

THESE

présentée

A L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE

en vue de l'obtention

du TITRE de DOCTEUR de 3° CYCLE

Spécialité : Génie Electrique

Option : Electronique Industrielle et Electrotechnique

par

Léon VOUMBO MATOUMONA

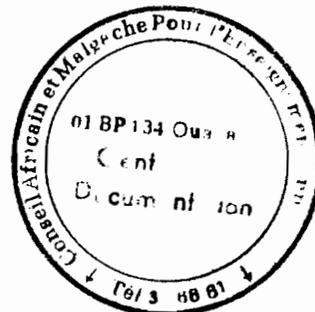
Maître ès-Sciences E.E.A.

CONTRIBUTION A LA DETERMINATION DE LA RIGIDITE DIELECTRIQUE D'ISOLANTS EN COUCHES MINCES CHAMP DE RUPTURE SPECIFIQUE

Soutenue le 2 mars 1984 devant le jury composé de :

- | | | | |
|-----|-------------------|--|------------|
| MM. | B. TRANNOY | Professeur à l'I.N.P. de Toulouse | Président. |
| | A.-K. JONSCHER | Professeur à l'Université de Londres (Chelsea College) | } Membres |
| | R. LACOSTE (dir.) | Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse | |
| | C. MAYOUX | Maître de Recherche au C.N.R.S. | |
| | J. MERIC | Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse | |
| | Y. SEGUI | Chargé de Recherches au C.N.R.S. | |

CONSEIL AFRICAIN ET MALGACHE
 POUR L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
 C. A. M. E. S. — OUAGADOUGOU
 Arrivée 19 JAN 1984
 Enregistré sous n° # 0 2 2 6 4^e



VOUMBO MATOUMONA Léon - Contribution à la détermination de la rigidité diélectrique d'isolants en couches minces. Champ de rupture spécifique.

Th. Doctorat 3ème Cycle - Spécialité Génie Electrique
I.N.P. Toulouse ; 1984

RESUME :

L'auteur étudie expérimentalement sur des couches minces de silice et d'alumine soumises à des champs électriques en forme de crêneaux, les variations du temps de retard au claquage d'un isolant solide en fonction de l'amplitude de ces crêneaux.

Il décrit l'appareillage qu'il a conçu et mis au point, appareillage entièrement automatisé grâce à un microordinateur qui le pilote, collecte les données et en assure le traitement statistique. Compte tenu de la nature des évolutions observées, il propose de retenir comme critère caractéristique de la tenue du matériau, l'amplitude du champ pour laquelle le temps de retard au claquage devient infini : "champ de rupture spécifique". A titre d'exemple d'application, ce concept est substitué à la notion traditionnelle de rigidité diélectrique dans l'étude de la tenue de couches isolantes en fonction de leur épaisseur.

MOTS CLES :

- Rigidité diélectrique
- Isolants électriques
- Couches minces

JURY et date de soutenance : 2 Mars 1984

Président : B. TRANNOY
Membres : AK. JONSCHER
R. LACOSTE
C. MAYOUX
J. MERIC
Y. SEGUI

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE

PRESIDENT D'HONNEUR

M. le Professeur MONTEL

PRESIDENT

M. le Professeur NOUGARO

VICE-PRESIDENT

| | |
|--------------|------------|
| M. ALBERTINI | Professeur |
| M. BUGAREL | Professeur |
| M. DABOSI | Professeur |
| M. MARTY | Professeur |

| | |
|---------------------------------|--|
| Directeur de l'E.N.S.A.T. | M. le Professeur CANDAU |
| Directeur de l'E.N.S.C.T. | M. le Professeur LATTES |
| Directeur de l'E.N.S.E.E.I.H.T. | M. l'Ingénieur Principal de l'Armement CRESTIN |
| Directeur de l'I.G.C. | M. le Professeur ANGELINO |

SECRETAIRE GENERAL

M. CROS

PROFESSEURS HONORAIRES

Melle BERDUCOU
M. BIREBENT
M. DIEHL
M. HAMANT

PROFESSEURS

| | |
|--------------|---|
| M. ALBERTINI | Cytologie et pathologie végétales |
| M. ALQUIER | Mécanique |
| M. AMALRIC | Micro-électronique, micro-ondes |
| M. ANDRE | Sciences Agronomiques |
| M. ANGELINO | Génie Chimique |
| M. BAJON | Electronique, Electrotechnique, Automatique |
| M. BAUDRAND | Electronique, Electrotechnique, Automatique |
| M. BELLET | Mécanique-Hydraulique |
| M. BEN AÏM | Génie Chimique |
| M. BONEL | Chimie Appliquée |
| M. BOUCHER | Electrotechnique - Electronique |
| M. BOURGEAT | Pédologie |
| M. BRUEL | Informatique |
| M. BUGAREL | Génie Chimique |
| M. BUIS | Biologie Quantitative |
| M. CABANEL | Informatique Fondamentale et Appliquée |
| M. CALMON | Chimie agricole |
| M. CANDAU | Zootecnie |
| M. CASTANIE | Automatique, Informatique Industrielle |
| M. CONSTANT | Chimie minérale |
| M. COSTES | Electronique, Electrotechnique, Automatique |
| M. COUDERC | Génie Chimique |
| M. DABOSI | Métallurgie et réfractaires |
| M. DAT | Mécanique - Hydraulique |
| M. DE FORNEL | Electrotechnique, Electronique |

| | |
|---------------|---|
| M. DELMAS | Chimie Organique |
| M. DOMENECH | Génie Chimique |
| M. ECOCHARD | Amélioration des Plantes |
| M. ENJALBERT | Génie Chimique |
| M. FABRE | Mécanique - Hydraulique |
| M. FALLOT | Biotechnologie végétale appliquée |
| M. FARRENY | Informatique fondamentale appliquée |
| M. FOCH | Electronique, Electrotechnique, Automatique |
| M. GARDY | Génie Chimique |
| M. GASET | Chimie industrielle |
| M. GIBERT | Génie Chimique |
| M. GILOT | Génie Chimique |
| M. GOURDENNE | Chimie - Physique |
| M. GRUAT | Mécanique - Hydraulique |
| M. HA MINH | Mécanique |
| M. HOFFMANN | Electronique, Electrotechnique, Automatique |
| M. KALCK | Chimie minérale |
| M. LABAT | Ichtyologie appliquée |
| M. LAGUERIE | Génie Chimique |
| M. LEFEUVRE | Electronique, Electrotechnique, Automatique |
| M. LENZI | Chimie industrielle |
| M. MARTY | Electronique, Electrotechnique, Automatique |
| M. MASBERNAT | Mécanique - Hydraulique |
| M. MATHEAU | Electronique, Electrotechnique, Automatique |
| M. MATHIEU | Chimie analytique |
| M. MOLINIER | Génie Chimique |
| M. MONCOULON | Sciences Agronomiques |
| M. MONTEL | Chimie inorganique |
| M. MORA | Génie Chimique |
| M. MORARD | Physiologie végétale appliquée |
| M. MORELIERE | Electronique, Electrotechnique, Automatique |
| M. NOAILLES | Mathématiques |
| M. NOUGARO | Mécanique - Hydraulique |
| M. PAREILLEUX | Sciences Agronomiques |
| M. PECH | Sciences Agronomiques |
| M. PLANCHON | Photo-synthèse et amélioration des plantes |
| M. RIBA | Génie Chimique |
| M. ROBERT | Génie Chimique |
| M. RODRIGUEZ | Informatique |
| M. SALLE | Informatique fondamentale appliquée |
| M. TERRON | Zoologie |
| M. THIRRIOT | Mécanique - Hydraulique |
| M. TRANNOY | Electronique, Electrotechnique, Automatique |
| M. TRUCHASSON | Mécanique - Hydraulique |
| M. VOIGT | Chimie minérale |

A toi Marc -
Rien que le courage et
le travail qui nous
sauveras -
Léon

A mon Père,
A ma Mère,
A mes Frères et Soeurs.

à tous mes Amis,

à A. CLAVERIE,

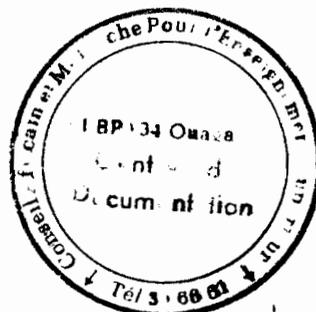
à Ch. WANKO.

Merci à tous ceux qui m'ont aidé et encouragé.

Sommaire

Sommaire

| | |
|--|----|
| <u>INTRODUCTION</u> | 1 |
| <u>CHAPITRE I. METHODE ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX</u> | 4 |
| I.1. Application de rampes de tension | 7 |
| I.1.1. Principe de la mesure | 7 |
| I.1.2. Montage et appareillage | 10 |
| I.1.3. Programme | 10 |
| I.2. Application de créneaux de tension | 16 |
| I.2.1. Principe de la méthode | 16 |
| I.2.2. Montage et appareillage | 18 |
| I.2.3. Programme | 23 |
| I.2.3.1. Programme I | 25 |
| I.2.3.2. Programme II | 25 |
| I.2.3.3. Programme III | 27 |
| <u>CHAPITRE II - ECHANTILLONS</u> | 29 |
| II.1. Electrodes | 29 |
| II.1.1. Echantillons de silice | 29 |
| II.1.2. Echantillons d'alumine | 31 |
| II.2. Préparation des échantillons | 31 |
| II.2.1. Silice thermique | 31 |
| II.2.1.1. Nettoyage initial des substrats de silicium | 31 |
| II.2.1.2. Oxydation | 33 |
| II.2.1.3. Recuit | 33 |
| II.2.2. Silice obtenue par dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma | 34 |
| II.2.2.1. Réacteur | 34 |
| II.2.2.2. Méthode de dépôt | 36 |
| II.2.3. Alumine | 36 |



CHAPITRE III - RESULTATS EXPERIMENTAUX - DEFINITION D'UN CHAMP DE RUPTURE SPECIFIQUE

| | |
|--|----|
| III.1. Dégradations causées par les ruptures autocatrisantes sur la surface de l'échantillon | 37 |
| III.2. Caractérisation électrique des claquages | 41 |
| III.2.1. Grandeurs et représentations retenues | 41 |
| III.2.2. Variation du nombre de ruptures par créneau en fonction du rang et de l'amplitude de ce créneau | 45 |
| III.2.3. Variations de la durée moyenne cumulée entre ruptures en fonction du rang du créneau | 49 |
| III.2.4. Histogramme des durées entre ruptures consécutives | 53 |
| III.2.5. Temps de retard cumulé | 53 |
| III.3. Définition et détermination du champ de rupture spécifique | 58 |
| III.3.1. Définition | 38 |
| III.3.2. Méthode de détermination | 60 |
| III.3.3. Résultats et application | 64 |
| III.3.4. Autre définition du champ de rupture spécifique | 68 |

CHAPITRE IV - DISCUSSION DES RESULTATS

| | |
|---|-----|
| IV.1. Interprétation des temps de conditionnement | 74 |
| IV.1.1. Utilisation des théories électroniques | 75 |
| IV.1.1.1. Claquages électroniques localisés de KLEIN | 75 |
| IV.1.1.2. Claquages dus à une augmentation continue du courant dans l'isolant | 86 |
| IV.1.2. Utilisation de la théorie thermique | 87 |
| IV.2. Interprétation de la variation du champ de rupture spécifique avec l'épaisseur de l'échantillon | 91 |
| IV.2.1. Théorie électronique | 92 |
| IV.2.2. Théorie thermique | 96 |
| CONCLUSION | 99 |
| BIBLIOGRAPHIE | 104 |
| ANNEXE 1 | 108 |
| ANNEXE 2 | 110 |
| ANNEXE 3 | 116 |

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les constructeurs et les utilisateurs de matériel électrique sont confrontés de plus en plus durement à la double exigence d'une élévation des contraintes électriques, thermiques ou mécaniques imposées aux isolations et d'une rigueur accrue dans la continuité des services excluant l'aléa de pannes.

La recherche constante dans l'amélioration de la qualité des équipements électriques et électroniques a conduit les services de contrôle de qualité et de fabrication dans les entreprises, à l'utilisation systématique de moyens d'essais pour les épreuves de rigidité diélectrique. L'introduction de ces contrôles dans le domaine de la microélectronique, des sous ensembles de haute technicité et des composants à grande fiabilité entraîne une évolution parallèle des moyens d'essais de rigidité diélectrique. En effet, ces paramètres ont une incidence directe sur la durée de vie des matériels.

Si l'on ajoute à cela la nécessité d'aller au-delà de simples mesures de caractérisation pour bien connaître les possibilités des produits, il est nécessaire d'effectuer une étude fondamentale du phénomène de rupture diélectrique ; une telle recherche amènerait des progrès sérieux et non fortuits dans l'utilisation des matériaux isolants.

La rigidité diélectrique constitue la caractéristique type des isolants, car elle permet de fixer le seuil maximal du champ électrique que l'on peut appliquer à ces matériaux et on cherche, depuis très longtemps, à analyser les principaux phénomènes qui sont à l'origine du

claquage. L'interprétation des résultats se révèle particulièrement complexe ; c'est pourquoi, les processus de rupture étant essentiellement aléatoires, il est nécessaire, sur le plan expérimental, d'avoir recours à la statistique.

Pour notre part, nous avons centré nos investigations sur la relation pouvant exister entre le temps de retard au claquage et le champ de claquage proprement dit, ce qui nous a conduit à la définition d'une grandeur spécifique, caractéristique de la rupture d'un matériau dans des conditions expérimentales données.

Pour ce faire, nous avons utilisé des échantillons autocicatrisables, consistant en couches minces minérales, essentiellement des dépôts de silice préparés par la Centrale de Technologie du Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes (LAAS) du CNRS.

Le choix de tels films, d'épaisseurs comprises entre quelques centaines et quelques milliers d'Angströms, résulte des considérations suivantes :

-Ils peuvent être élaborés sur place dans des conditions telles que l'on soit à peu près sûr de leur composition ; on dispose ainsi d'échantillons, sinon parfaitement purs, du moins comprenant des défauts contrôlés et on minimise ainsi l'incidence des phénomènes volumiques.

-Munis d'électrodes minces, ils sont autocicatrisables, l'énergie dissipée dans un canal de rupture entraînant, lors d'un claquage, l'évaporation du métal et donc l'élimination du défaut. On peut ainsi, sous une même électrode, obtenir plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de ruptures permettant d'avoir recours à la statistique.

-Enfin, il suffit de sources à basse tension pour obtenir les claquages, ce qui élimine certaines difficultés technologiques, ne serait-ce que le risque de contournement.

Après avoir décrit les dispositifs expérimentaux mis au point, nous présentons dans le mémoire les échantillons utilisés et les résultats obtenus qui nous ont amené à définir, comme indiqué plus haut, un nouveau critère de tenue diélectrique que nous proposons d'appeler "champ de rupture spécifique". Nous l'appliquons à quelques matériaux et nous l'utilisons pour examiner l'incidence, sur la rupture, de l'épaisseur de l'échantillon, en liaison avec les principales théories qui tentent d'en rendre compte.

CHAPITRE I
"METHODE ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX"

I-METHODE ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

Lorsqu'on applique à une structure métal-isolant-semiconducteur ou métal-isolant-métal un champ électrique de valeur suffisamment élevée, le matériau devient brusquement conducteur : c'est le claquage ou rupture diélectrique. Il apparaît alors aux bornes de cette structure, une chute de tension, accompagnée éventuellement d'une faible émission de lumière./3/

Le temps écoulé entre l'instant d'application du champ et celui de la rupture est appelé "temps de retard au claquage".

Cette durée nécessaire laisse penser qu'une certaine accumulation de défauts ou de charges, en surface et/ou en volume, doit se mettre en place sous une concentration suffisante pour qu'apparaisse le claquage. Nous dirons avec A.K. JONSCHER et R. LACOSTE /4/ qu'il s'agit d'un "conditionnement" nécessaire dont la réalisation n'est pas instantanée et demande une durée qui dépend du champ électrique appliqué.

Comme indiqué dans notre introduction, l'un des avantages principaux du travail sur couches minces, réside dans le fait de l'autocicatrisation possible de ce type de structure /15/ : tant que le champ n'est pas trop élevé, le diélectrique, devenu conducteur au moment du claquage, repasse rapidement à l'état isolant par suite de la disparition, par fusion ou plutôt explosion /29/, de la partie de l'électrode, typiquement d'un millier d'angströms d'épaisseur, située au droit du canal de rupture. Ainsi, la partie restée saine du matériau se trouve à nouveau soumise au champ électrique, ce qui permet d'observer plusieurs fois le phénomène et d'obtenir une distribution des temps de retard. Par contre, pour des

valeurs importantes du champ, il y a formation d'un court-circuit permanent qui ne peut être éliminé éventuellement que par apport d'une énergie extérieure suffisante./37/

On peut, pour l'étude du phénomène de rupture diélectrique, adopter plusieurs formes de tension.

Dans le cas d'une rampe, comme l'indique la figure I-1, il apparaît d'abord des claquages autocicatrisants, ensuite un court-circuit définitif de l'échantillon lorsque le gradient devient élevé. C'est ce dernier qu'il faut éviter si l'on veut disposer d'un grand nombre de données pour la statistique.

Pour n'avoir que des claquages autocicatrisants et pour limiter l'échauffement de l'échantillon, qui est possible dans le cas d'une rampe, nous avons adopté, pour nos expériences définitives une forme de tension rectangulaire, d'amplitude réglable, permettant d'observer un grand nombre de ruptures correspondant à des temps de retard τ distribués (Figure I-2). La quantité d'informations à traiter et la rapidité même du phénomène ont alors nécessité une automatisation du dispositif de mesure et un traitement des informations par un micro-ordinateur.

Les échantillons du matériau à étudier sont soumis à une tension à travers une résistance de limitation de courant R_l et une résistance de détection R_d . (Figure I-3) /3//24/

Chaque rupture se traduit, dans la couche d'isolant, par une brusque chute de la tension V_e , accompagnée du passage d'un courant. Ce dernier détermine, aux bornes de R_d , une différence de potentiel V_d .

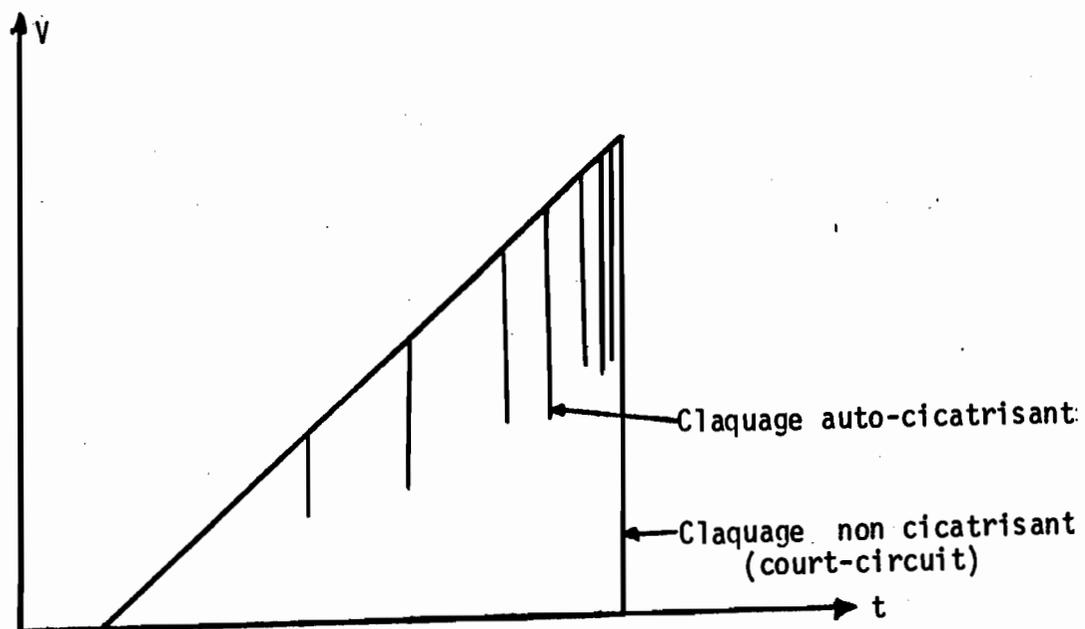


Figure I.1. Rampe de tension

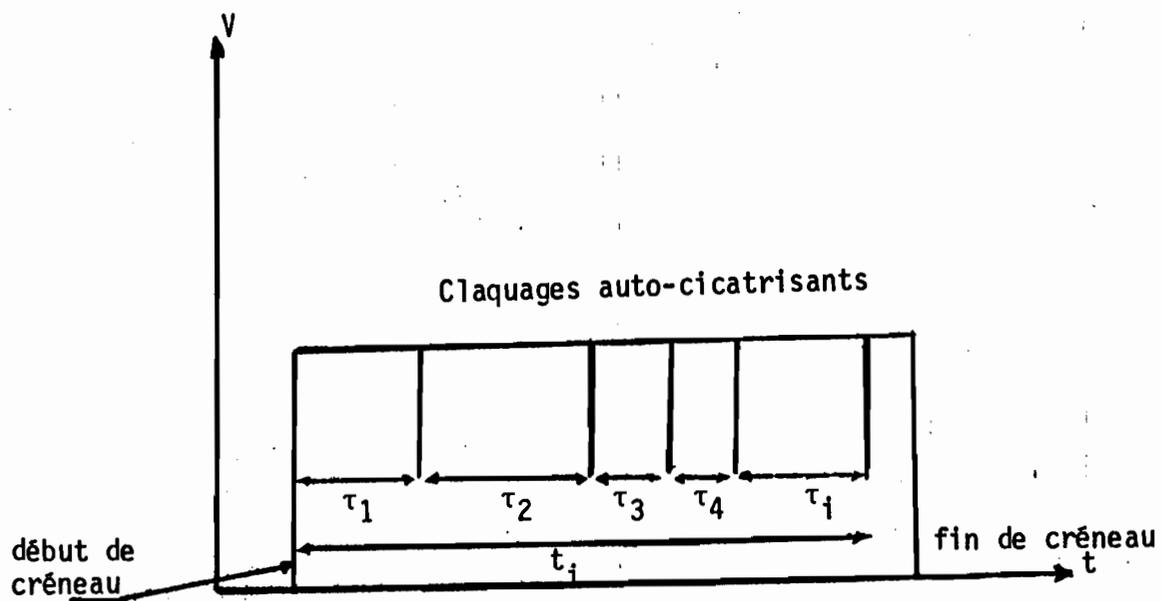


Figure I.2. Créneau de tension

Lorsqu'on applique une rampe de tension, la croissance linéaire de V_e amène un claquage que l'on observe sous la forme des figures I-4 a et b, la rampe étant arrêtée après cette première rupture autocicatrisante.

Au contraire, lorsqu'il s'agit d'un créneau de tension, l'autocicatrisation de l'échantillon permet un rétablissement du champ dans le matériau après chaque rupture comme l'indiquent les figures I-5 a et b.

I-1 APPLICATION DE RAMPES DE TENSION

I-1-1 Principe de la mesure

L'application d'une rampe de tension permet d'évaluer l'ordre de grandeur du champ de claquage. Une détermination plus précise nécessiterait une étude en fonction de la vitesse de montée.

La tension appliquée est donc élevée linéairement jusqu'à la première rupture, puis on court-circuite instantanément l'échantillon jusqu'à la fin de la rampe qui correspond à une valeur du champ que l'on sait être largement supérieure au gradient disruptif. La partie saine de l'isolant, qui s'est autocicatrisée, n'est donc pas soumise à une contrainte supplémentaire jusqu'à l'application d'une nouvelle rampe donnant lieu à un autre claquage et ainsi de suite. L'utilisation d'un modèle statistique à ces valeurs, ou plutôt une simple moyenne, étant donné qu'on ne recherche pas une grande précision, donne l'ordre de grandeur à partir duquel se définissent les amplitudes des créneaux à appliquer pour la détermination du champ de rupture spécifique, tel que nous le définirons plus loin.

