooke

Dans une machine électrostatique, telle que le Vivitron, il faut atteindre les buts suivants :

- être plus tolérant vis à vis des perturbations dues aux décharges
- maintenir le courant de décharge dans des limites raisonnables
- éviter de focaliser la dissipation d'énergie dans une seule région.

Pour cela

- on divise la structure en segments multiples
- on augmente les impédances opposées aux ondes de tension
- on augmente les inductances.

C. Cooke analyse le Vivitron selon un modèle de type ligne de transmission. L'impédance caractéristique de la ligne représentée par deux électrodes voisines est de 176Ω , celle de l'électrode extérieure avec le tank 130Ω .

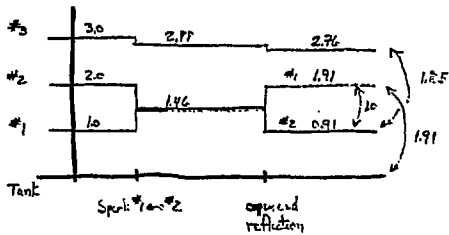
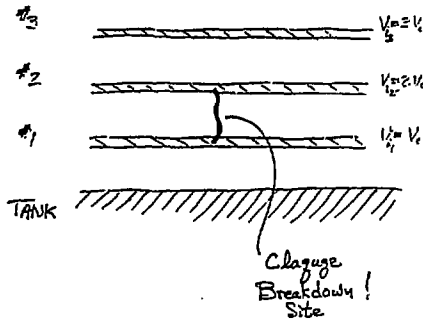
Le Vivitron peut donc être représenté par un système à 50 conducteurs ; C. Cooke le simplifie en étudiant un système à 3 conducteurs où il étudiera les décharges entre deux conducteurs voisins et leur conséquence.

Le figure 12 illustre la démarche.

Remarques et conclusions

- la tension des lignes adjacentes ne bouge pas beaucoup
- les surtensions extrêmes sont inférieures à 2 fois la valeur nominale initiale (A. Staniforth prévoyait des excursions extrêmes de tension de 1,5 fois la valeur initiale)
- les durées des impulsions ou de courant (du type fonction de Heaviside) sont déterminées par la longueur des "lignes", soit 10 n sec pour 3 m
- l'intensité de l'arc est donnée par l'impédance caractéristique $I = V/Z \approx 4.10^6/130 \approx 35 \text{ kA}$
- lorsque l'électrode s'approche de la colonne les choses se passent un peu différemment. C. Cooke développe un modèle où il montre que l'on a affaire à une ligne de transmission court-circuit ($Z_0 = 220 \Omega$)
- les démarches de A. Staniforth et de C. Cooke ne sont pas les mêmes et chacun doit supporter des critiques. Cependant il y a convergence dans les conclusions.

Inter-electrode Breakdown



3 Conductor Model: Short-Circuit Spark
Open Line End

fig. 12

Conclusions à la présente étude

- Il faut séparer les phénomènes *avant*
et *après décharge*
- avant décharge, il apparaît des phénomènes de prédécharge déterminés par la valeur du champ électrique et la géométrie. Pour la conception on recherchera à fixer des zones où la décharge sera favorisée (éclateur) et d'autres où elle est gênée. Ces zones d'éclateurs doivent être éloignées des éléments sensibles, des plots ou de l'intérieur de la colonne
- après décharge, apparaît le phénomène transitoire. Dans l'arc le courant devrait toujours être inférieur à 50 kA (du même ordre de grandeur que dans une machine à simple étage de quelques MV)
- la durée de l'alternance va de 20 à 100 nsec
- des ondes de tension se propagent sur les électrodes et induisent, après un décalage en temps, d'autres décharges
- des surtensions d'un facteur 1,5 (A. Ståniforth) à 2 (C. Cooke) peuvent apparaître. Si ces surtensions donnent évidemment lieu à de nouvelles décharges, les temps de formation peuvent être tels que dans bien des cas la surtension reste appliquée pendant des temps de cet ordre de grandeur.

On ne sait pas comment se comporte un isolateur solide dans ces conditions. On peut penser que cela se passe sans dommage, vu le temps très court mis en cause, étant donné l'expérience positive du fonctionnement des machines électrostatiques.

On ne connaît pas bien le comportement à l'intérieur du tube. Dans le vide la mobilité des électrons est bien plus grande et les décharges seront plus rapides. Si l'arc initial a lieu dans le système d'électrodes, extérieur au tube, une grande partie de l'énergie disponible aura été dissipée, avant l'arrivée de la surtension au point sensible sur le tube. Les dommages ne devraient être que faibles.

Par contre si la décharge commence dans le tube, elle se propagera à l'extérieur suite au court-circuit induit dans le tube par les décharges.

- Finalement on se rend compte que pour ces phénomènes rapides (quelques dizaines de nsec), il se peut que le fonctionnement des éclateurs ne sera pas toujours efficace, notamment pour les décharges dans le vide.
- Les investigations ne sont pas terminées. D'autres travaux et réflexions seront menés dans l'avenir.