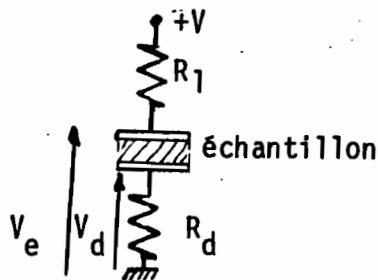


Figure I.3. Application de la tension sur l'échantillon

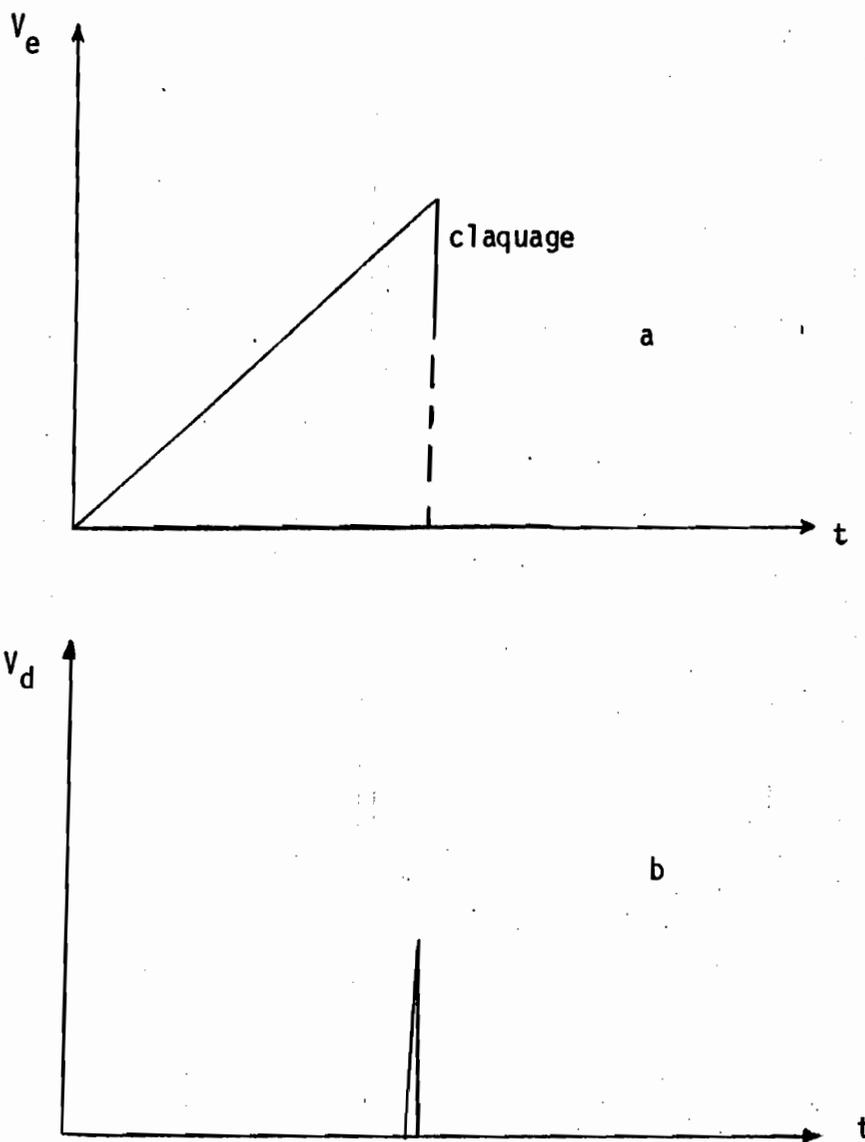


Figure I.4. Application d'une rampe de tension
a. Signal aux bornes de l'échantillon
b. Signal aux bornes de la résistance de détection

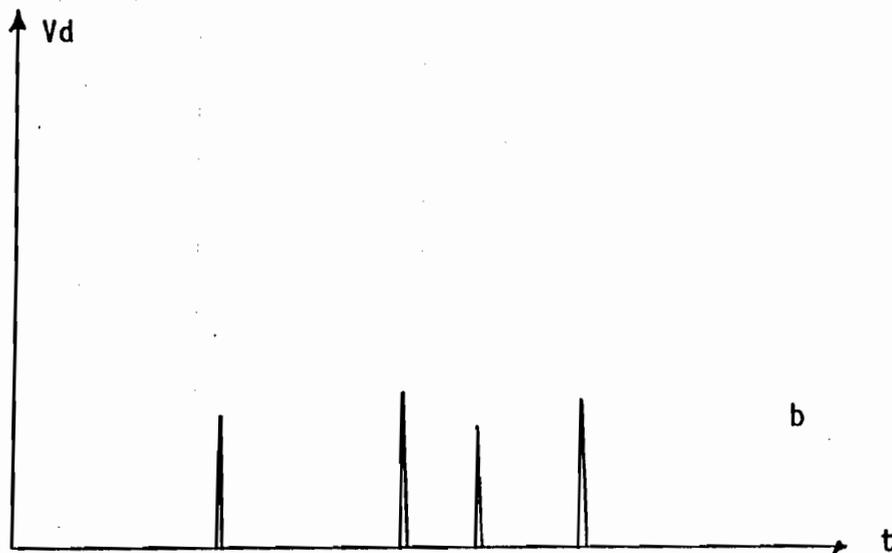
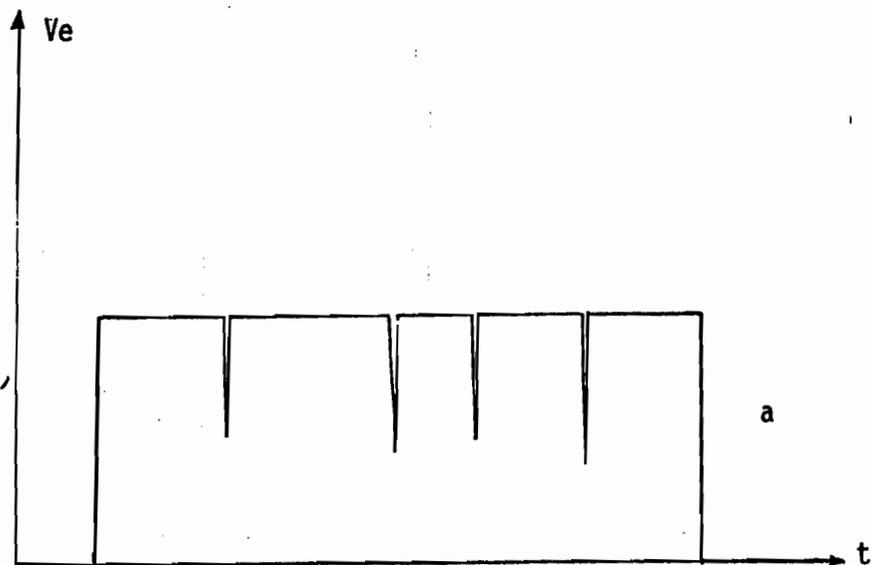
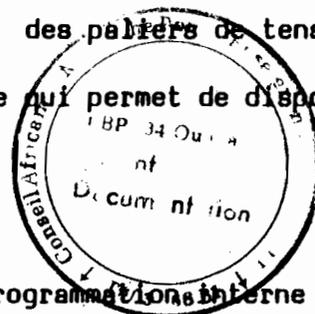


Figure I.5. Application d'un créneau de tension
a signal aux bornes de l'échantillon
b signal aux bornes de la résistance de détection

I-1-2 Montage et appareillage

Le dispositif de mesure représenté sur la figure I-6 est automatisé. Un micro-ordinateur HP 85 assure la commande d'une alimentation ainsi que celle d'un voltmètre ; il relève les tensions de rupture fournies par ce dernier.

C'est une alimentation programmable qui fournit les rampes de tension. Elle est constituée d'un convertisseur digital analogique HP 5950iA qui commande une alimentation de type HP 6209B (0, 340 Volts). La forme de la rampe est obtenue en produisant des paliers de tension élémentaires d'amplitude plus ou moins grande, ce qui permet de disposer de plusieurs vitesses de montée.



Le voltmètre (RACAL DANA 6000) possède une programmation interne lui permettant de conserver en mémoire la tension maximale qui correspond précisément dans notre cas à la valeur de rupture. En effet, immédiatement après un claquage, la différence de potentiel aux bornes de l'échantillon s'effondre ; on la maintient à zéro grâce au dispositif que nous appelons "détection rupture". Ce dernier (Figure I-7) opère de la façon suivante : lors du claquage, le signal, produit aux bornes de Rd par le courant impulsionnel qui circule dans l'isolant, commande le circuit monostable 74121 ; celui-ci actionne, par l'intermédiaire d'un amplificateur, le thyristor 2N1599 qui met l'échantillon et Rd, donc le voltmètre, en court-circuit.

I-1-3 Programme

Il permet, d'une part, d'élaborer les rampes de tension successives et, d'autre part, de faire l'acquisition des valeurs des tensions de

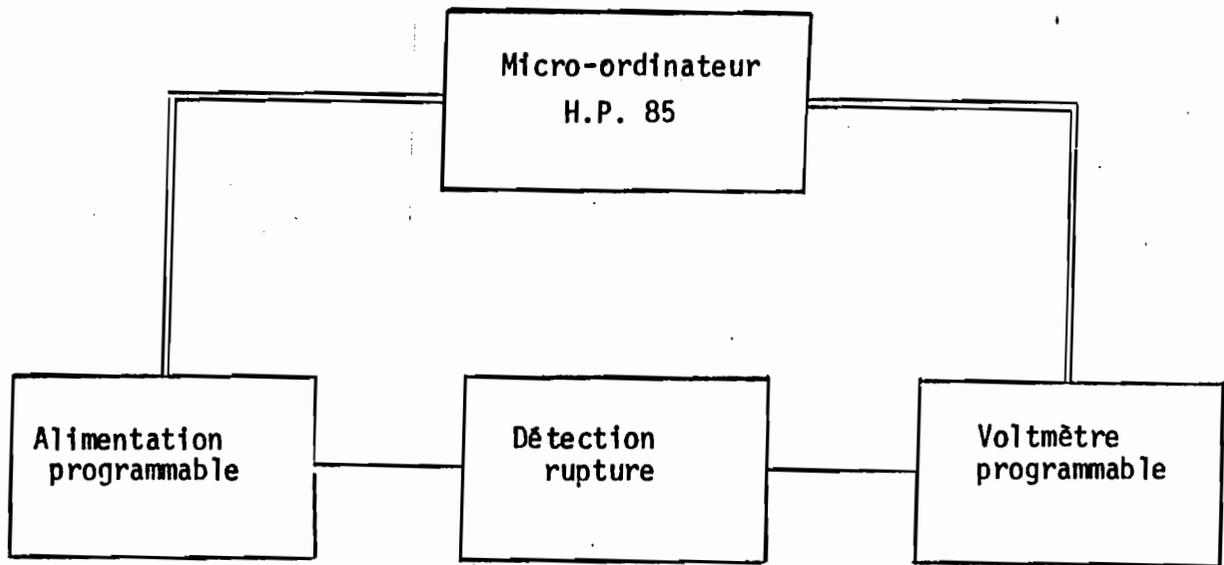


Figure I.6. Schéma bloc du dispositif expérimental pour l'application de rampes

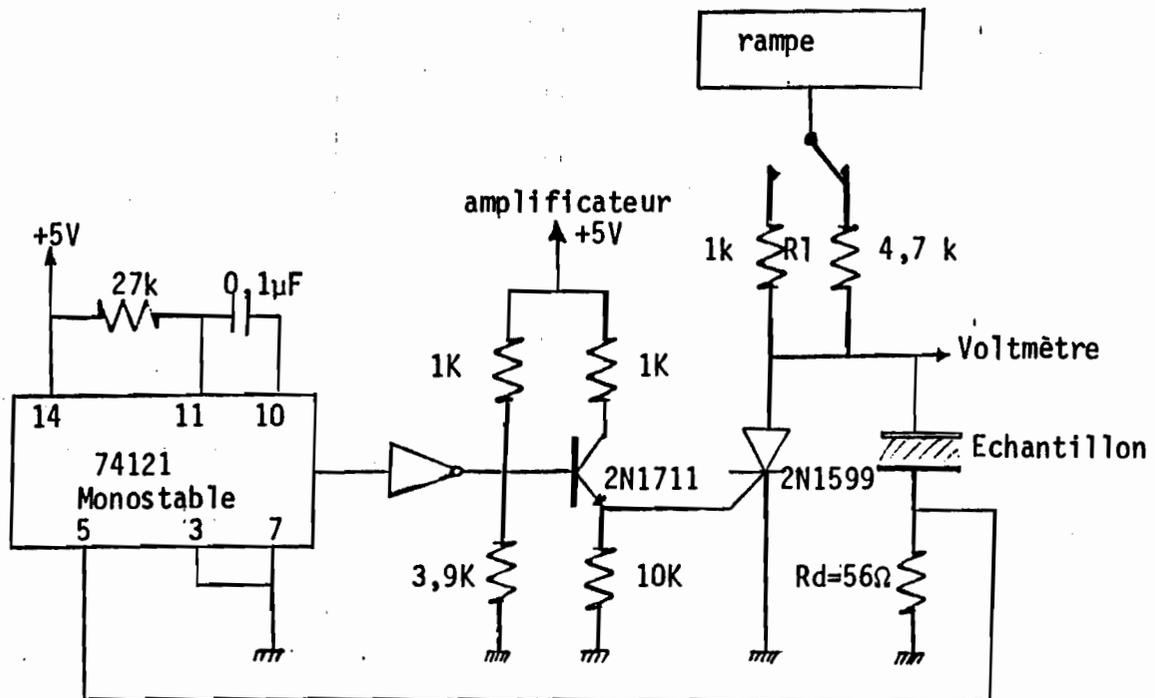


Figure I.7. Schéma électrique du dispositif de détection du claquage et de la mise en court-circuit de l'échantillon

claquage ainsi que d'en calculer la moyenne. L'organigramme correspondant fait l'objet de la figure I-8.

Au début, on procède aux initialisations nécessaires à sa bonne marche : on fixe la tension maximale (0, 340 volts) de la rampe, l'incrémentation de la tension qui définit la vitesse de montée et le nombre d'essais à réaliser ainsi que la dénomination de l'échantillon permettant d'obtenir une feuille de mesures nominative.

Ensuite, l'HP 85 effectue les conversions nécessaires pour commander le convertisseur digital-analogique qui agit, à son tour, sur le générateur de tension.

L'HP 85 commande aussi le voltmètre pour qu'il fonctionne en mode "Min-Max-Average", position pour laquelle il garde en mémoire les valeurs minimale, maximale et moyenne de la tension mesurée. Ce programme interne du voltmètre, utilisé ici pour la seule valeur maximale, est d'une grande utilité car il permet de lire la tension de rupture comme expliqué plus haut.

Afin de calculer la vitesse de montée de la rampe, on la chronomètre directement par le micro-ordinateur qui relève les dates de début et de fin de cycle.

Le nombre d'essais demandés étant atteint, il est édité une feuille de mesures suivie des courbes correspondantes : tension de rupture en fonction du numéro de claquage, histogramme et diagramme de Weibull.

Le listing correspondant à ce programme est donné en annexe 1.

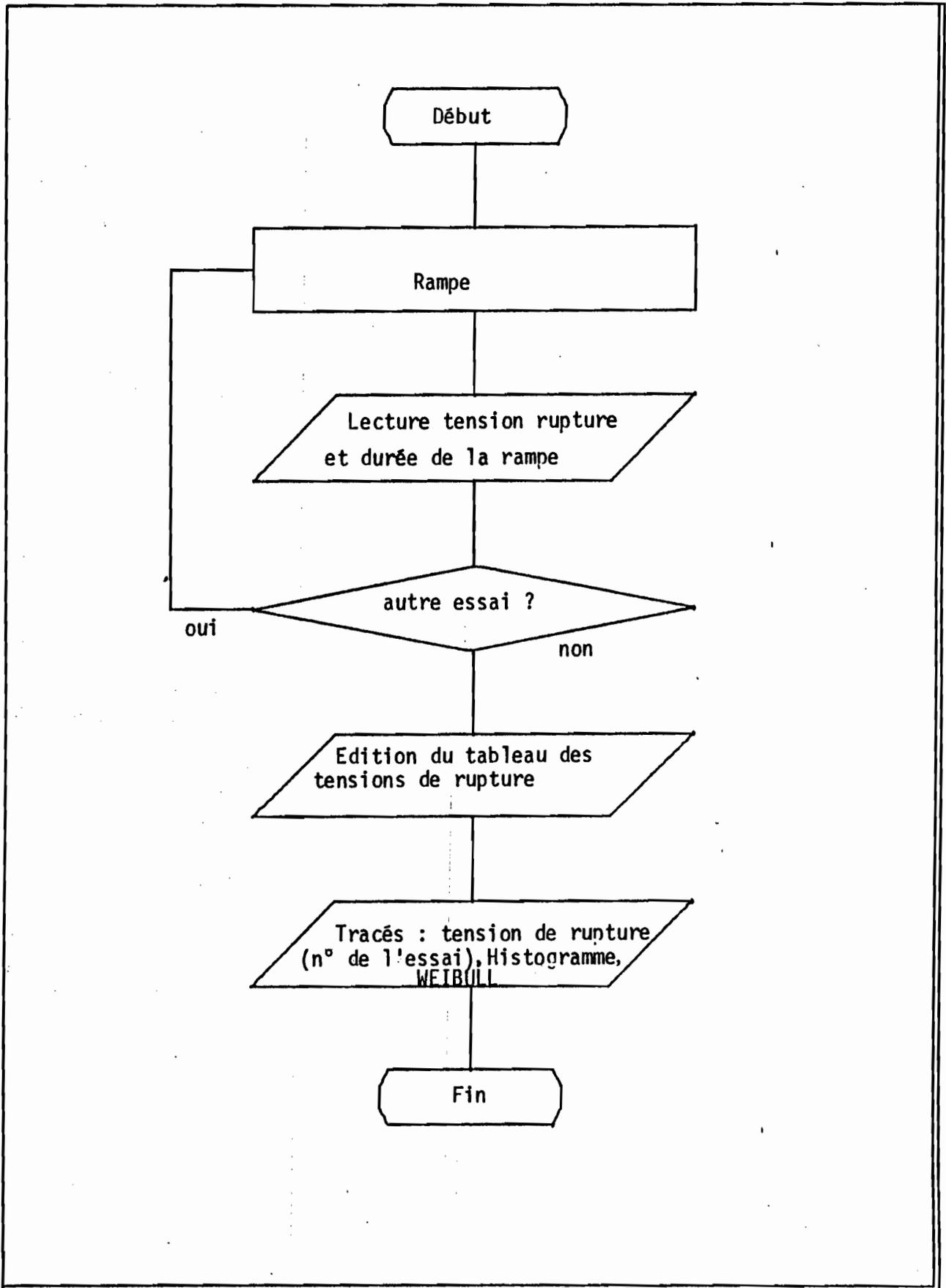


Figure I.8. Organigramme du programme relatif aux rampes

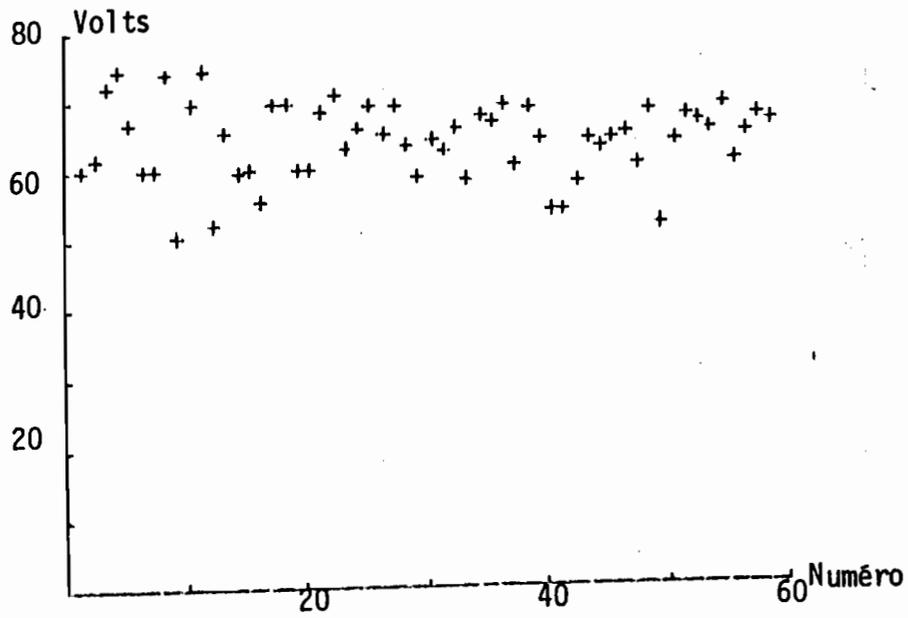


Figure I.9. Tension de rupture (en volts) en fonction du numéro de claquage

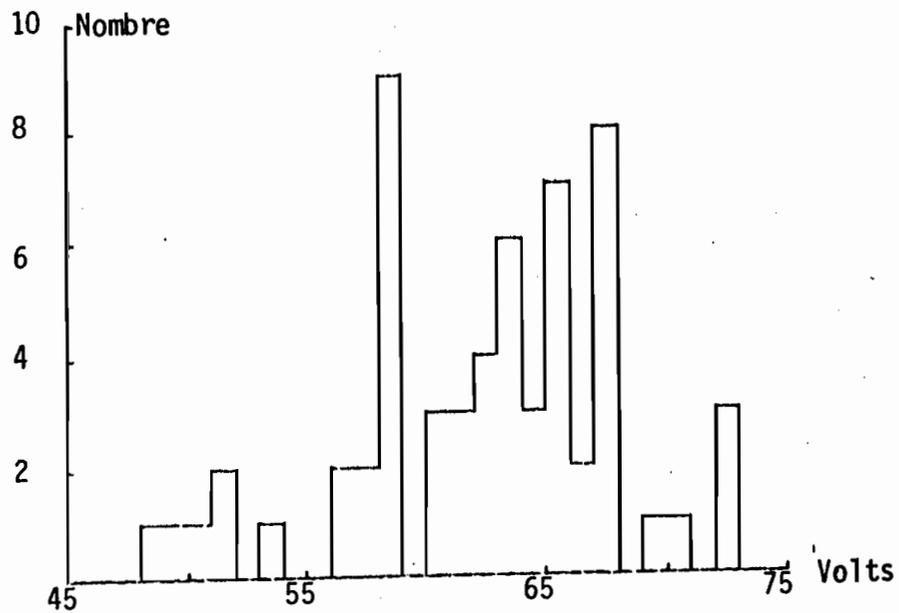


Figure I.10. Histogramme des tensions de rupture (en volts)

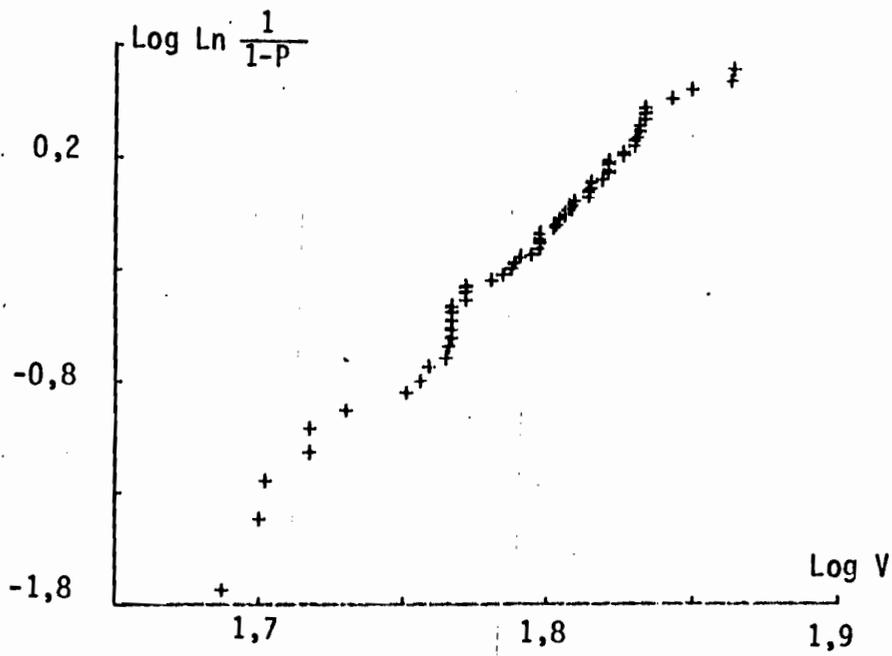


Figure I.11. Diagramme de WEIBULL

I-2 APPLICATION DE CRENEAUX DE TENSION

I-2-1 Principe de la méthode

Comme indiqué précédemment, le principe de l'expérimentation est basé sur le fait qu'une des électrodes appliquée sur l'isolant, l'électrode supérieure, constituée d'une mince couche de métal, typiquement 800 Å, disparaît au droit du canal où se produit un claquage, éliminant ainsi la partie dégradée et permettant d'observer une nouvelle rupture dans la partie demeurée saine.

La durée τ séparant deux claquages successifs est d'autant plus grande, en moyenne, que le champ appliqué E est plus faible.

Pour caractériser par un nombre la tenue du matériau sous la contrainte électrique E , on peut procéder de deux façons :

- Relever l'histogramme des durées τ , chacune apparaissant comme le temps de retard au claquage depuis le plus récent rétablissement de la tension sur l'échantillon. On tire :

- .soit la valeur la plus probable τ_p ,
- .soit la valeur moyenne τ_m . (figure I-12)

- Tracer le diagramme correspondant à la statistique de WEIBULL /46/ relative au retard cumulé t , c'est à dire à la durée séparant l'instant initial d'application de la tension de l'instant d'apparition de la rupture considérée. Plus précisément, en se référant à la figure I-2, on définit ainsi t par :

$$t_j = \sum_i \tau_i$$

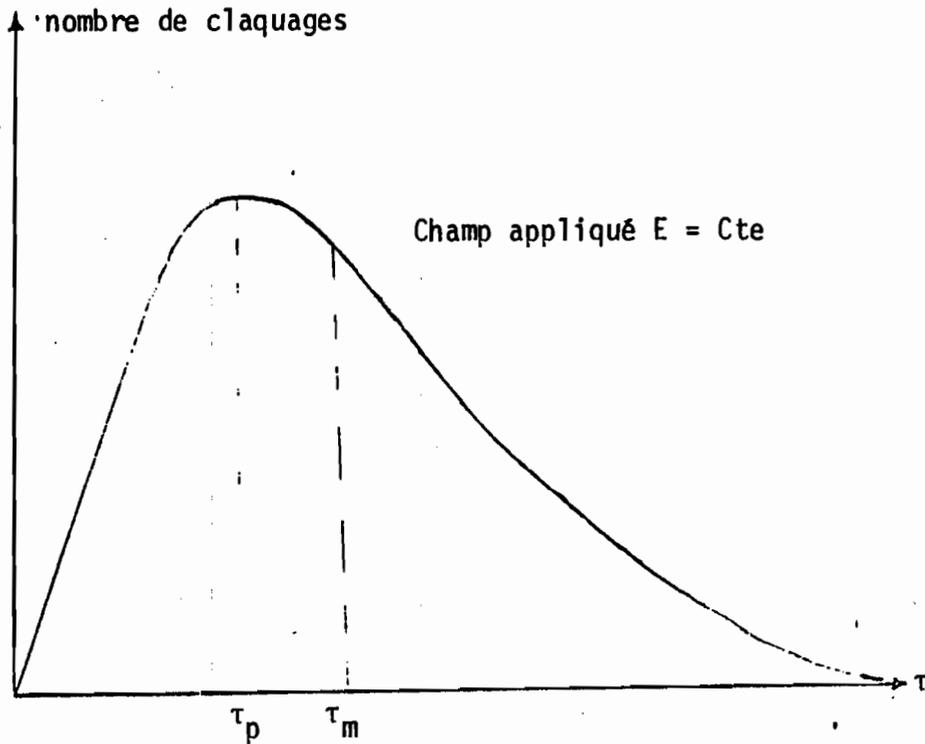


Figure I.12. Durées caractéristiques tirées de l'histogramme des temps de retard au claquage

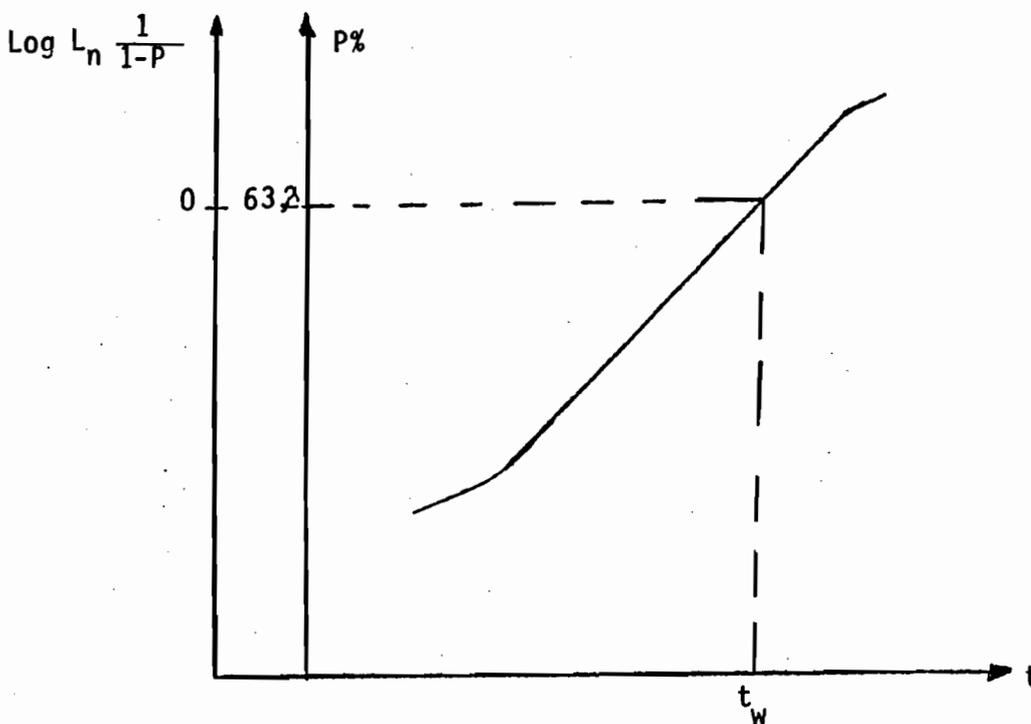


Figure I.13. Temps de retard caractéristique tiré du diagramme de WEIBULL

On tire conventionnellement de ce diagramme la valeur t qui correspond à une probabilité de claquage P de 63,2%, c'est à dire telle que

$$\text{Log Ln } \frac{1}{1 - P} = 0 \quad (\text{figure I.13.}) \quad (2)$$

I-2-2 Montage et appareillage

Les systèmes informatiques dont nous disposons ne permettant pas de collecter les données relatives aux claquages pendant des durées supérieures à 1 ms en gardant une résolution suffisante entre ruptures, comme il sera indiqué plus loin, il était nécessaire de procéder par créneaux successifs séparés par des intervalles suffisants pour effectuer le transfert des informations.

Le schéma synoptique du banc de mesure, donné sur la figure I-14, est composé des éléments suivants :

- Un micro-ordinateur "APPLE II+" permettant de conduire les opérations en assurant la commande des créneaux, le stockage des informations délivrées par l'analyseur, le traitement de ces données et la restitution des résultats sur table traçante et imprimante selon un programme établi que nous présentons plus loin.

- Un analyseur d'états logiques 7600 ENERTEC. Il stocke sous forme binaire les impulsions de tension détectées aux bornes de la résistance R_d (figure I-3). Notons qu'il est sensible à des impulsions dont l'amplitude est supérieure ou égale à un seuil donné, compris entre -6,35 et +6,35 volts.

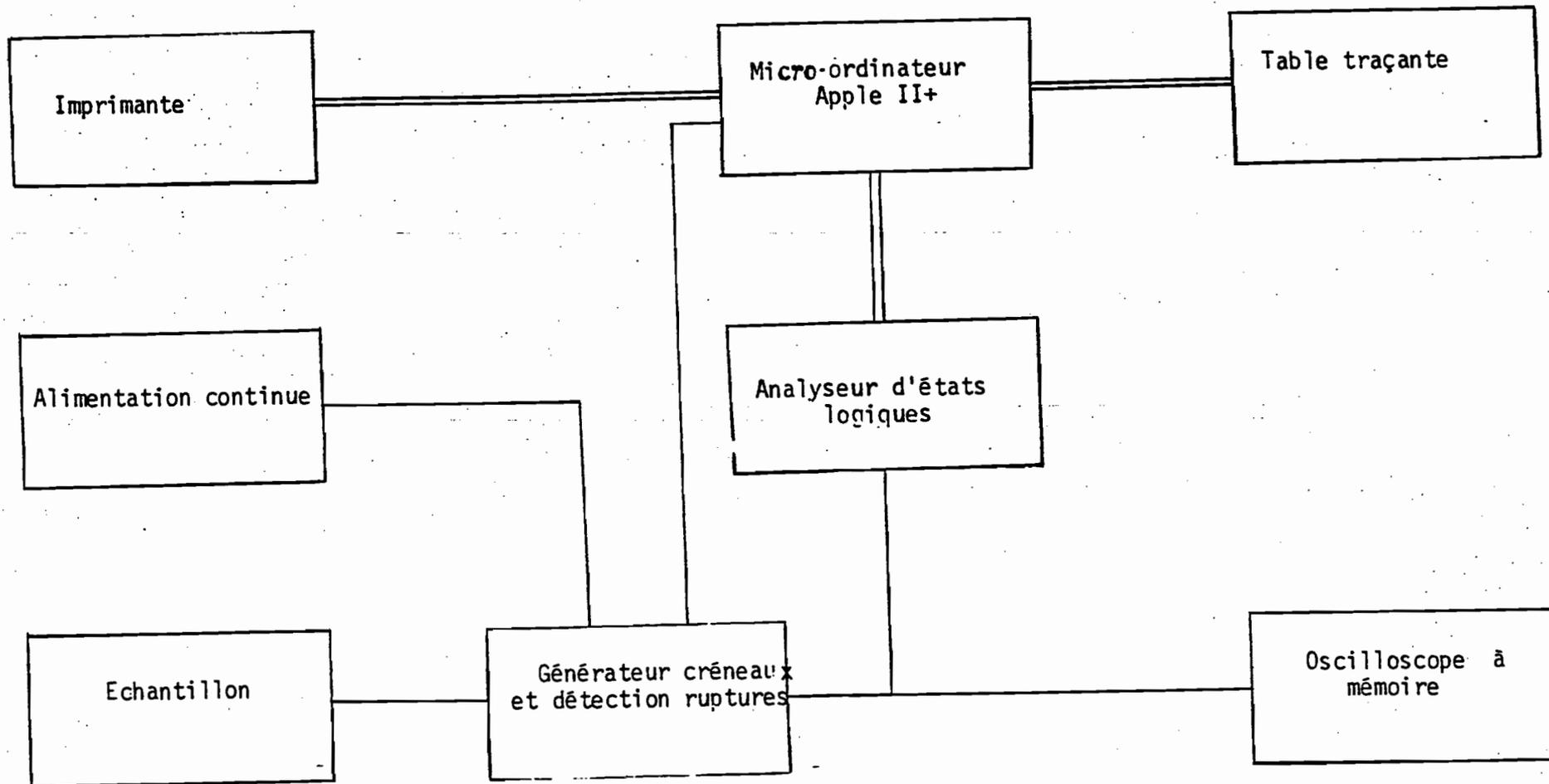


Figure I.14. Schéma bloc du dispositif expérimental lorsque la tension appliquée a la forme de crêteaux

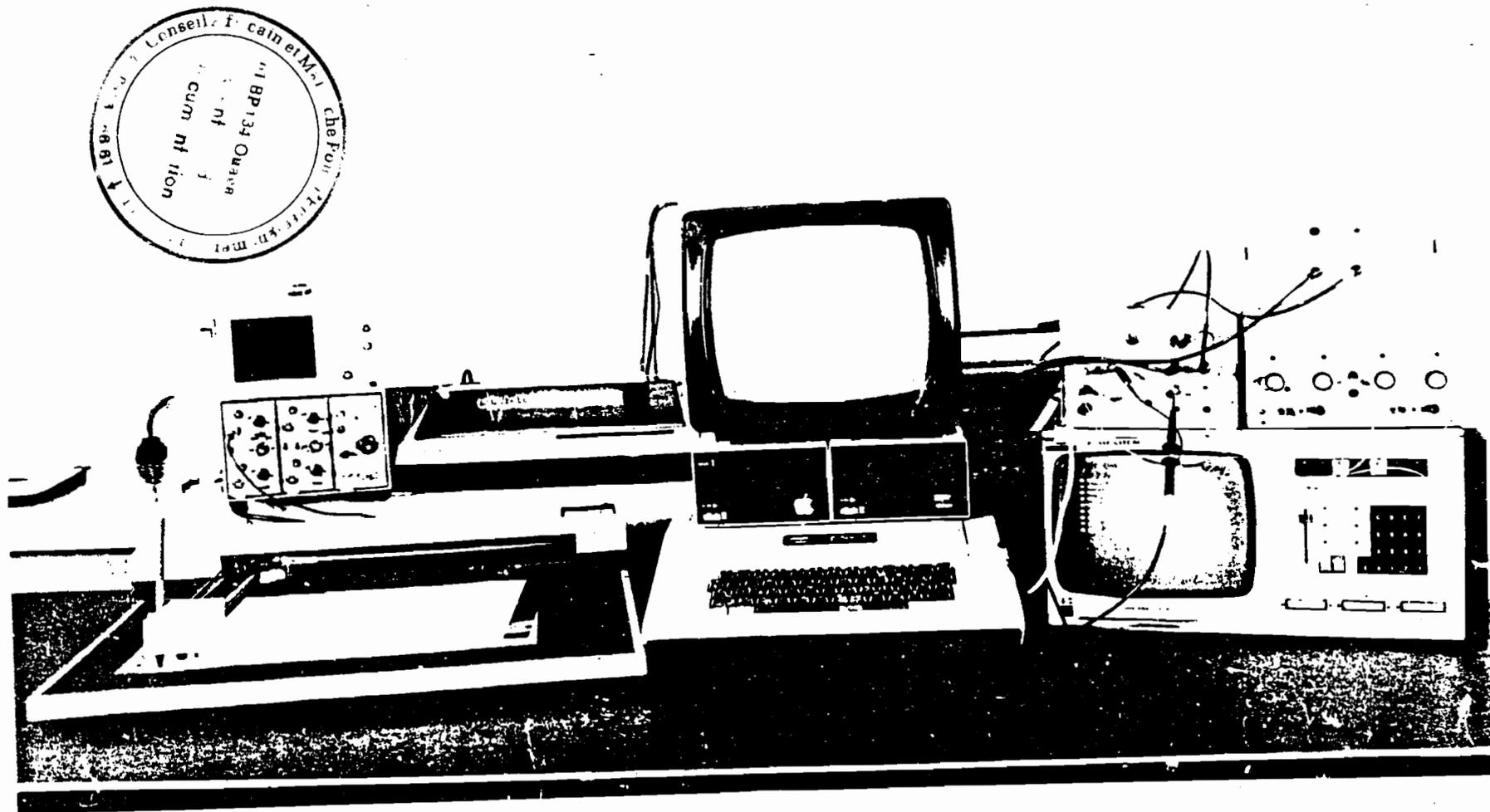


Figure 1.15. Vue d'ensemble du dispositif de mesure dans le cas d'application de créneaux de tension

Les signaux sont échantillonnés au rythme d'une horloge fonctionnant dans la gamme de 10 nanosecondes à 500 millisecondes. On peut mémoriser en format "4 voies" 1024 mots de 4 bits, ce qui limite la longueur du créneau à $1024 \times H$ millisecondes, H étant la période d'horloge.

Le début de mémorisation est déclenché par un signal de synchronisation qui n'est autre ici que l'impulsion délivrée par la mise sous tension de l'échantillon.

Sur le plan pratique, un choix convenable de la fréquence d'échantillonnage et du seuil de détection doit être fait. La figure I-16 montre les résultats enregistrés sous forme de changement de niveau par l'analyseur, pour deux fréquences différentes, le niveau haut (état 1) correspondant à la détection d'une impulsion. Nous pouvons remarquer sur cette figure que pour la fréquence la plus basse, l'analyseur n'enregistre que trois impulsions au lieu de quatre ; le choix d'une telle fréquence conduirait à des erreurs aussi bien sur le nombre d'impulsions que sur les temps qui les séparent. Dans le deuxième cas où la fréquence est plus élevée, toutes les impulsions sont prises en compte par l'analyseur. Pour qu'il en soit ainsi, la période de l'horloge doit être inférieure à l'intervalle de temps séparant deux impulsions consécutives. On aurait intérêt à prendre une fréquence d'horloge la plus élevée possible, mais, comme indiqué plus haut, on limiterait la durée du créneau. Pratiquement, la largeur du signal, au niveau du seuil, doit être du même ordre de grandeur que la demi-période de l'horloge pour obtenir une bonne précision sur la mesure des temps.

Comme les claquages peuvent apparaître toutes les microsecondes, nous avons choisi 500 nanosecondes de période d'horloge pour des créneaux

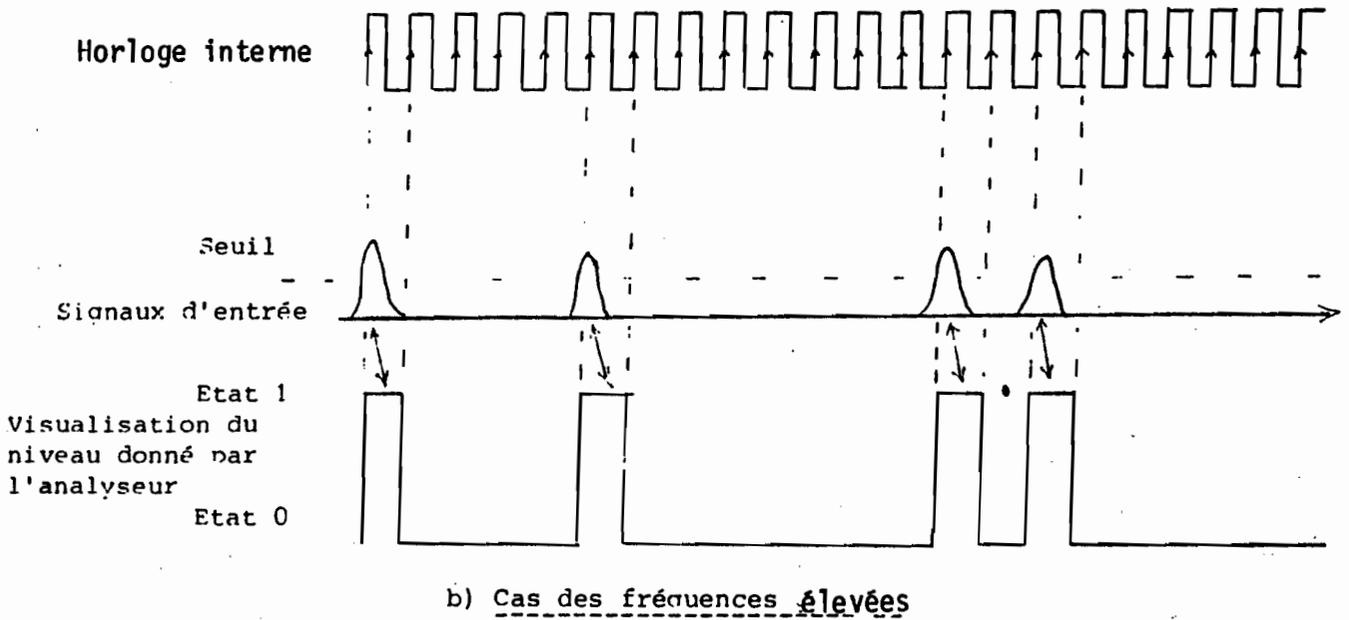
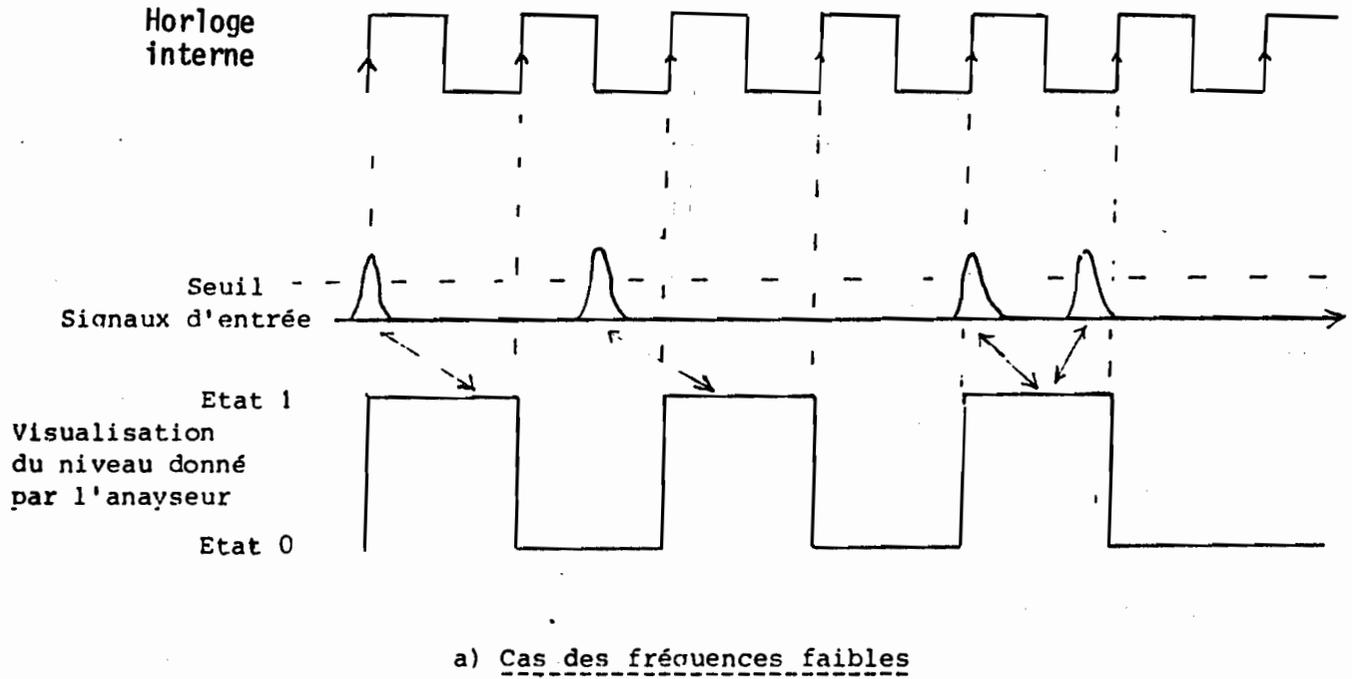


Figure I.16.

Détection des impulsions par l'analyseur suivant la fréquence d'échantillonnage de l'horloge interne

de durée 500 microsecondes et $1 \mu s$ pour $1000 \mu s$. Le seuil est choisi entre 0,5 et 3 volts selon la tension appliquée aux bornes de l'échantillon et suivant la résistance de détection choisie.

- Un générateur de créneaux (0, 300 volts) qui peut être commandé, soit manuellement par un bouton poussoir, soit directement par le micro-ordinateur (figure I-14).

Il est constitué essentiellement d'une alimentation continue mise à la masse périodiquement, au bout de la durée fixée pour le créneau, par un transistor fonctionnant en bloqué-saturé. La commande de ce dernier est déclenchée, à partir du micro-ordinateur, par un circuit monostable 74123 suivi d'un amplificateur ; l'interrupteur I étant en position Ext (externe). En position Int (interne), la commande se fait à partir du bouton poussoir BP qui est muni d'un système antirebond.

- Un oscilloscope à mémoire permettant la visualisation de la tension aux bornes de l'échantillon.

- Une table traçante et une imprimante qui traduisent les résultats sous forme graphique ou numérique. Ces résultats sont également mis en fichier sur disquettes.

I-2-3 Programme

C'est, en fait, un ensemble de trois programmes distincts mais successifs, cette conception ayant été rendue nécessaire pour minimiser le temps de séparation entre deux créneaux. Il fallait en effet, pour assurer la quasi permanence de la tension sur l'échantillon, réduire la durée séparant deux créneaux consécutifs : ce temps minimal est celui

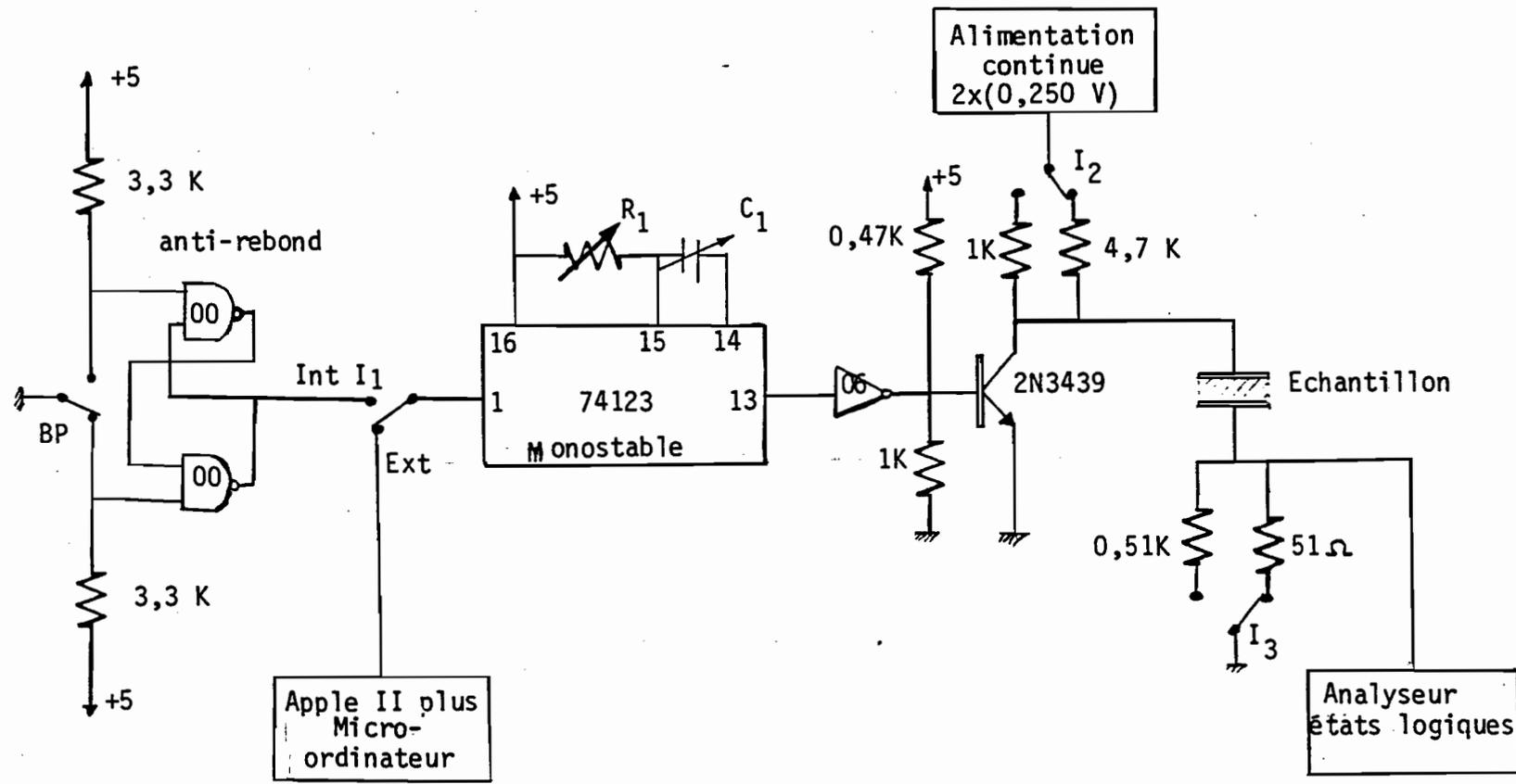


Figure I.17. Schéma électrique du dispositif de détection des ruptures et du générateur de créneaux

pendant lequel l'analyseur logique transmet au calculateur les informations recueillies et le calculateur effectue une demande de mesure. Il se posait ainsi pour nous un problème d'espace mémoire relativement limité en ce qui concerne l'analyseur.

Ces programmes ont été réalisés sur le micro-ordinateur APPLE II+ et sont en fichier sous les appellations Beethoven, Mozart et Vivaldi.

Le premier effectue les initialisations, le second la manipulation, en gardant les informations binaires délivrées par l'analyseur sur une disquette, le troisième traite ces mesures et restitue les résultats sur l'imprimante et la table traçante ; au besoin, un programme complémentaire effectue un traitement suivant la statistique de WEIBULL.

L'organigramme de l'ensemble fait l'objet de la figure I-18.

I-2-3-1 Programme I : "Beethoven"

Dans ce programme d'initialisation, on entre les données nécessaires telles que la tension appliquée à l'échantillon, la période d'horloge, le temps de séparation des créneaux, ... Ces informations sont enregistrées dans un fichier tampon (BEETHOVEN), sur disquette, en vue de leur utilisation dans les autres programmes.

I-2-3-2 Programme II : "Mozart"

Il prend la suite de "Beethoven" pour réaliser l'expérience proprement dite.

Pour cela, il prend les données nécessaires dans le fichier

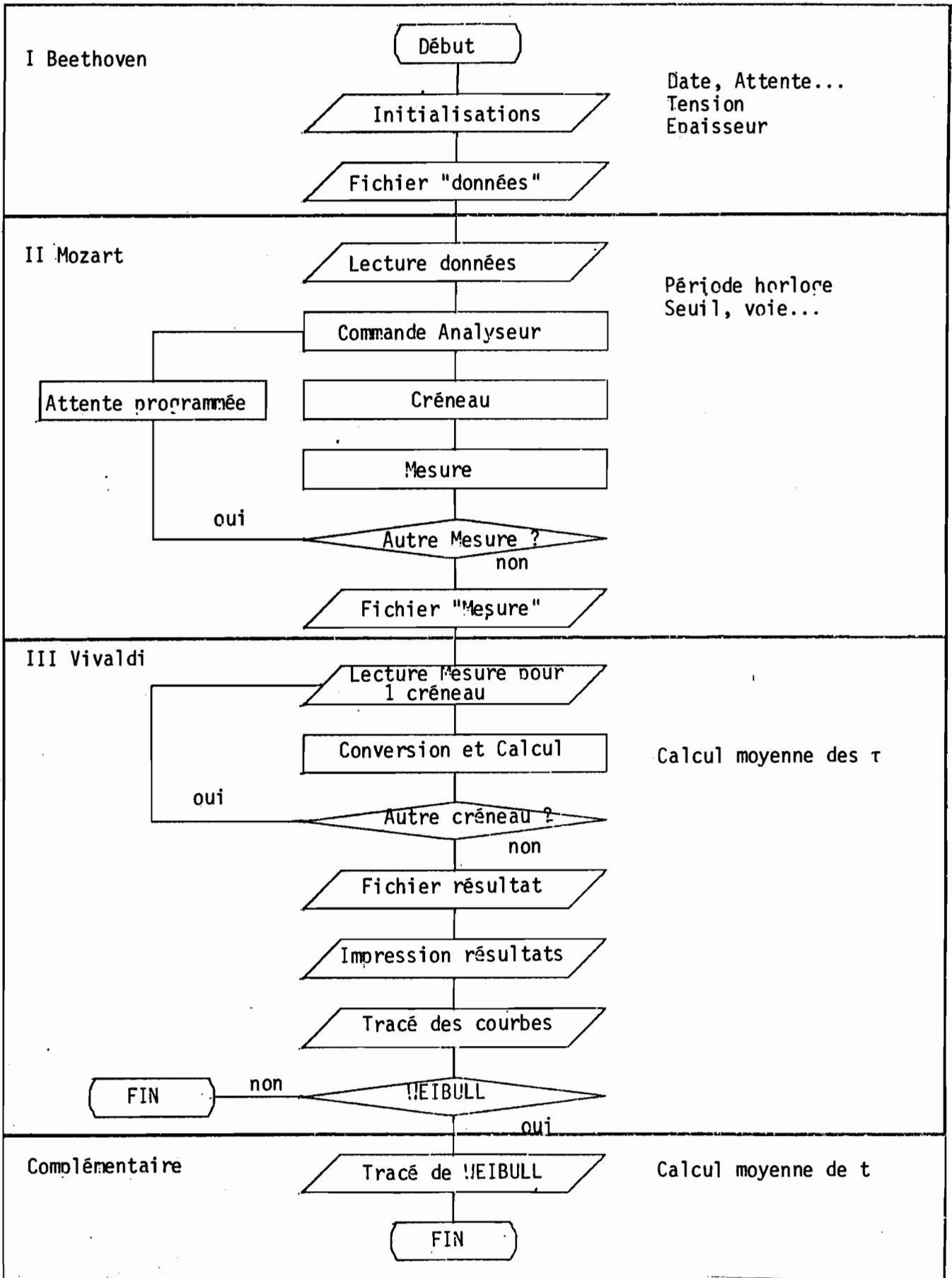


Figure I.18. Organigramme des 3 programmes consécutifs et du programme complémentaire

précédent (BEETHOVEN) : la période d'horloge, le nombre de créneaux et la durée entre deux créneaux.

Ceci étant fait, le micro-ordinateur réserve la place mémoire nécessaire, puis il réalise l'expérience en bloquant l'analyseur sur programmation et mesure (Lignes 150-210). La commande du créneau est obtenue à partir d'une lecture mémoire (PEEK (- 16320)) qui produit une impulsion appliquée au circuit monostable déclenchant le générateur.

L'attente entre deux mesures est chronométrée à l'aide d'une carte horloge située dans le micro-ordinateur (Lignes 240-275).

Le nombre de créneaux désiré atteint, les mesures effectuées sont, à leur tour, stockées dans un second fichier tampon (MOZART), pour faire appel au programme de traitement.

I-2-3-3 Programme III : "Vivaldi"

Ce dernier se charge de traduire les mesures délivrées par l'analyseur en temps de retard au claquage, de dénombrer les ruptures, d'effectuer tous les calculs nécessaires et de tracer les courbes ainsi que de sortir les mêmes résultats sur listes.

La traduction des informations venant de l'analyseur est nécessaire car elles se présentent sous forme binaire, les 0 correspondant à la non existence de rupture et les 1 à leur présence. Le nombre de 0 multiplié à la période d'horloge donne le temps de retard au claquage et celui des 1 la durée du claquage.

Comme on ne saurait réaliser ce programme en mettant toutes les

mesures en mémoire de travail, on les traite partie par partie, chacune d'elle correspondant à un créneau de tension. Les résultats d'expérience sont pris dans le fichier tampon (MOZART), les autres données nécessaires (fréquence d'horloge,...) dans le fichier tampon (BEETHOVEN).

Les listings de ces programmes sont donnés en annexe 2.



CHAPITRE II
"ECHANTILLONS"



II-ECHANTILLONS

Nous avons réalisé nos mesures sur deux types d'échantillons : des structures métal-oxyde-semiconducteur (MOS) et métal-oxyde-métal (MOM).

Dans le premier cas, nous avons disposé, d'une part, de silice obtenue par oxydation thermique, et, d'autre part, de silice déposée par voie chimique en phase vapeur (CVD) assistée par plasma. Ces structures MOS (SiO_2 sur Si) ont été réalisées au LAAS à TOULOUSE. Les substrats utilisés étaient du silicium de type N, d'orientation 100, de résistivité moyenne $5 \Omega\text{cm}$, dopé à $10^{15} / \text{cm}^3$.

Dans le second cas, nous avons eu à notre disposition des échantillons d'alumine réalisés au Centre National d'Etudes des Télécommunications (CNET) à BAGNEUX.

II-1 ELECTRODES

Les électrodes qui définissent la géométrie des échantillons, étaient obtenues par évaporation à travers un masque.

II-1-1 Echantillons de silice

Nous avons utilisé deux métaux : aluminium et chrome.

Afin d'éviter les effets de bords, l'électrode active est entourée d'un anneau de garde sous lequel l'épaisseur d'oxyde est plus grande que dans la partie utile (figure II-1).

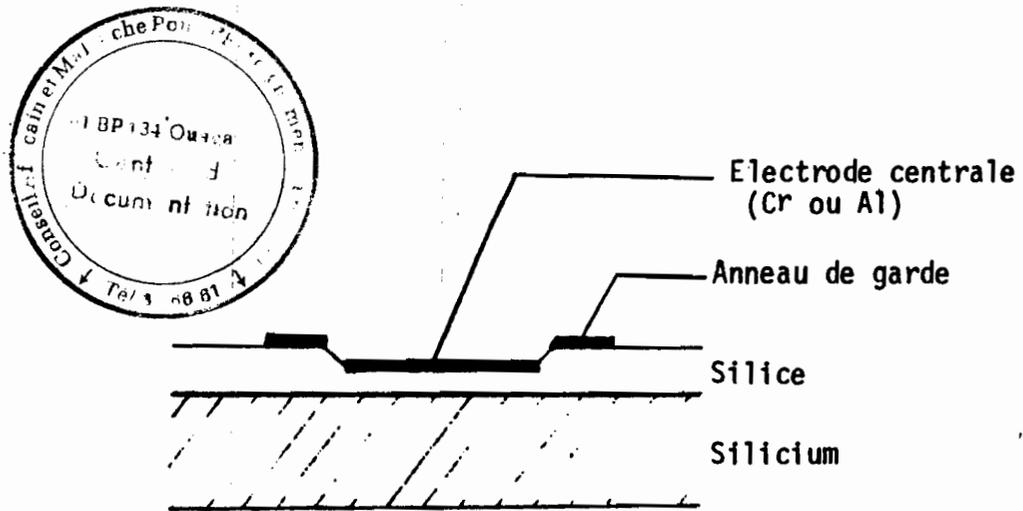


Figure II-1 : Schéma en coupe d'un échantillon de silice sur substrat de silicium

Deux types de géométrie d'électrodes ont été employés :

- Une structure circulaire présentant une surface active de 1 mm^2 (figure II-2),
- Une structure en forme de raquette de même surface utile (figure II-3).

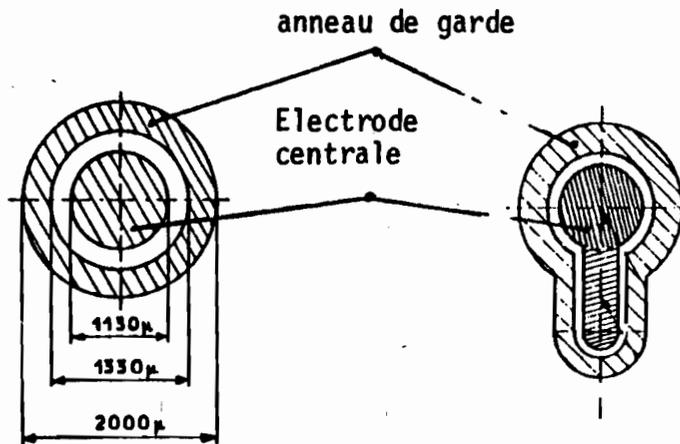


Figure II.2. Structure circulaire

Figure II.3. Structure en "raquette"

II-1-2 Echantillons d'alumine

Ces échantillons se présentent sous une forme matricielle (figure II-4a). Un substrat de verre supporte l'ensemble ITO ⁽¹⁾ -Alumine-Aluminium (figure II-4b). L'échantillon à étudier, de 1 mm² de surface, correspond à l'alumine située à l'intersection d'une ligne et d'une colonne choisies comme électrodes (figure II-4c).

II-2 PREPARATION DES ECHANTILLONS

II-2-1 Silice thermique

Le processus technologique mis en oeuvre consistait en l'oxydation du silicium à l'oxygène sec à très haute température, suivie d'un recuit.

II-2-1-1 Nettoyage initial des substrats de silicium

Les substrats de silicium utilisés ont subi le nettoyage chimique classique dont nous rappelons que les phases successives sont les suivantes :

-Attaque de 30 secondes dans un bain HF dilué appelé "SiO₂ lent".

-Nettoyage de 10 minutes à l'acide nitrique bouillant destiné à l'élimination des impuretés métalliques.

-Nouvelle attaque "SiO₂ lent".

(1) Voir définition au paragraphe II-2-3

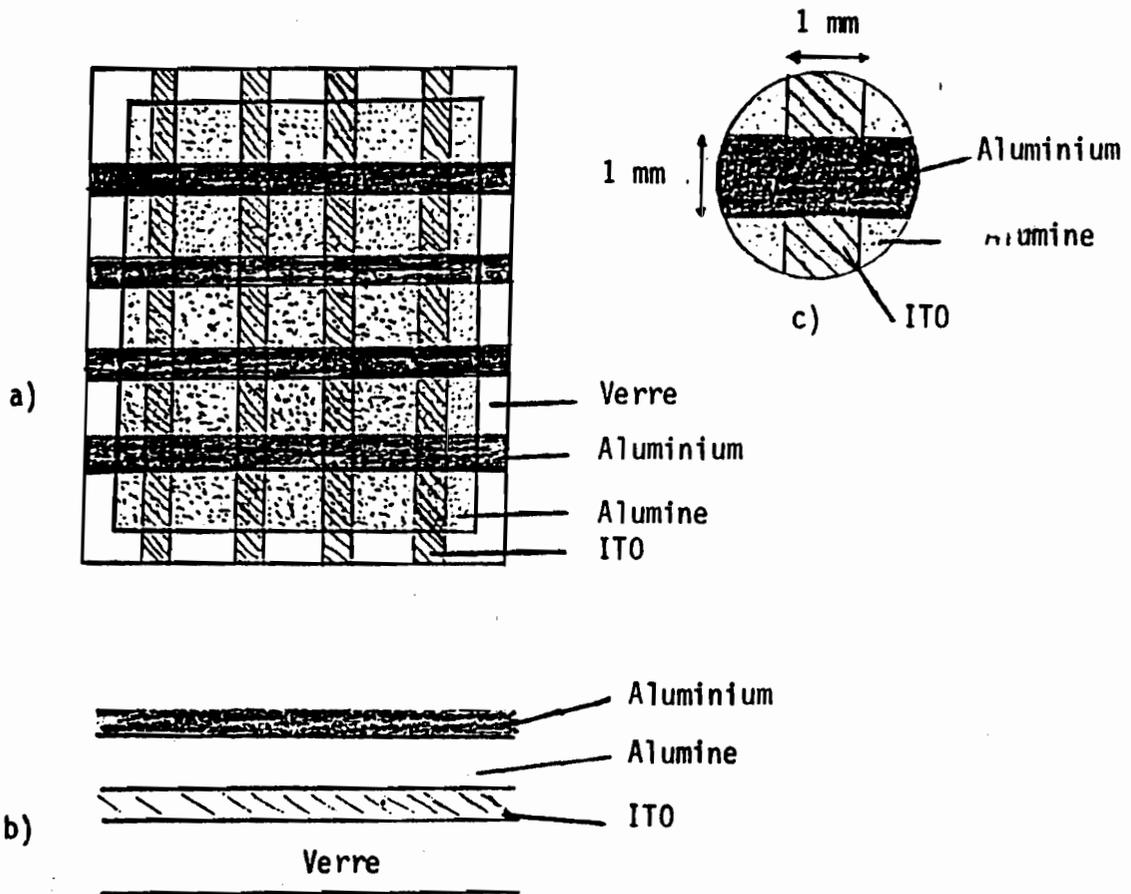


Figure II.4. Structure des échantillons d'alumine

-Passage dans une solution bouillante de $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ pendant 5 minutes.

-Trempe dans un mélange $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ bouillant pendant 5 minutes.

Après chacune de ces opérations, on procède à un rinçage à l'eau désionisée et à un séchage à l'azote.

II-2-1-2 Oxydation

Une première couche d'oxyde, d'épaisseur supérieure à celle prévue dans la partie active de l'échantillon est réalisée à 1150°C dans une ambiance d'oxygène que l'on a d'abord fait barboter dans de l'eau à 80°C . On établit ensuite un courant d'oxygène sec pendant 10 minutes, puis un courant d'argon sec pendant le même temps.

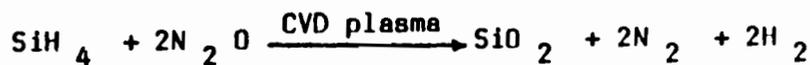
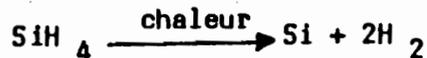
Une photogravure permet l'enlèvement de cette première couche dans la partie utile. Après un nettoyage de l'échantillon, on procède à une seconde oxydation au droit de cette partie, sur l'épaisseur que l'on s'est fixée et qui constitue le matériau réellement étudié. Cette opération s'effectue sous oxygène sec et elle est suivie de l'application d'un flux d'argon sec pendant 10 minutes.

II-2-1-3 Recuit

Un recuit de l'échantillon à 500°C pendant 20 minutes sous azote et 5% d'hydrogène termine la séquence. Cette opération a pour but de minimiser les états de surface./39/

II-2-2 Silice obtenue par dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma

Rappelons que le dépôt de silice par cette méthode est obtenu par décomposition pyrolytique du silane en présence d'oxygène et d'azote.



Le procédé utilisé permet, à basse température, d'accélérer la réaction chimique par rapport au CVD classique.

On sait que cette technique de dépôt est caractérisée par :

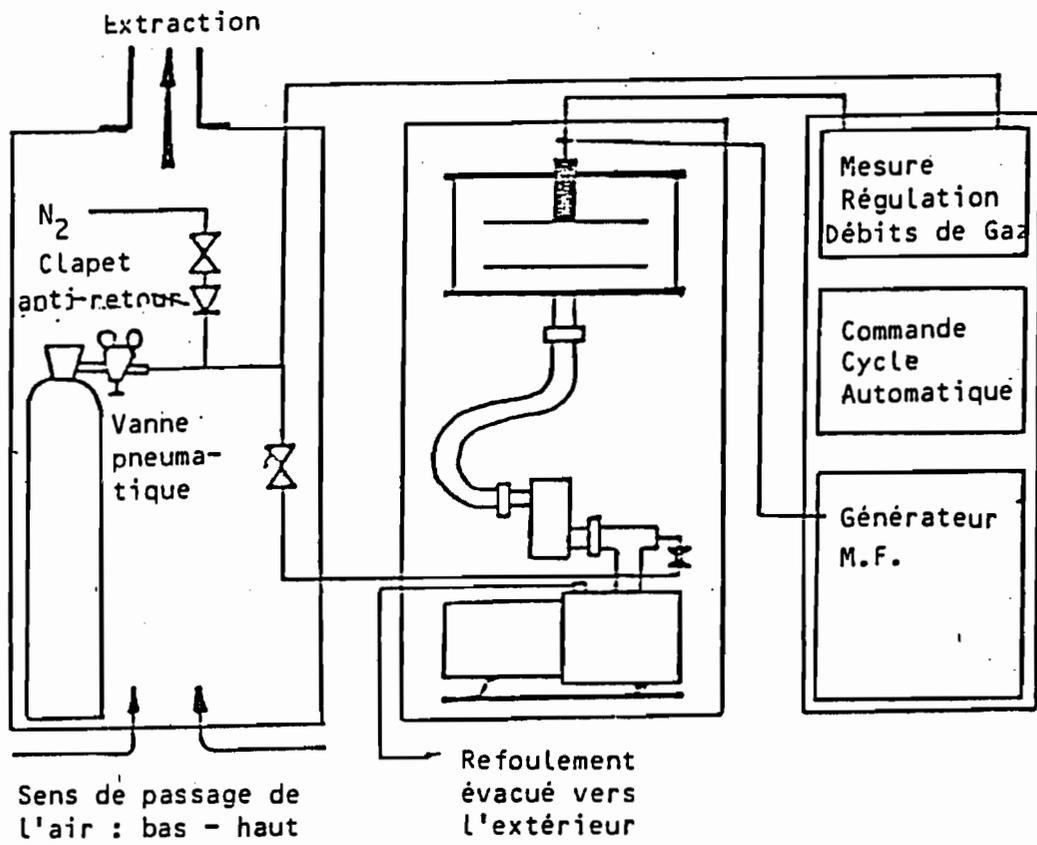
-Une activation des réactions grâce à un plasma froid produit par décharge lumineuse à moyenne fréquence dans un mélange de gaz sous basse pression ;

-Une température de réaction relativement basse : 0 à 400°C.

II-2-2-1 Réacteur

Il est schématisé sur la figure II-5 où est indiquée également la nature des gaz utilisés pour la réaction et le nettoyage. L'essentiel est une chambre cylindrique en pyrex reliée à une pompe à palettes permettant d'obtenir un vide primaire qui peut descendre jusqu'à 10^{-3} mbar.

La décharge s'établit entre deux électrodes horizontales, de distance réglable, alimentées par un générateur 50 KHz, 5 kVA. L'électrode inférieure constitue le plateau porte substrat. Celui-ci peut



| | | |
|---------|------------------------------------|--------------------|
| G A Z : | SiH ₄ 5% N ₂ | } Gaz réactifs |
| | NH ₃ (Q.E) | |
| | N ₂ O (Q.E) | } Gaz Oxydant |
| | O ₂ (Q.E) | |
| | Hcl (Q.E) | } Gaz de Nettoyage |
| | CF ₄ (Q.E) | |

Figure II.5. Appareillage pour le dépôt de silice par C.V.D.

être porté à la température désirée par une résistance chauffante./2/

II-2-2-2 Méthode de dépôt

Les échantillons subissent d'abord le nettoyage décrit précédemment, puis sont disposés sur le plateau inférieur de l'enceinte CVD portée à 200°C, dans laquelle on fait un vide de 10^{-3} mbar. On introduit de l'azote pendant 3 minutes, ce qui établit la pression à 4.10^{-1} mbar. Puis la réaction de dépôt proprement dit, assistée par plasma, se déroule entre SiH_4 et N_2O en présence ou non d'azote.

L'opération se termine par un recuit pendant 30 minutes sous azote.

II-2-3 Alumine

Sur un substrat de verre, on dépose par pulvérisation cathodique un conducteur transparent, du trioxyde d'indium (In_2O_3) dopé à l'étain (9% en moles), ou "ITO", de 1500 Å d'épaisseur. L'ITO constitue l'électrode inférieure.

Les couches minces d'alumine (Al_2O_3) et de l'électrode supérieure en aluminium sont déposées par évaporation sous vide (10^{-6} torr) à l'aide d'un canon à électrons. La température du substrat pendant le dépôt du diélectrique est de 100°C.

CHAPITRE III
"RESULTATS EXPERIMENTAUX
DEFINITION D'UN CHAMP DE RUPTURE SPECIFIQUE"



III-RESULTATS EXPERIMENTAUX

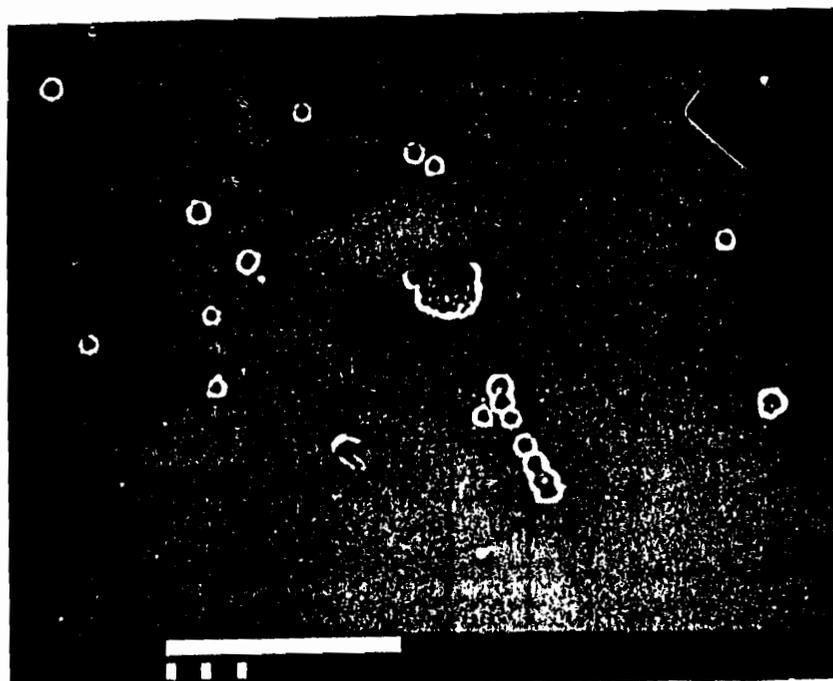
DEFINITION D'UN CHAMP DE RUPTURE SPECIFIQUE

Dans un premier temps, nous allons décrire les principales caractéristiques physiques et électriques des ruptures relevées sur les échantillons que nous avons expérimentés. Nous nous attacherons ensuite à l'étude particulière des durées séparant deux claquages consécutifs et à celle des temps de retard globaux ou "cumulés", ce qui nous conduira à définir un "champ de rupture spécifique". Nous appliquerons enfin cette notion à la caractérisation de la tenue de couches minces de silice et d'alumine.

III-1 DEGRADATIONS CAUSEES PAR LES RUPTURES AUTOCICATRISANTES SUR LA SURFACE DE L'ECHANTILLON

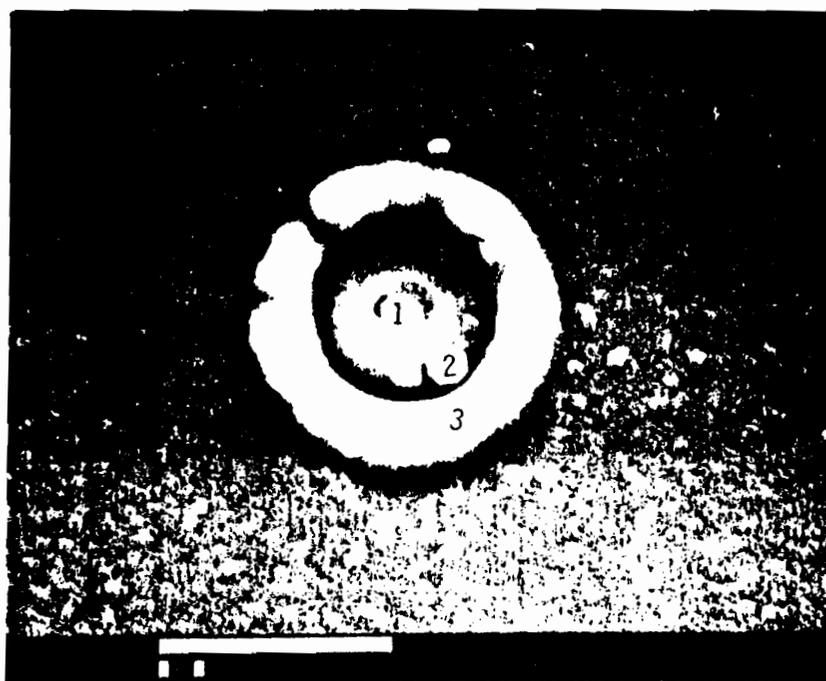
L'observation au microscope de la surface des échantillons après l'apparition d'un certain nombre de claquages permet de constater la présence de plusieurs petits trous ou cratères de 10 à 30 micromètres de diamètre (cliché III-1), chaque site correspondant à un claquage. En examinant à plus fort grossissement l'une de ces dégradations, on remarque trois zones distinctes (cliché III-2), ce qui est par ailleurs confirmé par une analyse EDAX présentée sur les clichés III-3,4,5,6.

Rappelons que le principe de cette "Analyse à Dispersion d'Energie X" est basé sur le fait qu'une surface bombardée par des électrons très énergétiques émet des électrons secondaires utilisés en microscopie électronique, des électrons retrodiffusés, des électrons Auger et des rayons X. Ces derniers permettent, grâce à un détecteur en énergie constitué du silicium dopé au lithium, de définir les éléments rencontrés



Cliché III.1. Dégradations à la surface de l'échantillon

3,1 cm 100 μ m



Cliché III.2. Vue en détail du cratère

3,1 cm 10 μ m

au point d'impact ainsi que les éléments sous-jacents peu profonds.

Dans notre cas particulier, le résultat de l'expérience se traduit par deux pics relatifs respectivement au silicium et à l'aluminium, le second disparaissant lorsque ce métal a été enlevé.

-.La région 1, au centre du cratère, correspond à la dégradation de l'électrode inférieure et de l'oxyde qui s'est probablement évaporé sous l'effet de l'élévation de la température lors du claquage et correspond au diagramme III-3 de l'analyse EDAX.

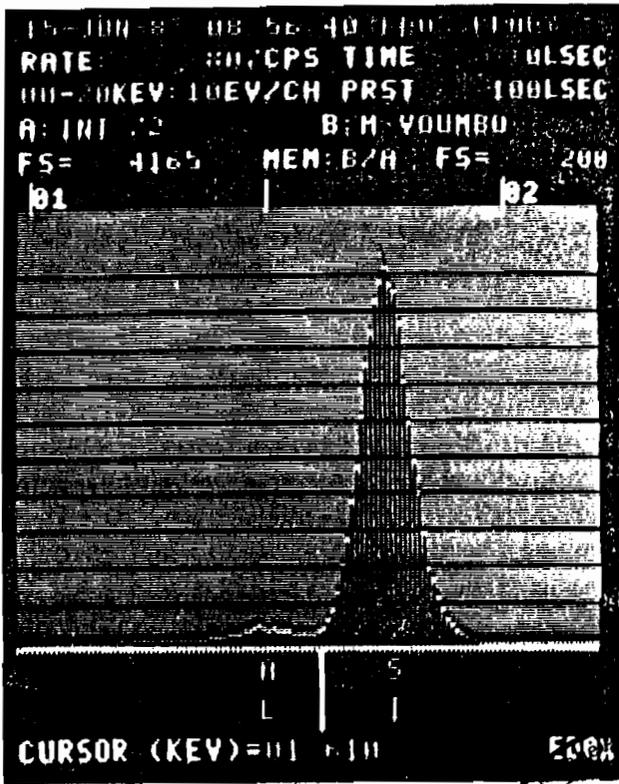
-.La zone 2 est la partie de l'oxyde dégagée par le départ de l'électrode supérieure qui s'est soit décollée et ouverte en pétales retournés vers l'extérieur par rapport au cratère, soit fondue.(Analyse EDAX III-4).

-.La région 3 est celle où se trouve encore l'électrode supérieure dégradée. (Analyse EDAX III-5).

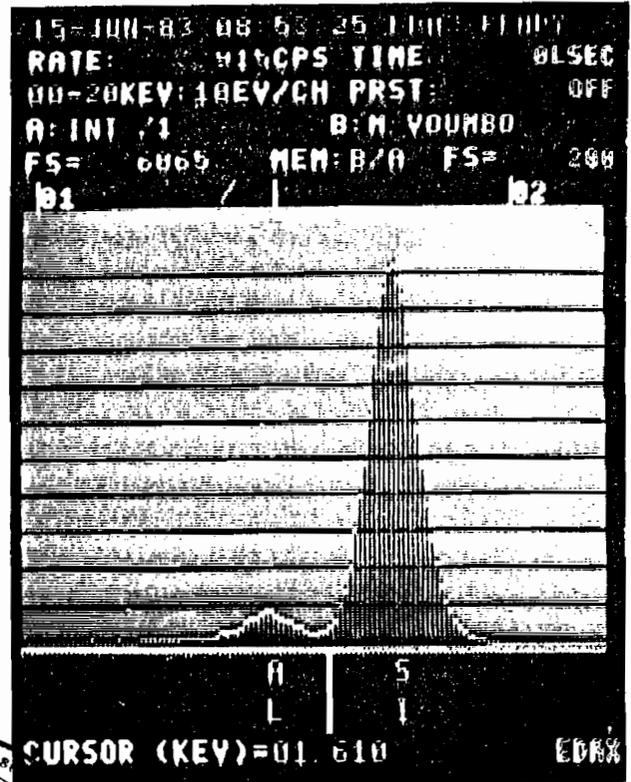
Enfin, on peut ajouter à ces trois zones, une quatrième région apparente autour du trou comme nous le montre le cliché III-7. L'analyse EDAX III-6 a été réalisée sur cette quatrième zone. Enfin, en dehors de cette dernière, on retrouve l'aluminium à 100%.

De telles formes de dégradations laissent supposer l'existence d'une température relativement élevée dans le canal qui se forme au cours du claquage. En effet, la fusion de l'électrode supérieure et surtout la disparition de la silice nécessitent une température très élevée, de l'ordre de 2000°C. On peut penser également qu'il se produit une surpression importante dans le canal, due aux produits de décomposition

ANALYSE EDAX



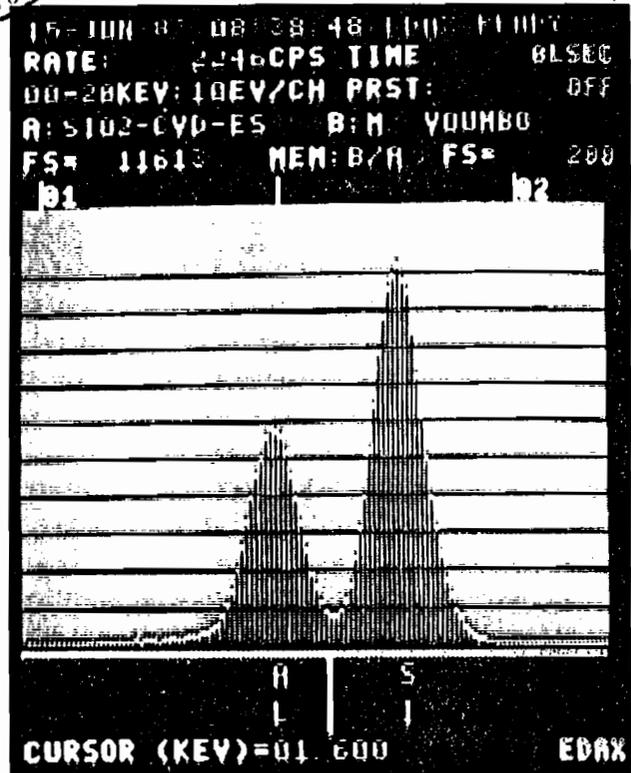
Cliché III.3.



Cliché III.4.



Cliché III.5.



Cliché III.6.

du matériau passant à l'état de vapeur./29/

Quoiqu'il en soit, le nombre important de ces dégradations provoque une diminution de la surface de l'électrode. Un calcul simple montre que cette évolution est de peu d'amplitude et des mesures de capacité d'échantillons avant et après expérience le confirment. La variation devient relativement plus grande si le champ est élevé, mais, même dans ce cas, la surface ne diminue pas de plus de 5% pour 1000 claquages. Comme nous ne dépassons guère 1000 ruptures pour un échantillon donné, nous pouvons considérer que la surface d'électrode reste pratiquement constante au cours d'une expérience.

Notons enfin une observation qui peut avoir son importance dans l'interprétation des ruptures induites par influence : les claquages se groupent souvent dans certaines zones de l'échantillon, notamment pour des champs très élevés (cliché III-8).

III-2 CARACTERISATION ELECTRIQUE DES CLAQUAGES

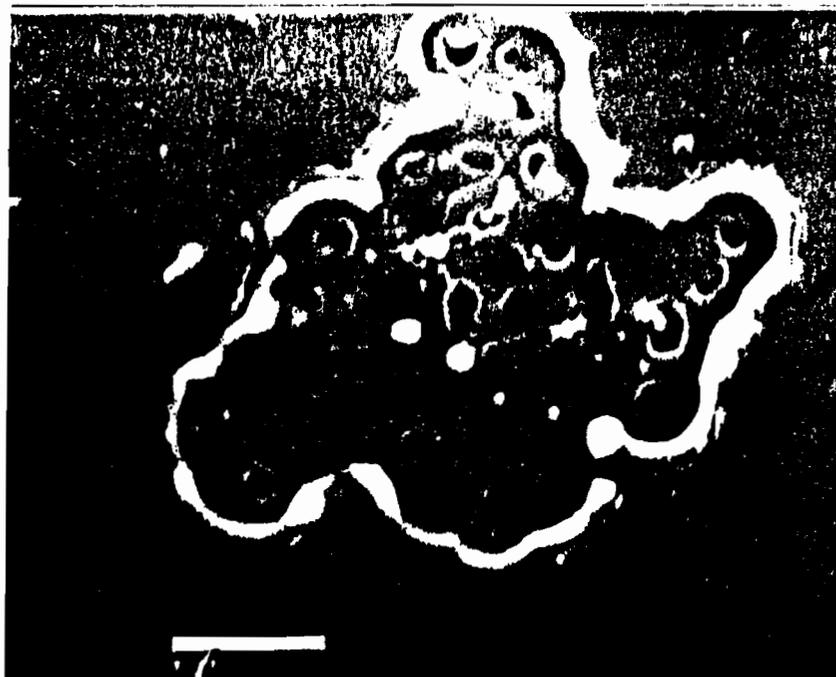
III-2-1 Grandeurs et représentations retenues

En ce qui concerne la rupture sous la contrainte de rampes de tension, le dispositif décrit au I-1-2 nous a permis de repérer l'ordre de grandeur du champ moyen de rupture pour les différents types d'échantillons utilisés : 4 MV/cm, par exemple, pour la silice thermique avec une vitesse de montée unique de 5 V/s. On sait que la valeur obtenue dépend du choix de cette vitesse mais nous n'avons pas abordé cet aspect du problème.

Les résultats que nous présentons sont relatifs à l'application de



Cliché III.7. : Auréole autour de la dégradation
1 cm 10 μ m



Cliché III.8. - 2,05 cm 10 μ m.

créneaux de durée ΔT comprise entre 500 et 2000 microsecondes, séparés par des intervalles de 4 secondes. Ce temps est nécessaire pour collecter les mesures relatives à chacun d'eux et préparer l'appareillage pour le suivant. Les amplitudes de ces créneaux sont centrées autour de la valeur du champ de rupture donné par l'application des rampes.

Pour chaque valeur du champ, nous avons relevé les nombres d'impulsions observées aux bornes de la résistance de détection, c'est à dire le nombre de claquages autocicatrisants, $n_1, n_2, \dots, n_j, \dots$, correspondant respectivement aux créneaux $C_1, C_2, \dots, C_j, \dots$, et les durées τ_{ji} séparant deux impulsions consécutives. Il convient de noter que, pour chacun des créneaux, l'instant de la première impulsion est réperé par rapport au front de montée initial de la tension appliquée.

La figure III-9 permet de préciser l'ensemble de ces notations et le cliché III-10 donne un exemple d'oscillogramme relevé directement aux bornes de l'échantillon pendant toute la durée d'un créneau.

Nous avons retenu, pour caractériser ces phénomènes, les grandeurs spécifiques et, après traitement, les représentations suivantes :

- le nombre de ruptures par créneau,
- la durée moyenne entre ruptures successives, cumulée sur les créneaux de 1 à j, soit :

$$(\tau_m)_j = \frac{\sum_{j=1}^j \sum_{i=1}^{n_j} \tau_{ji}}{\sum_{j=1}^j n_j} \quad (3)$$

- le rang du claquage en fonction du temps de retard cumulé, c'est à

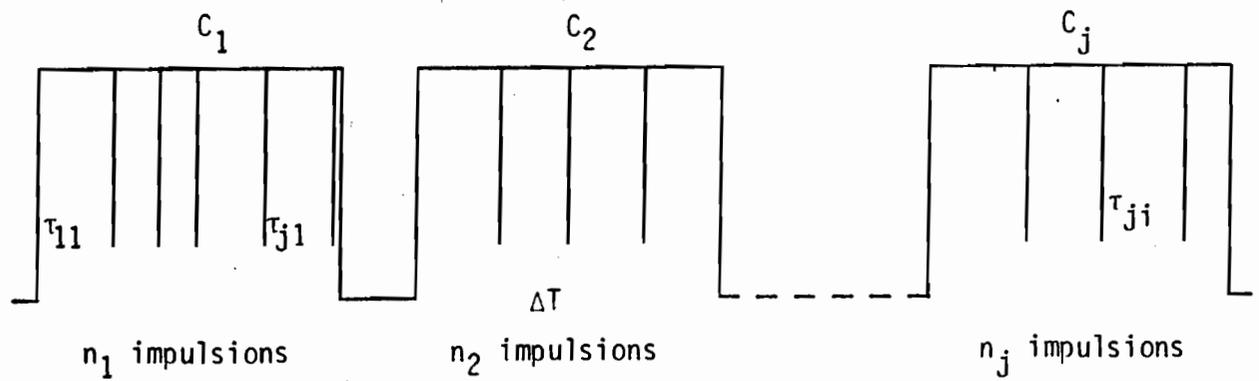
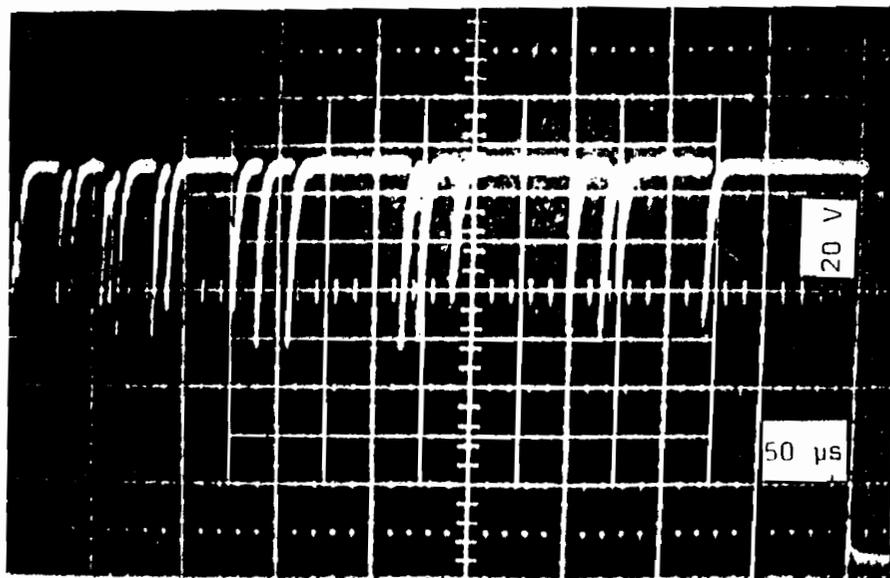


Figure III.9. Créneaux de tension et impulsions correspondant aux claquages successifs.
 $500\mu\text{s} < \Delta T < 2000\mu\text{s}$



Cliché III.10. Oscillogramme des impulsions liées au claquage, relevé aux bornes de l'échantillon

dire du temps total pendant lequel l'isolant a été soumis à l'action du champ, depuis le premier front de montée de la tension ; on doit donc décompter la durée de tous les créneaux précédant celui où l'on considère un claquage donné, de sorte que ce n'est plus la relation (1) qui fixe cette durée, mais la suivante :

$$t_{ji} = (j-1) \Delta T + \sum_{i=1}^{i=j} \tau_{ji} \quad (4)$$

- l'histogramme des durées entre deux claquages consécutifs τ_{ji}
- l'évolution de $(\tau_m)_j$ en fonction de l'amplitude du champ,
- le tracé correspondant à la statistique de WEIBULL des t_{ji}

III-2-2 Variation du nombre de ruptures par créneau en fonction du rang et de l'amplitude de ce créneau

Les figures III-11, 12 et 13 représentent, pour 3 valeurs du champ électrique appliqué, les variations du nombre n_j de claquages par créneau en fonction du rang de ce créneau. Ces caractéristiques correspondent aux échantillons suivants :

- figure III-11 : silice thermique de 2800 Å d'épaisseur avec électrode de chrome pour des champs de 4,15, 4,44 et 4,62 MV/cm,

- figure III-12 : silice thermique de 1000 Å d'épaisseur avec électrode d'aluminium pour des champs de 2,5 et 2,8 MV/cm.

- figure III-13 : silice CVD de 2000 Å d'épaisseur avec électrode d'aluminium pour des champs de 3,5, 3,9, 4,35, et 4,5 MV/cm.

Si l'on met à part le résultat, prévisible, de l'augmentation

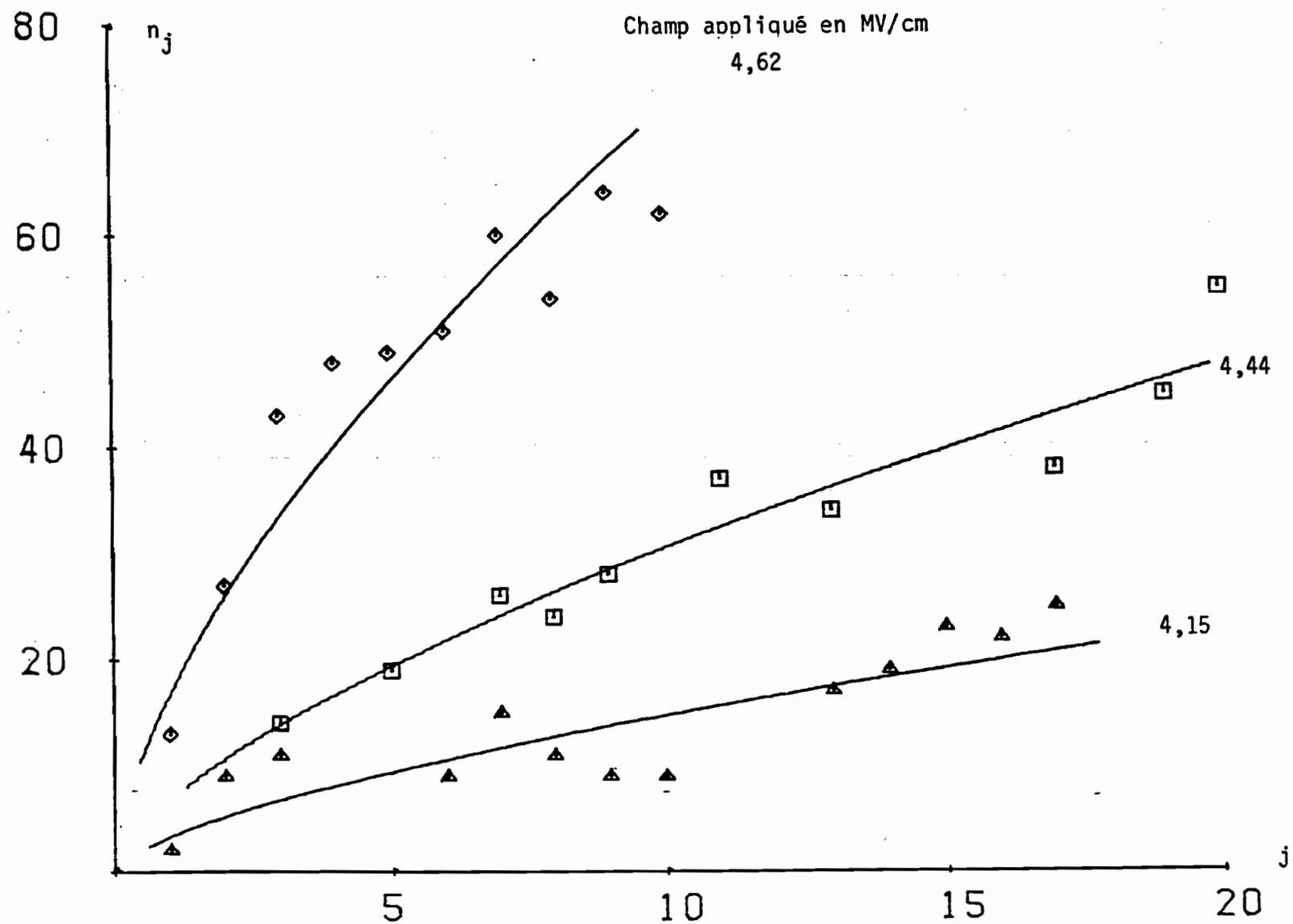


Figure III.11. Nombre de claquages par crêneau en fonction du rang de ce crêneau
Echantillon Cr-SiO₂ (therm.) - Si - Epaisseur 2800 Å

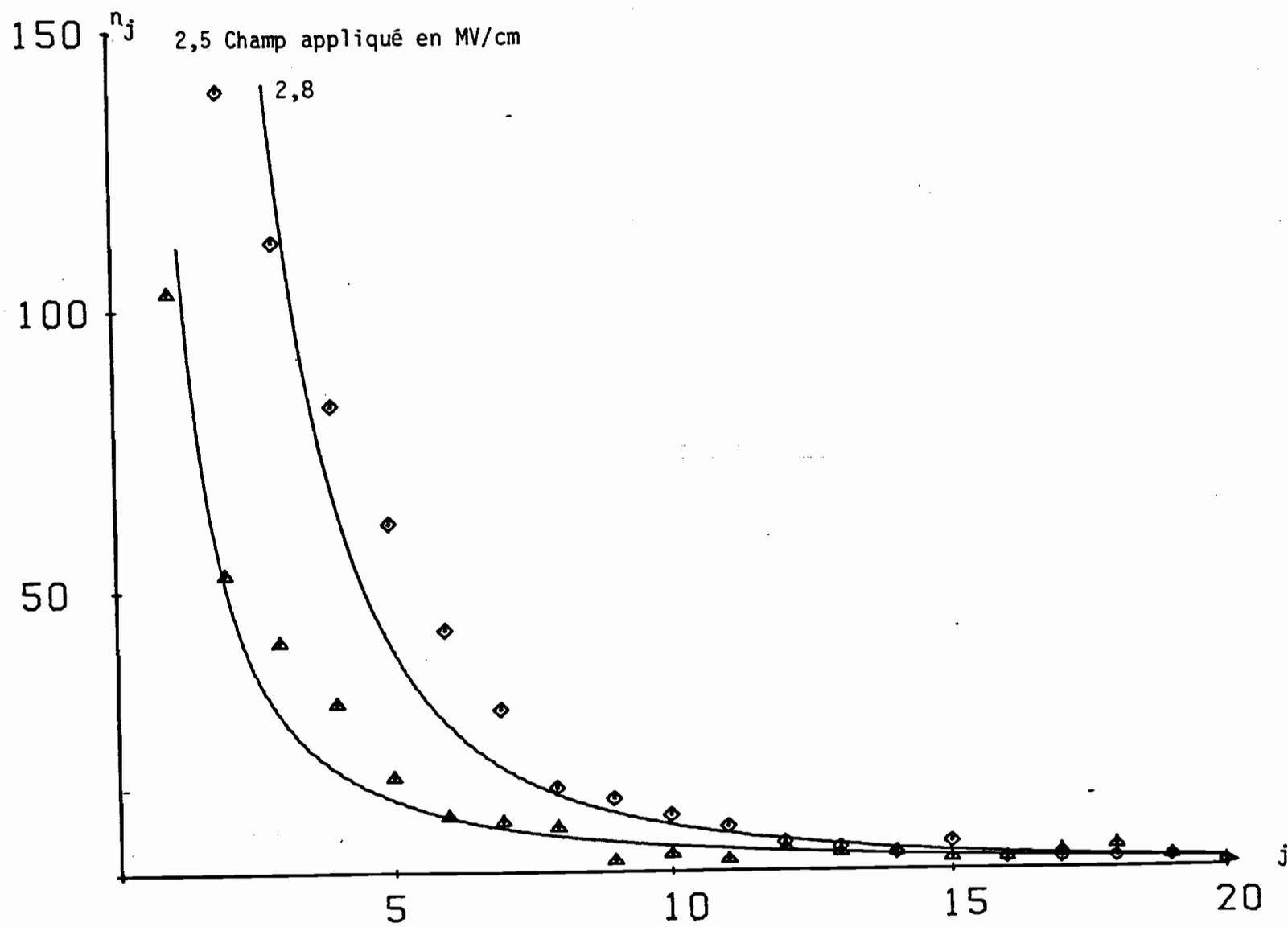


Figure III.12. Nombre de claquages par crêneau en fonction du rang de ce crêneau. Echantillon Al - SiO₂(therm) - Si - Epaisseur 1000 Å

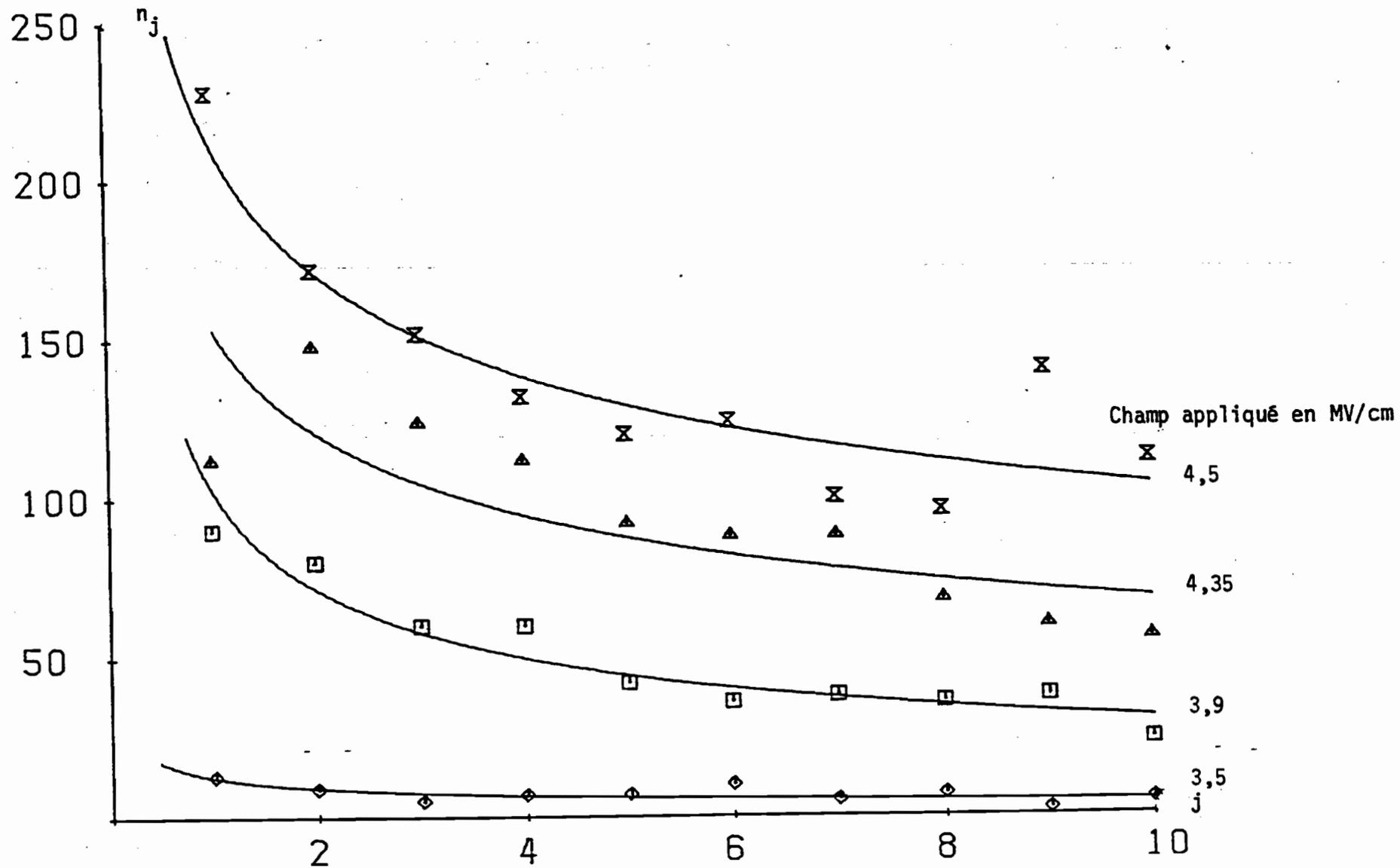


Figure III.13. Nombre de claquages par crêneau en fonction du rang de ce crêneau. Echantillon Al - SiO₂(CVD) Si - Epaisseur 2000 Å

systematique du nombre de claquages avec le champ appliqué, ces expériences font apparaitre le comportement radicalement différent de nos deux types d'échantillons de silice (thermique et CVD) selon la nature de l'électrode métallique :

- lorsque cette électrode est en chrome, le nombre de claquages par créneau augmente, et si l'on poursuit plus longtemps l'application de créneaux, on arrive à une rupture non cicatrisante ;

- lorsque cette électrode est en aluminium, ce nombre diminue rapidement dans le temps pour se stabiliser progressivement et, pour les champs les plus faibles, s'annuler pratiquement.

III-2-3 Variations de la durée moyenne cumulée entre ruptures en fonction du rang du créneau

A partir des expériences précédentes, on a tracé (figures III-14, 15 et 16) les variations dans le temps de la durée moyenne cumulée $(\tau_m)_j$ entre ruptures successives, en faisant porter cette moyenne sur les j premiers créneaux, j variant de 1 à 20 ; le calcul de $(\tau_m)_j$ s'effectue comme l'indique sa définition (3). Ce type de caractéristique est évidemment corrélé au précédent.

On observe, bien entendu, que, pour j donné, $(\tau_m)_j$ diminue lorsque le champ électrique croît.

On retrouve ensuite la différence très nette qui apparaissait déjà entre échantillons revêtus d'une électrode de chrome et ceux munis d'une électrode d'aluminium : $(\tau_m)_j$ croît rapidement pour les premiers créneaux puis tend vers une certaine saturation dans ce dernier cas, tandis que le résultat est inverse pour une électrode de chrome.

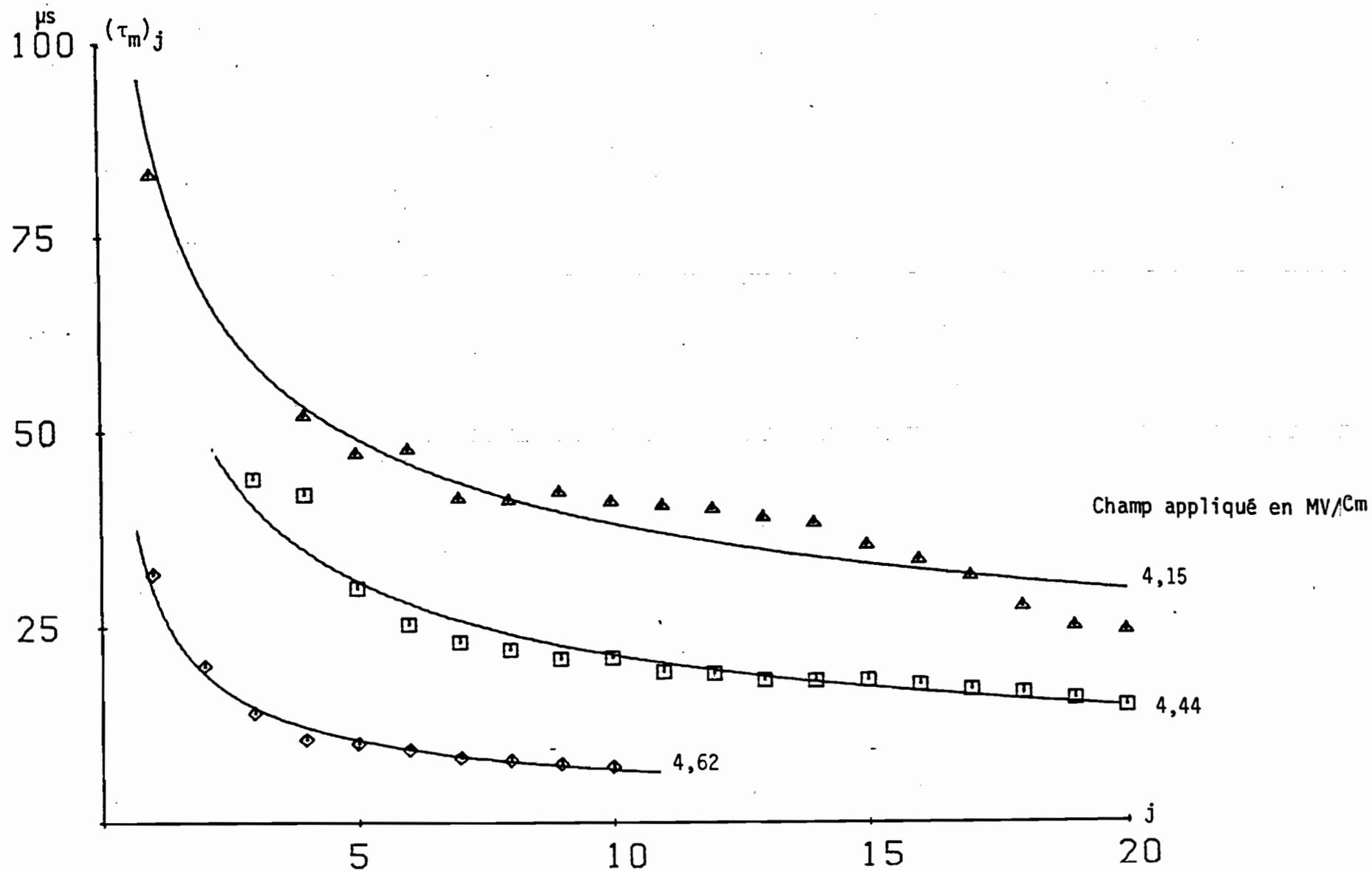


Figure III.14. Durée moyenne cumulée entre claquages successifs en fonction du nombre de crêneaux. Echantillon Cr - SiO₂ (therm) - Si-Ep. 2800 A

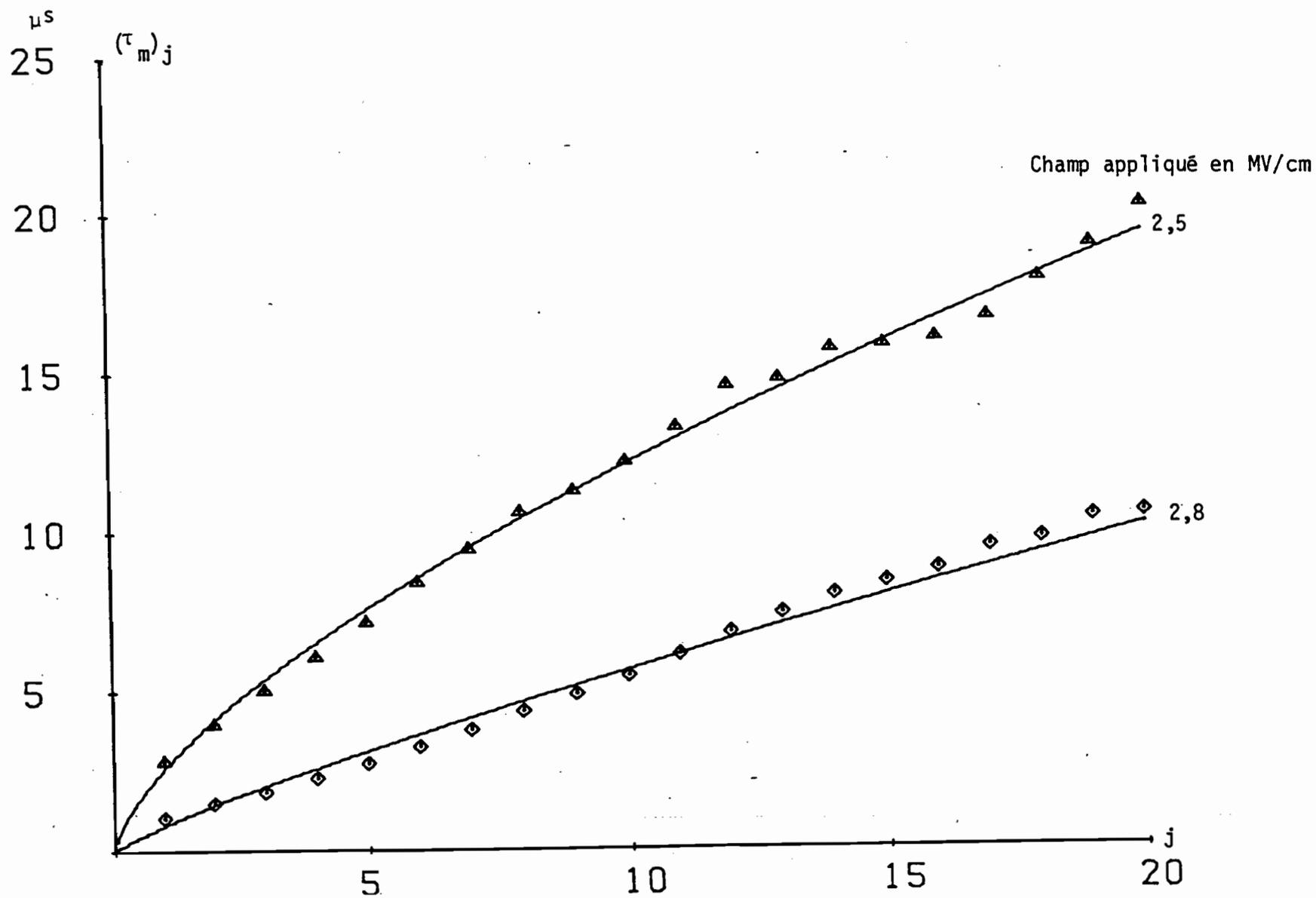


Figure III.15. Durée moyenne cumulée entre claquages successifs en fonction du nombre de crêneaux. Echantillon Al-SiO₂ (therm.) Si - Epaisseur 1000 Å

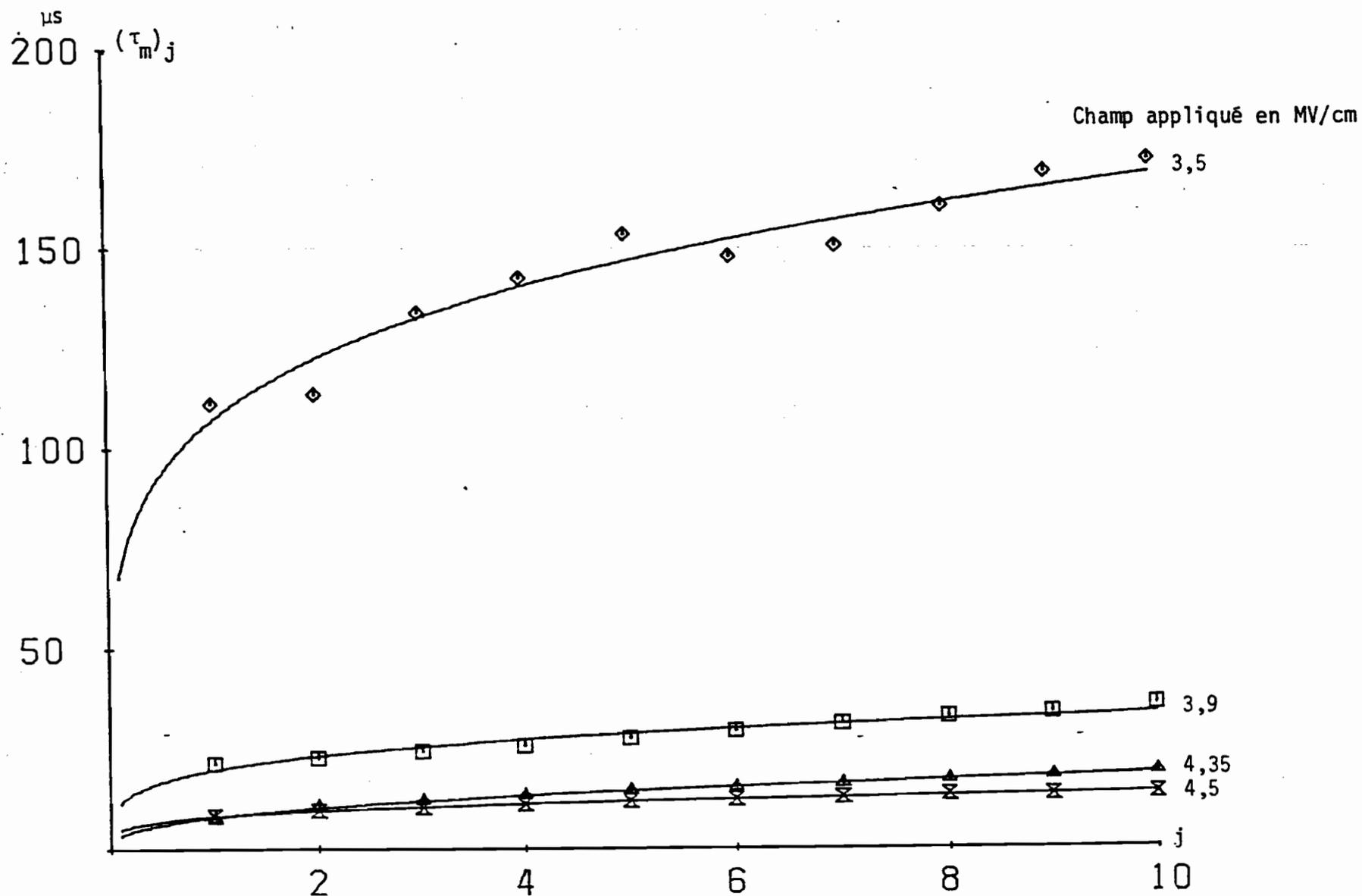


Figure III.16. Durée moyenne cumulée entre claquages successifs en fonction de crêneaux - Echantillon Al - SiO₂(CVD) - Si - Epaisseur 2000 Å

III-2-4 Histogramme des durées entre ruptures consécutives

Nous donnons, à titre d'exemple, sur les figures III-17,18,19 et 20, quatre histogrammes relatifs à un échantillon de silice CVD avec électrode d'aluminium et à des champs d'amplitudes successives 3,25, 3,5, 4,15 et 4,75 MV/cm. Précisons une fois encore, que τ_{ji} représente la durée qui sépare la $i^{\text{ème}}$ impulsion relative au créneau de rang j , de la $(i-1)^{\text{ème}}$ qui la précède immédiatement.

Nous remarquons que, pour des valeurs de champs relativement faibles, ces histogrammes sont quasiment plats, les claquages étant peu nombreux et les temps de retard très repartis. Par contre, pour les champs plus élevés, les classes des durées courtes sont plus importantes et des valeurs plus probables se définissent avec une précision de plus en plus grande.

III-2-5 Temps de retard cumulé

La durée totale pendant laquelle l'échantillon est soumis à la contrainte électrique avant la $i^{\text{ème}}$ rupture du $j^{\text{ème}}$ créneau, ou temps de retard t_{ji} défini par (4), est une autre façon de caractériser les phénomènes. Si l'on porte le rang du claquage en fonction de t_{ji} , on obtient, par exemple, les courbes des figures III-21 et 22 liées aux représentations précédentes.

On constate que la pente à l'origine, quasiment nulle pour une électrode de chrome, devient très élevée, tandis que la concavité s'inverse pour une électrode en aluminium. On peut noter également la diminution du temps de retard lorsque l'amplitude du champ s'accroît.

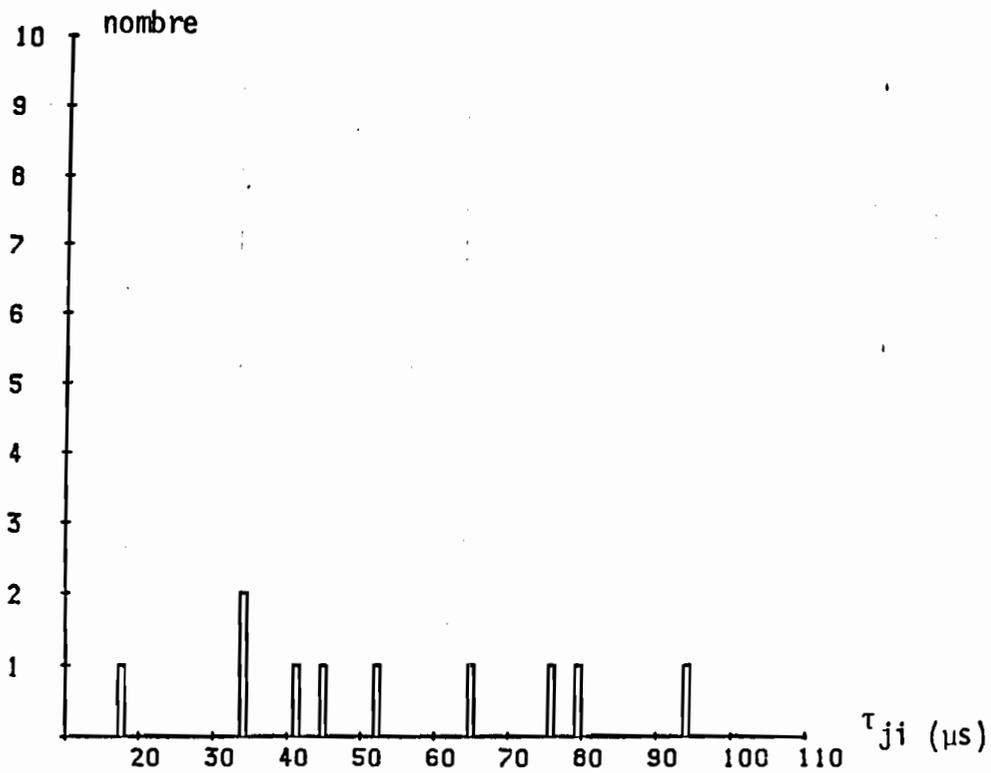


Figure III.17. Histogramme des durées entre ruptures consécutives Al-SiO₂ (CVD)-Si
E = 3,25 MV/cm

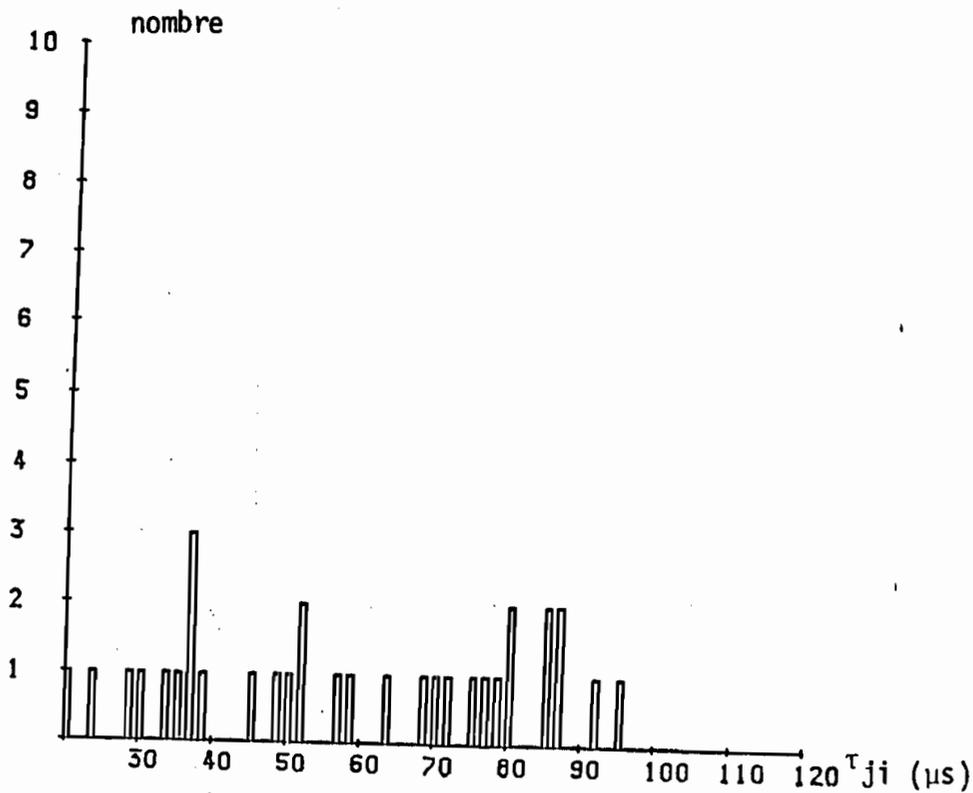


Figure III.18. Histogramme des durées entre ruptures consécutives Al-SiO₂ (CVD)-Si
E = 3,5 MV/cm

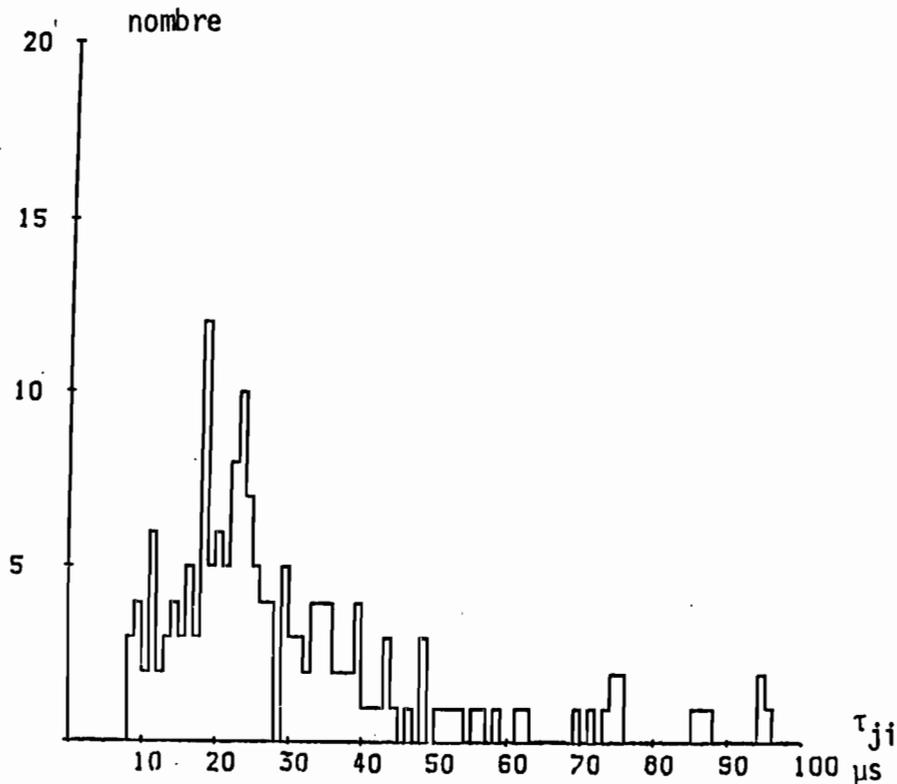


Figure III.19. Histogramme des durées entre ruptures consécutives Al-SiO₂ (CVD)-Si
E = 4,15 MV/cm

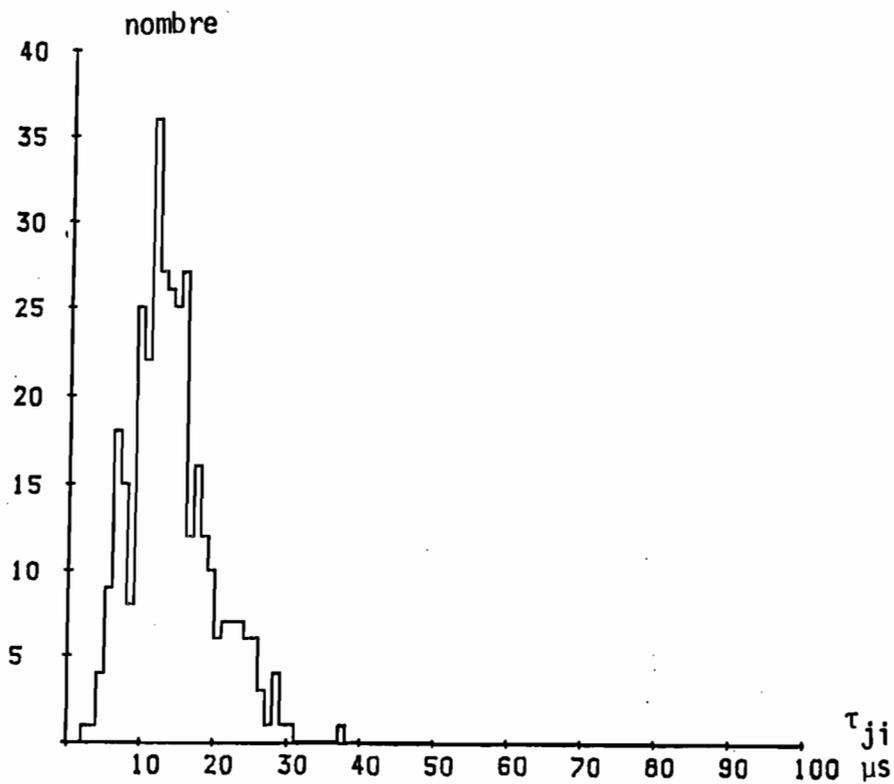


Figure III.20. Histogramme des durées entre ruptures consécutives Al-SiO₂ (CVD)-Si
E = 4,75 MV/cm

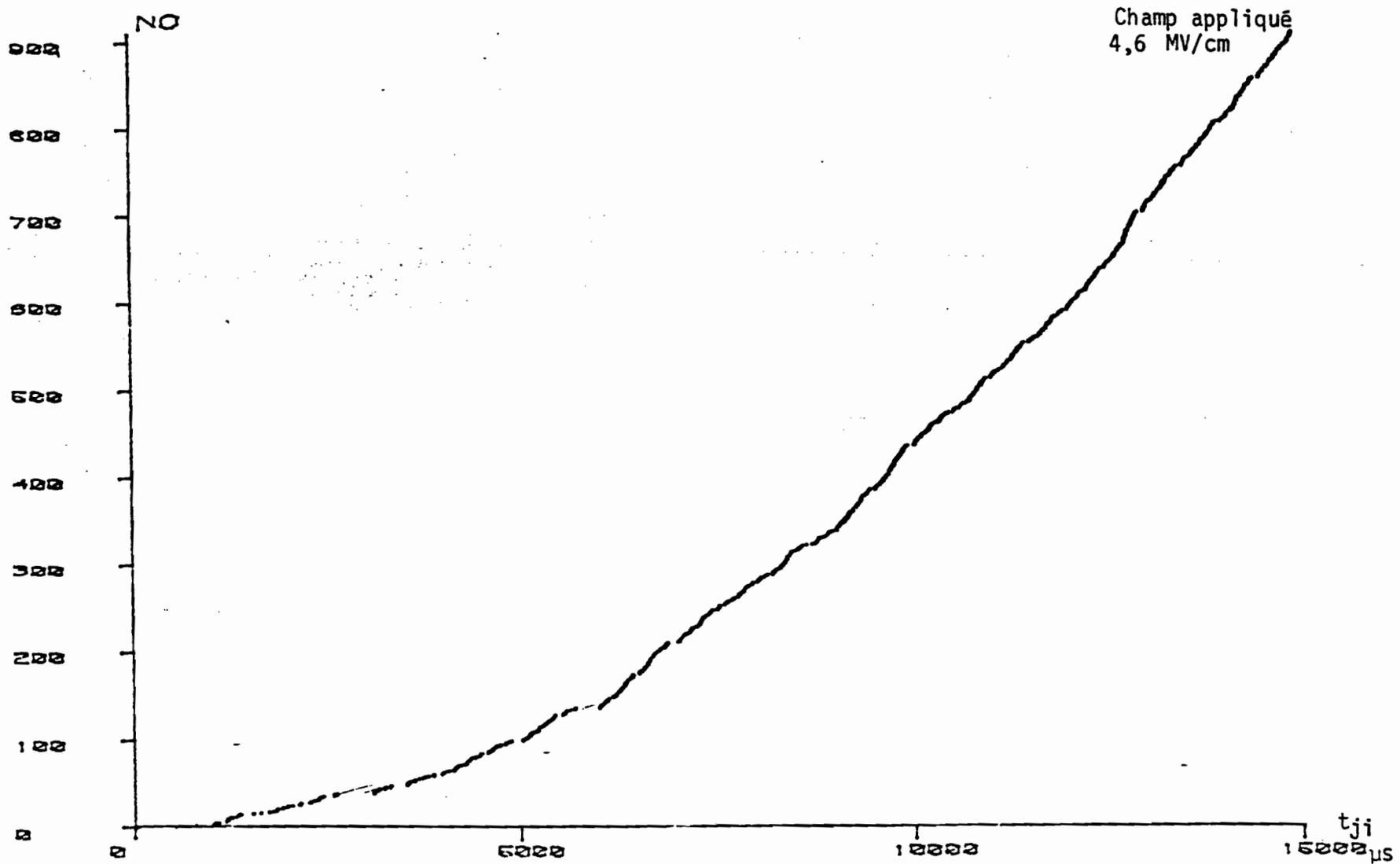


Figure III.21. Rang des claquages classés par ordre d'apparition, c'est à dire en fonction des temps de retard.
Echantillon Cr - SiO₂ (therm) - Si

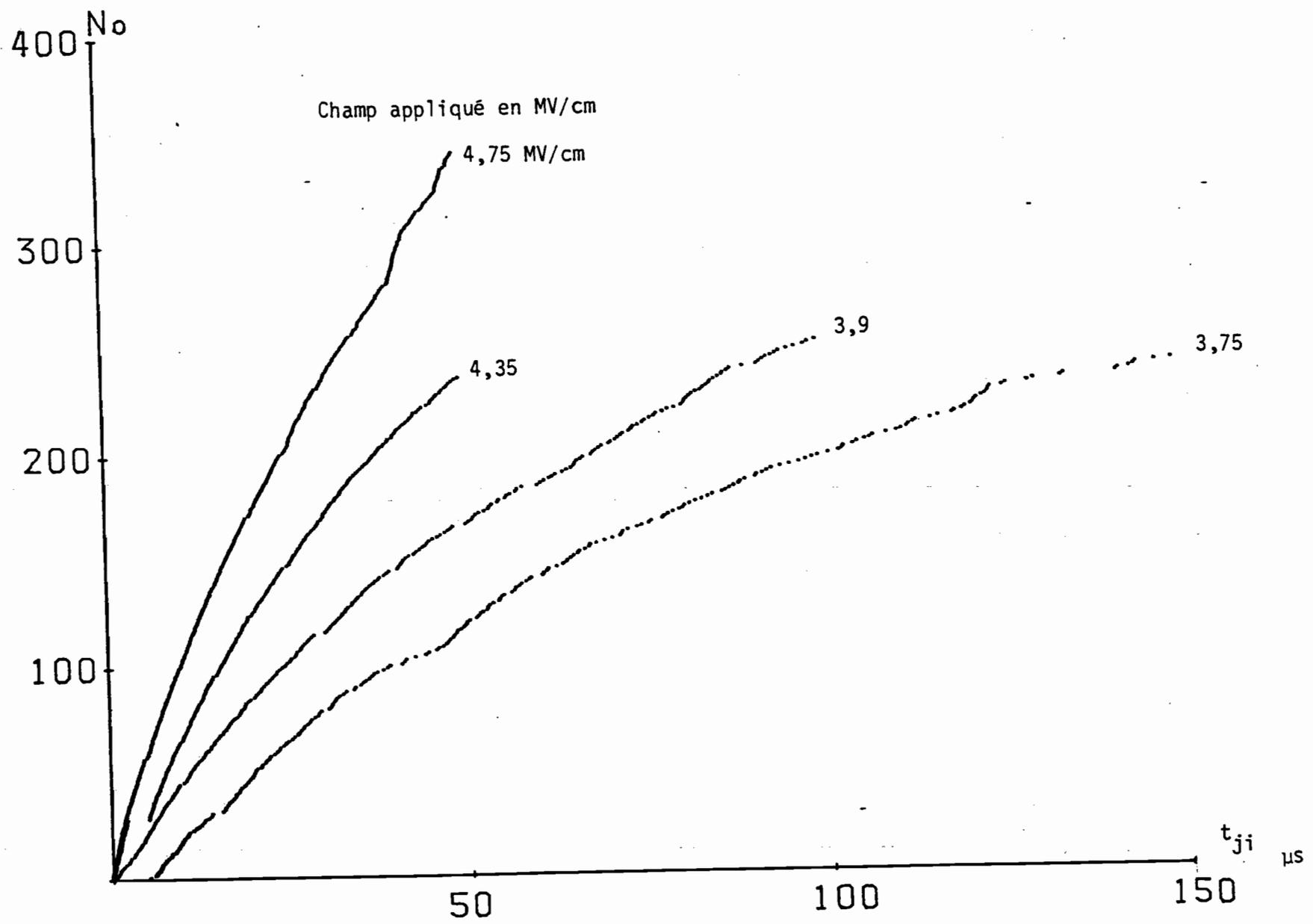


Figure III.22. Rang des claquages classés par ordre d'apparition, c'est à dire en fonction des temps de retard. Echantillon Al - SiO₂ (CVD)-Si

III-3 DEFINITION ET DETERMINATION DU CHAMP DE RUPTURE SPECIFIQUE

III-3-1 Définition

La durée qui s'écoule entre deux ruptures successives traduisant, à notre point de vue, une accumulation de défauts et de charges quelque part dans le matériau, on peut penser que la diminution du champ électrique appliqué ralentit ce phénomène et qu'il existe une valeur de cette contrainte pour laquelle il ne peut plus se produire. C'est bien ce que l'on constate, par exemple, sur les figures III-14,15 et 16 où les durées moyennes $(\tau_m)_j$ s'accroissent sensiblement lorsque diminue l'amplitude des créneaux de tension. On constate également que cette durée devient infinie, c'est à dire qu'il ne se produit plus de claquage, pour une valeur E_c du champ appliqué.

Pour définir E_c avec plus de précision, on peut relever, pour différentes valeurs du champ E , l'histogramme des durées τ_{ji} séparant deux claquages successifs d'où l'on tire, soit la valeur la plus probable $(\tau_p)_j$, soit la valeur moyenne $(\tau_m)_j$. On rappelle que l'indice j correspond au nombre de créneaux sur lequel porte l'histogramme. Si, ensuite, on traduit graphiquement, pour un j donné, les variations de $(\tau_m)_j$ en fonction de E , on obtient une courbe (figure III-23) qui doit présenter une asymptote verticale $((\tau_m)_j \text{ infini})$ pour la valeur E_c apparaissant ainsi comme un champ "intrinsèque" de rupture du matériau dans les conditions expérimentales choisies.

Nous appelons E_c le "champ de rupture spécifique" et nous en avons présenté la définition à la "First International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics" qui s'est tenue à Toulouse, sous l'égide de l'IEEE, en Juillet 1983./24/

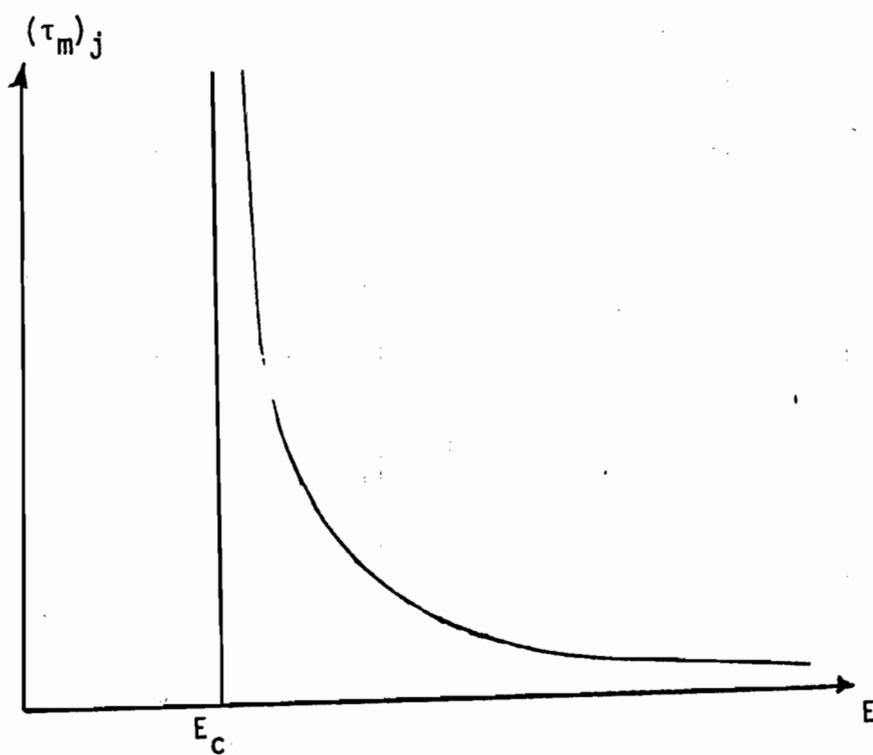


Figure III.23. Allure des variations de la durée moyenne entre claquages consécutifs en fonction du champ appliqué

III-3-2 Méthode de détermination

Par application de quelques rampes de tension, on fixe tout d'abord l'ordre de grandeur du champ de rupture, puis on applique à l'échantillon, autour de cette valeur, des créneaux de tension d'amplitude constante E provoquant des claquages dont la durée moyenne qui les sépare, $(\tau_m)_j$, peut dépendre du nombre j de créneaux.

En fait, nous avons constaté qu'au delà de 4 et jusqu'à 20 créneaux, on obtient pratiquement la même courbe $(\tau_m)_j(E)$. Nous avons donc fixé à 10 créneaux la durée d'application de la contrainte pendant laquelle on collecte les mesures, de sorte que, désormais, nous appellerons, pour simplifier, τ_m ce que nous devrions désigner, en fait, par $(\tau_m)_{10}$.

La courbe $\tau_m(E)$ a effectivement une allure hyperbolique, esquissée sur la figure III-23. En l'identifiant à une expression de la forme

$$\tau_m = \frac{a}{(E - E_c)^\alpha} \quad (5)$$

on détermine les trois constantes a , α et E_c , cette dernière représentant le champ de rupture que nous venons de définir.

Avant de présenter les résultats obtenus, il nous paraît utile de préciser la méthode adoptée pour le calcul de ces constantes.

On se propose donc d'opérer une régression du type :

$$y = a (X - b)^c \quad (6)$$

Une approximation directe par la méthode des moindres carrés /12/ conduirait à un système d'équations non linéaires. Nous avons choisi d'estimer les valeurs, toujours par cette même méthode, mais de la manière suivante : on suppose $c = -1$ pour calculer b et ensuite, à partir de cette valeur, calculer les valeurs de a et c .

*- Calcul de b

La relation (6) devient :

$$y(x-b) = a$$

ou encore

$$y = (xy-a)/b = -a/b + xy/b$$

En posant

$$b = 1/B \text{ et } a = A/B, \quad (7)$$

on peut écrire :

$$y = Bxy - A$$

et l'on peut effectuer une régression linéaire sur y , connaissant x et y .

La somme des carrés des résidus portant sur toutes les valeurs s'écrit :

$$r = \sum (y + A - Bxy)^2$$

Minimisons cette grandeur pour obtenir A et B , en annulant les dérivées partielles de r par rapport à ces deux paramètres.

Tout d'abord,

$$\partial r / \partial A = \Sigma 2(y - Bxy + A) = 0$$

soit

$$\Sigma (y - Bxy + A) = 0$$

si N représente le nombre total de points de mesure,

$$\Sigma y - B \Sigma xy + NA = 0$$

ce qui donne :

$$A = B \overline{xy} - \bar{y} \quad (8)$$

Ensuite,

$$\partial r / \partial B = \Sigma -2xy(y + A - Bxy) = 0$$

soit :

$$\Sigma xy^2 + A \Sigma xy - B \Sigma x^2 y^2 = 0$$

En divisant le tout par N et en remplaçant A par sa valeur (8), on

obtient :

$$B(\overline{xy^2} - \overline{x^2 y^2}) - (\overline{xy} \cdot \bar{y} + \overline{xy^2}) = 0$$

d'où la valeur de B :

$$B = (\overline{xy} \cdot \bar{y} - \overline{xy^2}) / (\overline{xy^2} - \overline{x^2 y^2}) \quad (9)$$

b est enfin donné par (7)

*- Calcul de a et c

Revenant à l'expression (6) et connaissant b, on pose $x-b = X'$,

On a donc :

$$y = aX^c$$

Prenons le logarithme de cette expression en ne considérant que la valeur absolue de X' , pour ne pas être gêné par les valeurs négatives.

$$\log y = c \log X' + \log a$$

$$\text{et posons } \log y = Y, \log X' = X \text{ ainsi que } \log a = D \quad (10)$$

Il vient :

$$Y = D + cX$$

La somme des carrés des résidus s'écrit maintenant :

$$r = \sum (Y - D - cX)^2$$

Minimisons r . D'une part,

$$\partial r / \partial D = -2 \sum (Y - D - cX) = 0$$

soit, en divisant le tout par N :

$$D = \bar{Y} - c\bar{X} \quad (11)$$

ce qui donne a , compte tenu de la troisième relation (10).

D'autre part,

$$\partial r / \partial c = -2 \sum X(Y - D - cX) = 0$$

Finalement, en remplaçant D par sa valeur (11) :

$$c = (\bar{X}\bar{Y} - \overline{XY}) / (\bar{X}^2 - \overline{X^2}) \quad (12)$$

Le listing correspondant à l'ensemble de ces calculs est donné en annexe 3.

III-3-3 Résultats et application

Nous avons procédé à la détermination du champ de rupture spécifique E_c de trois échantillons de matériaux différents, tels qu'ils ont été décrits au chapitre II. Le tableau ci-dessous en résume les principales caractéristiques :

| n° d'ordre | Matériau | Préparation | Electrode inférieure | Electrode supérieure | Epaisseur Å | Surface mm ² |
|------------|----------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------|----------------------------|
| 1 | Silice | Oxydation thermique | Silicium | Chrome | 2000±50 | 1 |
| 2 | Silice | CVD | Silicium | Aluminium | 2000±100 | 1 |
| 3 | Alumine | Evaporation sous vide | ITO ⁽¹⁾ | Aluminium | ~3000 | ~1 |

Les figures III-24,25 et 26 donnent les points expérimentaux, la courbe $\tau_m(E)$ et le tracé de l'asymptote respectivement pour ces trois échantillons.

Le tableau suivant rassemble les trois paramètres caractéristiques a , α et E_c relatifs à ces expériences.

(1) Voir définition au paragraphe II-2-3

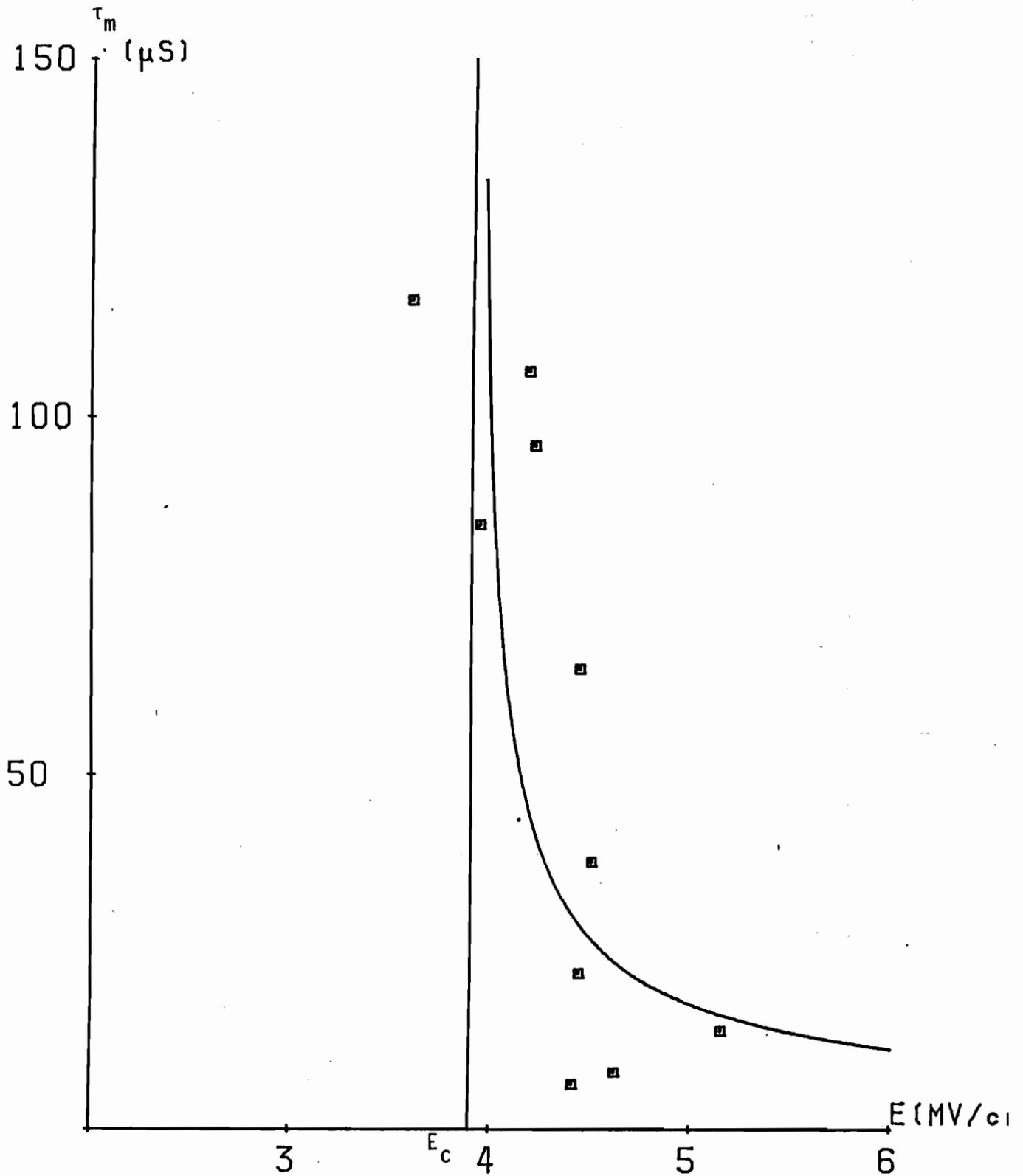


Figure III.24. Détermination du champ de rupture spécifique - Silice thermique $E_c = 3,90$ MV/cm

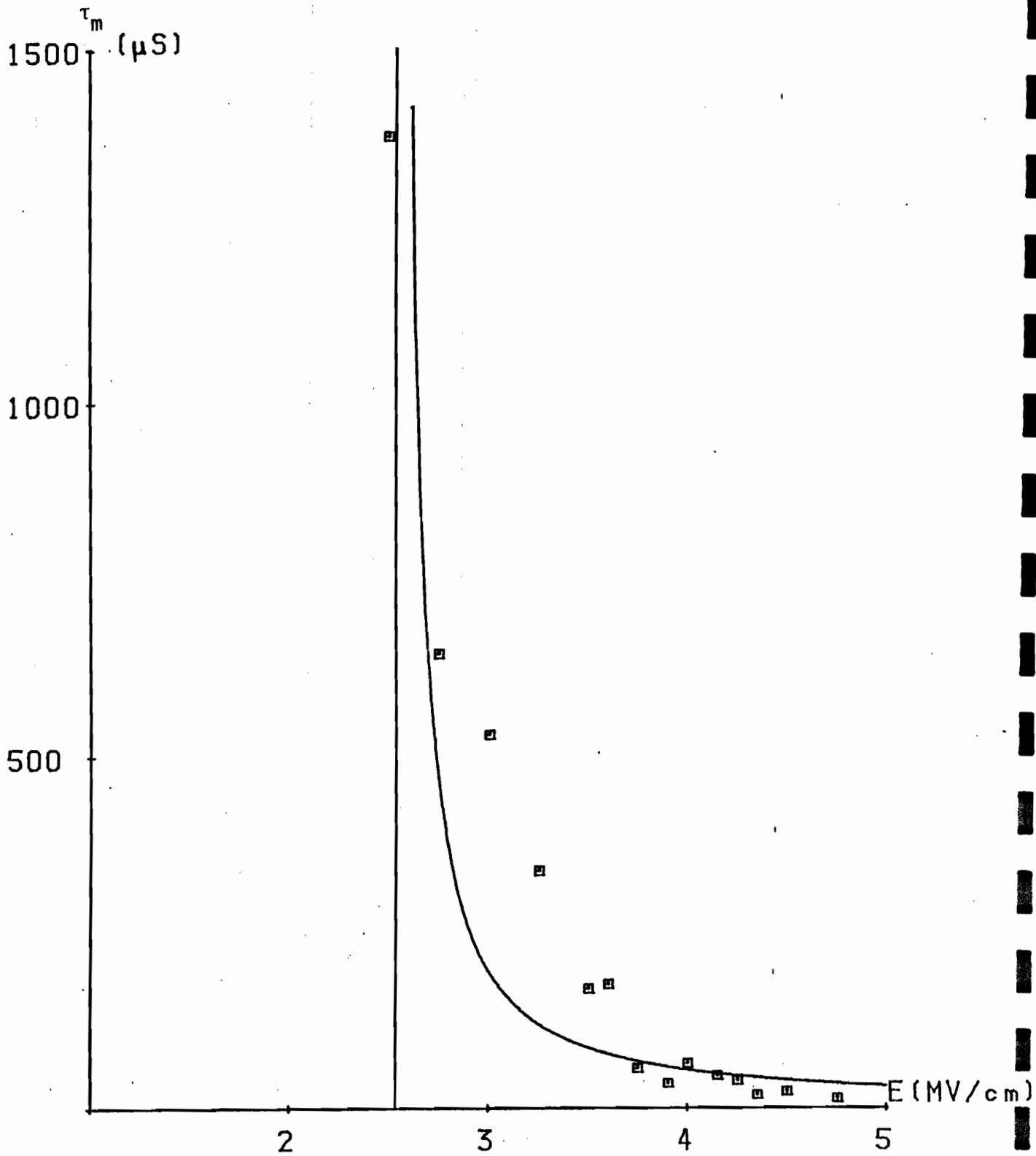


Figure III.25. Détermination du champ de rupture spécifique - Silice CVD
 $E_c = 2,54$ MV/cm

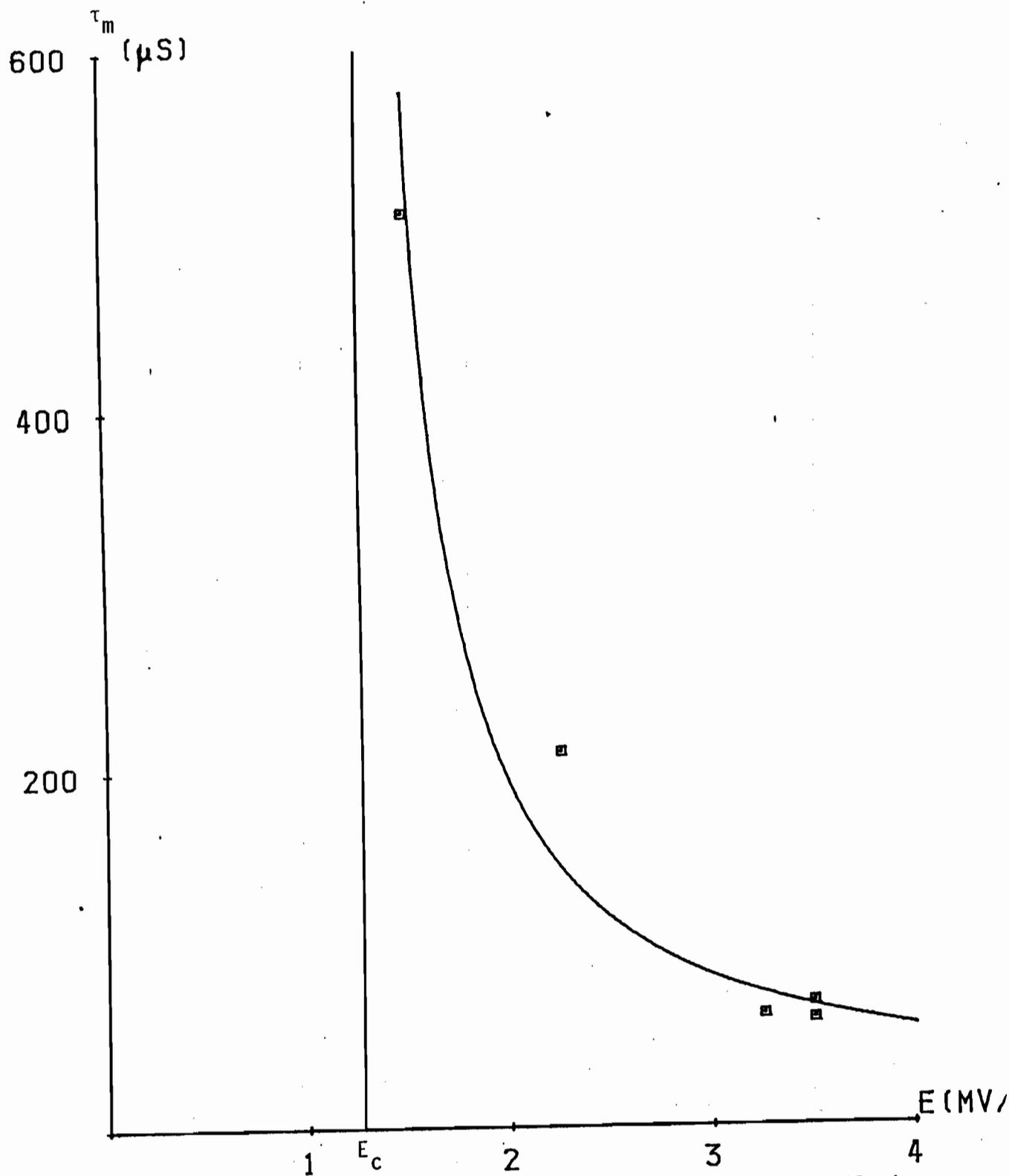


Figure III.26. Détermination du champ de rupture spécifique - Alumine
 $E_c = 1,27$ MV/cm

| n° d'ordre | $a_{\mu s}$ | α | E_c MV/cm |
|------------|-------------|----------|-------------|
| 1 | 18,8 | 0,70 | 3,90 |
| 2 | 83,8 | 1,12 | 2,54 |
| 3 | 142 | 0,96 | 1,27 |

A titre d'exemple d'utilisation de la notion de champ de rupture spécifique, nous montrons, sur la figure III-27, les résultats d'une première étude des variations de E_c en fonction de l'épaisseur e de l'échantillon, qui est ici de la silice thermique.

Nous essayerons de donner, au chapitre suivant, une interprétation de la courbe la plus probable $E_c(e)$ qui en a été déduite, et cela à partir des théories du claquage qui font intervenir la géométrie de l'échantillon.

III-3-4 Autre définition du champ de rupture spécifique

La durée τ_{ji} séparant deux impulsions consécutives représente en fait le temps qui s'écoule entre le dernier rétablissement de la tension, résultant de la cicatrisation du claquage précédent et la rupture considérée. Il peut être intéressant de prendre en compte, au lieu et place de cette grandeur, le temps de retard cumulé t_{ji} , défini par la relation (4) et représentant de la durée totale pendant laquelle l'échantillon a été maintenu sous tension. Comme indiqué au paragraphe I-2-1, on a alors recours à la statistique de WEIBULL et on retient, pour

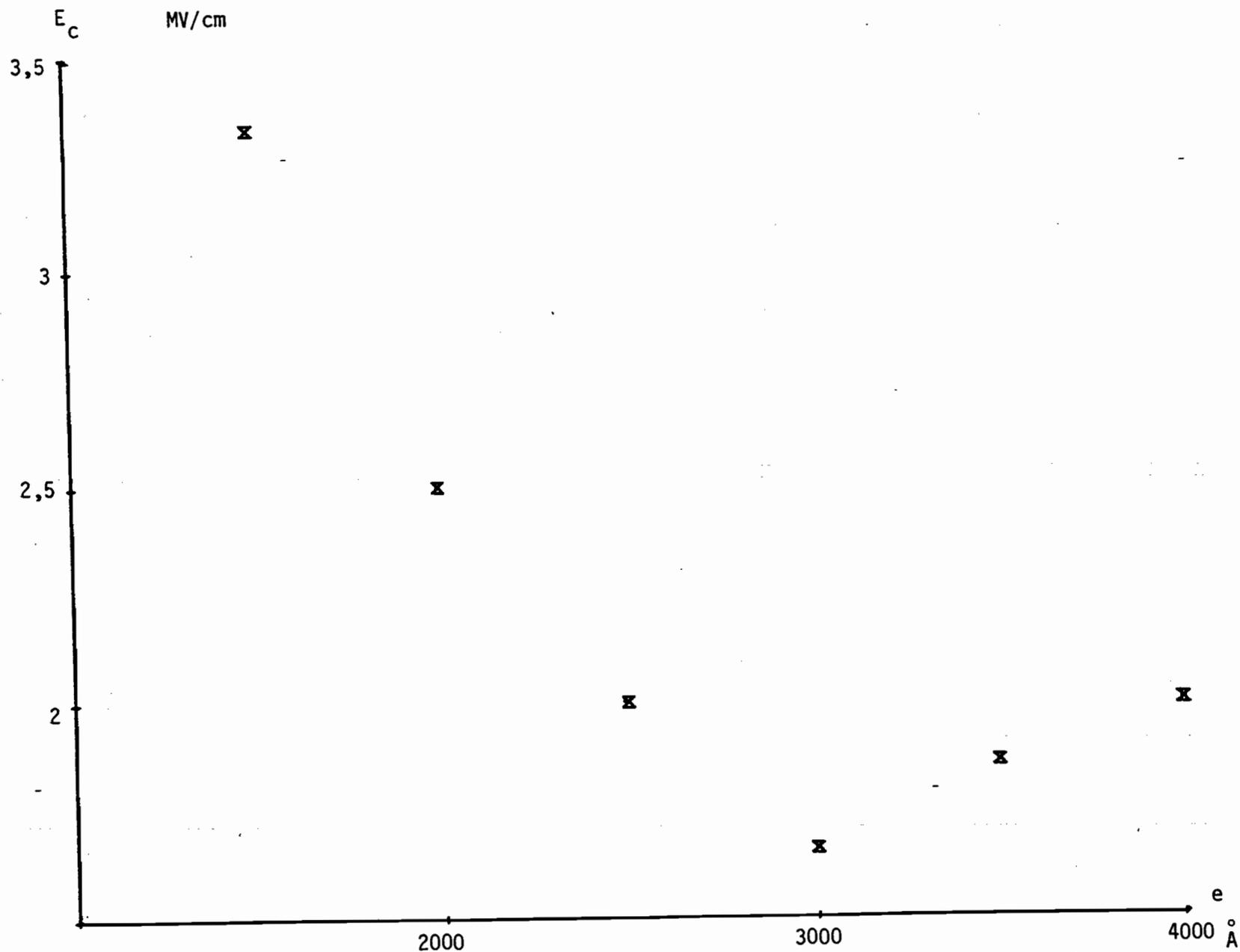


Figure III.27. Variation du champ de rupture spécifique en fonction de l'épaisseur de l'échantillon - Silice thermique

chaque valeur du champ appliqué E, la valeur t_w qui correspond à une probabilité de claquage de 63,2%.

Comme on peut le remarquer sur la figure III-28, relative à la silice CVD, les tracés donnés en exemple ne sont pas rectilignes ; cependant, si l'on excepte les mesures, de loin les moins nombreuses, pour lesquelles la précision sur la probabilité est la plus faible, c'est à dire les ruptures les moins probables et celles qui, au contraire, apparaissent comme quasiment certaines, on peut raisonnablement se fonder sur cette représentation pour trouver des valeurs caractéristiques du retard au claquage.

Un traitement de ces valeurs t_w analogue à celui des valeurs τ_m précédentes permet de trouver la relation $t_w(E)$ de forme hyperbolique dont l'extrapolation pour $t_w \rightarrow \infty$ donne un nouveau champ de rupture spécifique E_c' .

Par analogie avec la relation (5), nous écrivons :

$$t_w = \frac{a'}{(E - E_c')^\alpha} \quad (13)$$

La figure III-29 montre un exemple d'une telle détermination relative aux échantillons n°2 des tableaux du paragraphe III-3-3. Les paramètres de la relation (13) qui s'en déduisent ont les valeurs suivantes :

| a' μs | α' | E'_c MV/cm |
|--------------|-----------|--------------|
| 5910 | 0,97 | 2,13 |

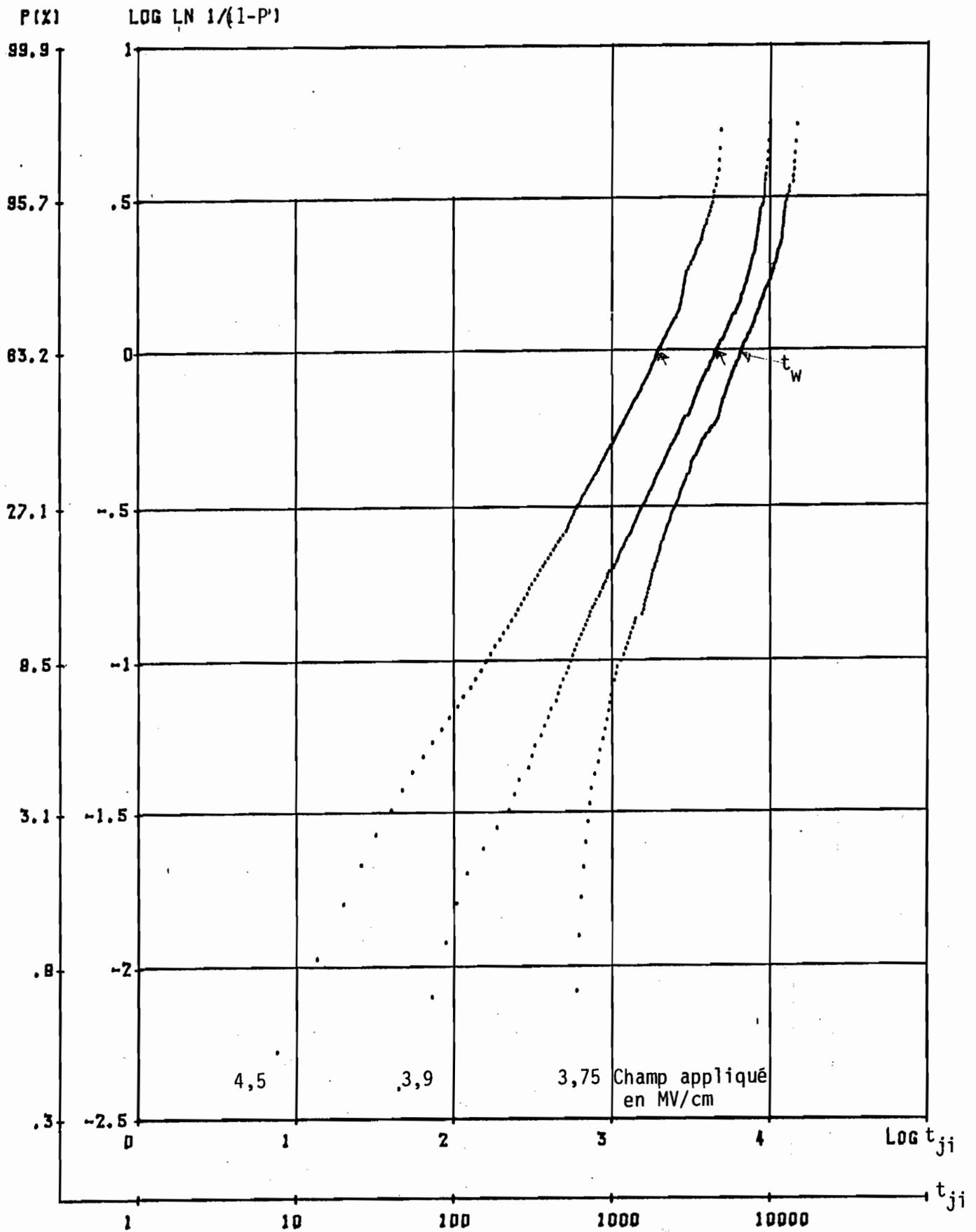


Figure III.28. Diagrammes de WEIBULL -Silice CVD

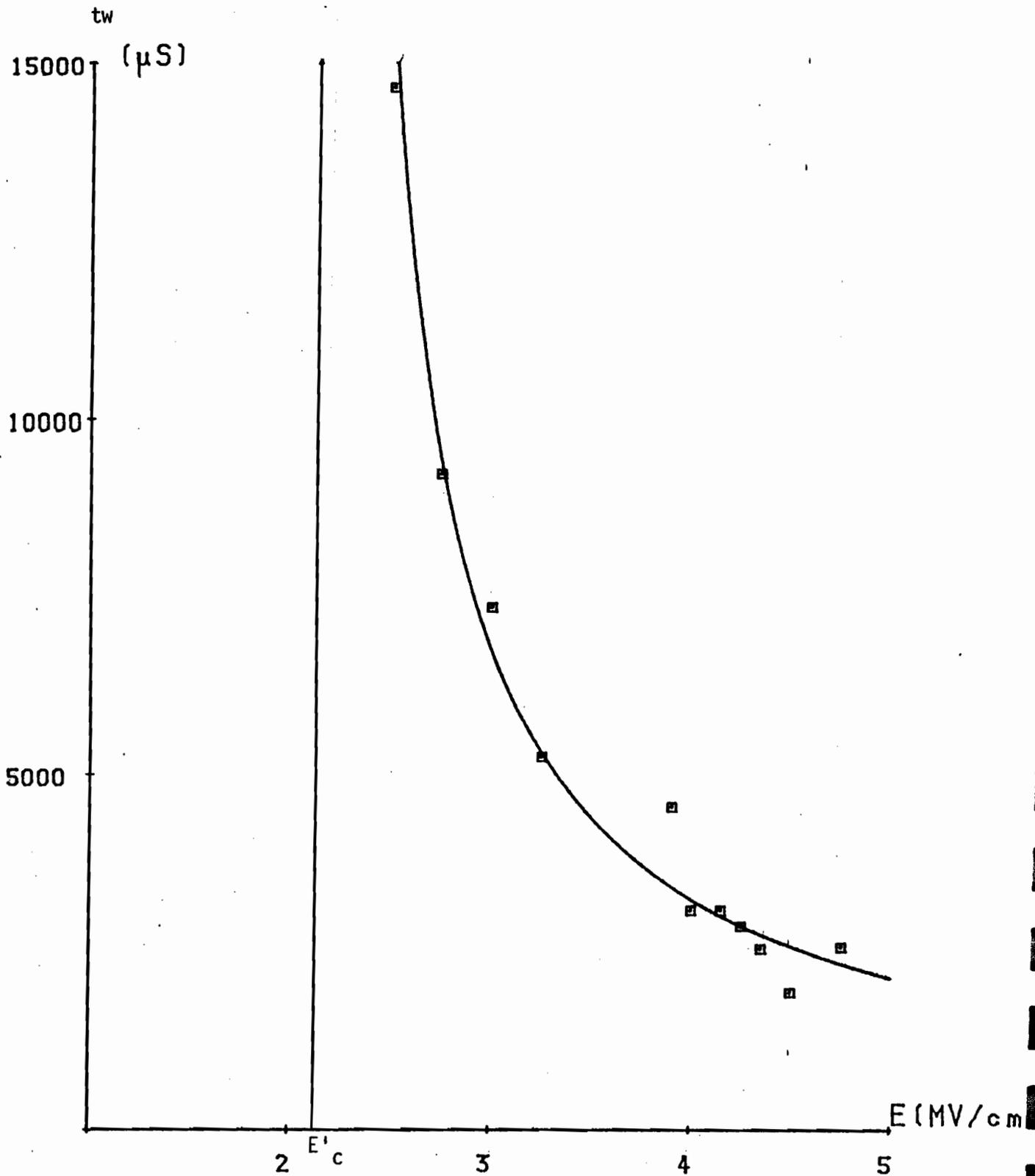


Figure III.29. Détermination du champ de rupture spécifique à partir des temps de retard cumulés
Silice CVD - $E'_c = 2,13 \text{ MV/cm}$

On observe que, partant de données très différentes pour caractériser le retard au claquage, on obtient, tant pour le champ de rupture spécifique :

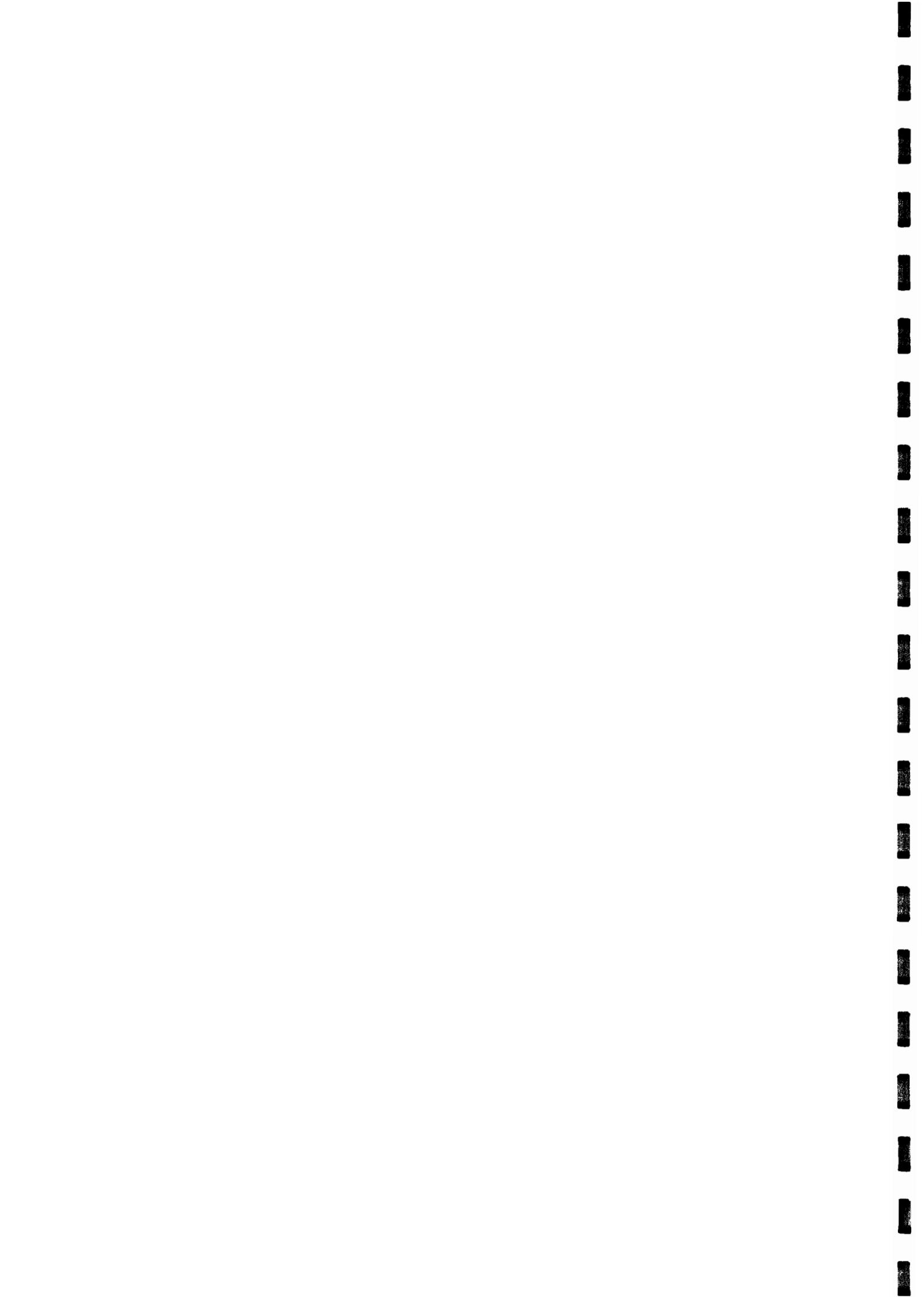
2,13 contre 2,54 MV/cm,

que pour l'exposant :

0,97 contre 1,12,

des valeurs du même ordre de grandeur.

Bien entendu, lorsqu'il s'agira d'utiliser nos critères pour étudier l'influence de paramètres sur la tenue diélectrique de matériaux ou encore pour comparer des matériaux entre eux, il conviendra de s'attacher à l'une des définitions du champ de rupture spécifique ou encore de considérer séparément les deux puisque leurs valeurs se déduisent des mêmes données expérimentales, en allongeant à peine le temps de traitement.



CHAPITRE IV
"DISCUSSION DES RESULTATS"



IV-DISCUSSION DES RESULTATS

Les résultats que nous avons obtenus grâce à l'ensemble expérimental et aux méthodes de traitement de données que nous avons mis au point et décrits au chapitre I sont de deux ordres :

- ceux qui concernent les temps de "conditionnement" de la rupture et qui se traduit par les durées séparant deux claquages consécutifs ou encore par les "temps de retard cumulés" depuis l'instant initial d'application du champ ;

- ceux relatifs à une première application de la notion de "champ de rupture spécifique" et qui donnent plus précisément les variations de ce critère de tenue d'un matériau en fonction de son épaisseur.

Pour interpréter ces résultats nous nous réfèrerons uniquement aux théories de la rupture, extraites d'une abondante littérature, qui nous ont paru utilisables, compte tenu des données numériques dont on peut disposer. Nous en rapellerons simplement les hypothèses de base et la formulation.

IV-1 INTERPRETATION DES TEMPS DE CONDITIONNEMENT

Il convient de souligner, en entreprenant cet essai d'interprétation, qu'aucun des modèles classiques ou récents de la rupture diélectrique ne prenant en compte la notion de champ de rupture spécifique, on ne saurait justifier directement le choix que nous avons fait précédemment d'une expression telle que (5) qui, sous forme logarithmique, se traduit par :

$$\text{Log } \tau_m = \text{Log } a - \alpha \text{ Log } (E - E_c) \quad (14)$$

Nous allons donc simplement, en nous limitant aux allures des variations et aux ordres de grandeur, rechercher, parmi les autres formulations qui ont un support théorique, celle qui représente avec un minimum de distorsion, les phénomènes que nous avons observés en ce qui concerne les temps de conditionnement du claquage.

IV-1-1 Utilisation des théories électroniques

IV-1-1-1 Claquages électroniques localisés de KLEIN /16/

Le phénomène de rupture est analysé en quatre étapes :

L'initiation et l'augmentation de la conductivité (1) provoquent l'apparition d'instabilités et une forte augmentation du courant (2). Celle-ci conduit au claquage et à la chute de tension aux bornes de l'échantillon (3). En fait la deuxième et la troisième étape sont intimement liées et se produisent pratiquement au même instant. Dans le cas où le claquage est autocicatrisant, la quatrième étape (4) se traduit par le retour à l'état isolant de l'échantillon.

Cette théorie est basée sur l'idée suivant laquelle un électron émis par la cathode dans la bande de conduction de l'isolant provoque une avalanche finie d'électrons libres. Ceux-ci sont entraînés très rapidement vers l'anode tandis que les charges positives créées par l'ionisation s'écoulent plus lentement vers la cathode. Dans la région comprise entre le dernier paquet de charges positives laissées par

l'avalanche et l'anode, le champ devient faible et les électrons libres qui s'y trouvent ne reçoivent plus assez d'énergie pour être suffisamment accélérés et poursuivre l'ionisation. Le phénomène ne pourra donc atteindre une taille suffisante pour provoquer le claquage que s'il se produit une succession d'avalanches.

Cette théorie des claquages électroniques localisés se traduit finalement par l'expression du temps de retard à la rupture t_r en fonction du champ électrique appliqué E . Elle s'exprime par une fonction exponentielle du champ, elle même précédée d'un facteur dont on peut, en première approximation, négliger les variations avec le champ. Selon le type d'injection, la relation $t_r(E)$ prend deux formes assez différentes, quoique de même type, que nous allons expliciter.

* Injection thermoélectronique

$$t_r = A(E,T) \exp \left(- \frac{a}{kT} E^{1/2} \right) (1 + \beta_1^{1/2} + \beta_2^{1/2} + \dots + \beta_{n-1}^{1/2}) \quad (15)$$

Dans cette expression, a est une constante, k la constante de BOLTZMANN, T la température absolue et $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{n-1}$ les facteurs d'accroissement du champ à la cathode lors des avalanches successives 1, 2, ..., n-1, précédant la dernière. D'autre part, nous considérons $A(E,T)$ comme constant devant les variations du terme exponentiel.

Ainsi,

$$\text{Log } t_r = \text{Log } A - \frac{a}{kT} (1 + \beta_1^{1/2} + \beta_2^{1/2} + \dots + \beta_{n-1}^{1/2}) E^{1/2} \quad (16)$$

En identifiant t_r à la valeur moyenne τ_m de la durée séparant deux

deux claquages successifs (Cf § III-3-1), la représentation graphique des variations de $\text{Log } \tau_m$ en fonction de \sqrt{E} doit donner une droite de pente théorique

$$-\frac{a}{kT} (1 + \beta_1^{1/2} + \beta_2^{1/2} + \dots + \beta_{n-1}^{1/2}) \quad (17)$$

A défaut d'informations sur β , on peut au moins dire que, ces valeurs étant positives, les valeurs expérimentales des pentes doivent être, en valeur absolue, supérieures ou, à la rigueur, égales à la pente minimale théorique a/kT dont on montre qu'elle s'écrit plus explicitement :

$$\frac{a}{kT} = \left(\frac{q^3}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r} \right)^{1/2} \frac{1}{kT} \quad (18)$$

avec $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m

$\epsilon_r =$ permittivité relative du matériau

$kT = 4,04 \cdot 10^{-21}$ J à 293°K,

soit

$$\frac{a}{kT} = 1,5 \cdot 10^{-3} \epsilon_r^{-1/2} \text{ m}^{1/2} \text{ V}^{-1/2} \quad (19)$$

ou encore, avec l'unité pratique utilisée pour le champ, notamment dans ce mémoire :

$$\frac{a}{kT} = 15 \epsilon_r^{-1/2} \text{ cm}^{1/2} \text{ MV}^{-1/2} \quad (20)$$

La figure IV-1 donne les variations à 20°C de $\text{log } \tau_m$ en fonction de

\sqrt{E} relevées sur les échantillons de silice thermique, de silice CVD et d'alumine utilisés pour la détermination du champ de rupture spécifique (Cf § III-3-3). Les droites tracées ont été obtenues par application de la méthode des moindres carrés. Le tableau suivant permet de comparer les pentes de ces droites avec la pente minimale théorique déduite de (20).

| n° d'ordre | Matériau | Préparation | Permittivité relative ϵ_r | Pente minimale théorique $-a/kT$ (cm/MV) ^{1/2} | Pente expérimentale (cm/MV) ^{1/2} |
|------------|----------|-----------------------|------------------------------------|---|--|
| 1 | Silice | oxydation thermique | 3,9 | -7,60 | -7,72 |
| 2 | Silice | CVD | 3,9 | -7,60 | -7,86 |
| 3 | Alumine | évaporation sous vide | 7(*) | -5,7 | -3,33 |

* Injection de type FOWLER-NORDHEIM

L'expression (15) du temps de retard est remplacée ici par :

$$t_r = B(E,t) \exp\left(-\frac{b}{E}\right) \left(1 + \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} \dots + \frac{1}{\beta_{n-1}}\right) \quad (21)$$

où b est une constante et les β ont la même signification que précédemment. Si l'on considère les variations de $B(E,T)$ comme négligeables devant celles du facteur exponentiel, on peut écrire :

(*) Valeur moyenne choisie entre les valeurs extrêmes de 5,4 et 8,4 trouvées dans la littérature.

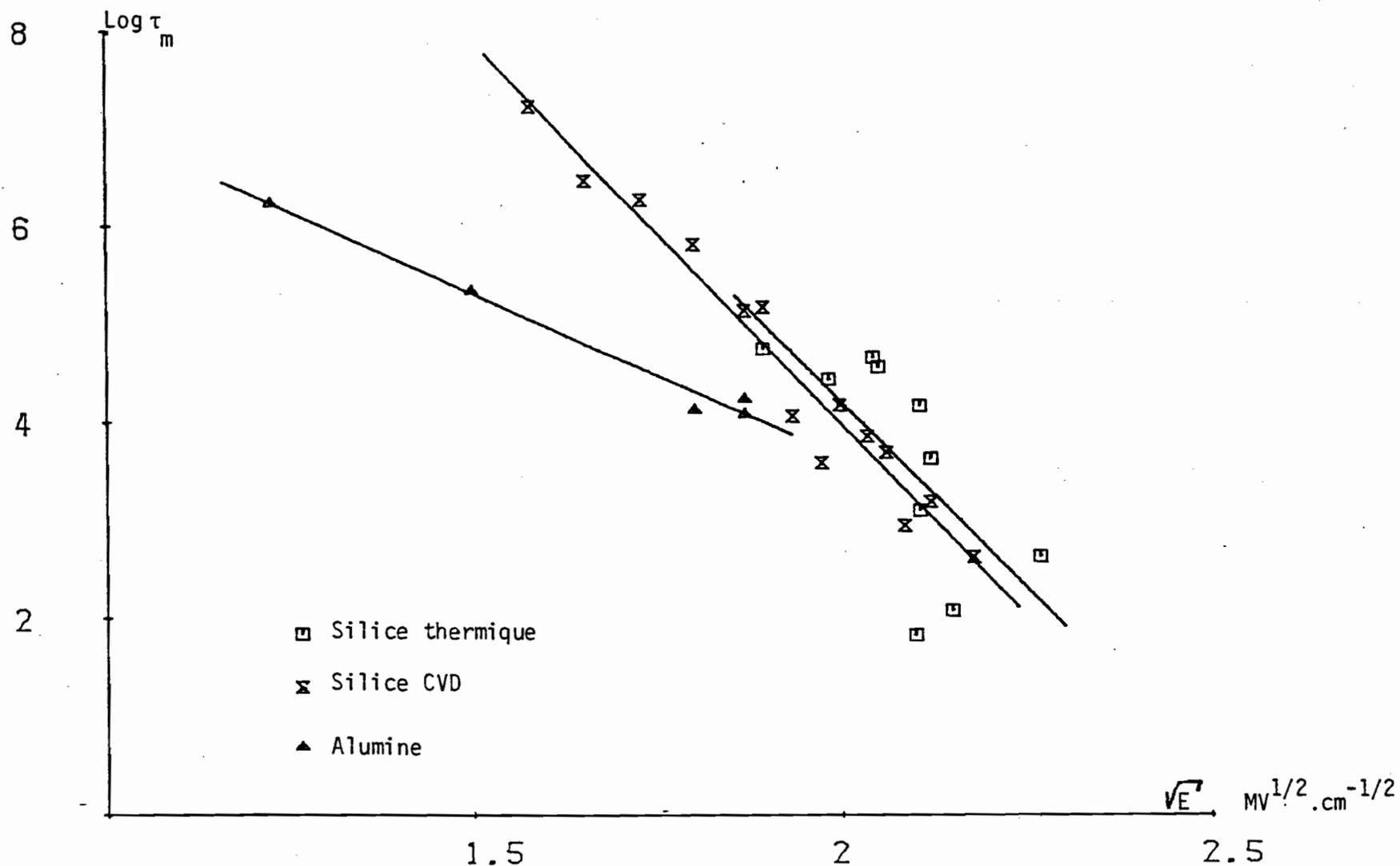


Figure IV.1. Variations à 20°C du logarithme de la durée moyenne séparant deux décharges consécutives en fonction de la racine carrée du champ appliqué.

(22)

$$\text{Log } t_r = \text{Log } B + b \left(1 + \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} + \dots + \frac{1}{\beta_{n-1}} \right) \cdot \frac{1}{E}$$

En identifiant encore t_r avec τ_m , la représentation $\text{Log } \tau_m$ en fonction de $1/E$ doit être linéaire et de pente théorique

$$b \left(1 + \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} + \dots + \frac{1}{\beta_{n-1}} \right) \quad (23)$$

dont la valeur minimale est b . On montre que b s'exprime comme suit

$$b = \frac{4 \cdot (2m^*)^{1/2}}{3q\hbar} E_b^{3/2} \quad (\text{V/m}) \quad (24)$$

avec m^* : masse efficace de l'électron

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$$

$$\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

E_b : hauteur de barrière métal-isolant

En ce qui concerne la masse efficace de l'électron, elle est à peu près bien connue dans la silice,

$$m^* \approx 0,4m = 3,6 \cdot 10^{-31} \text{ kg},$$

mais, pour l'alumine, nous n'avons pas pu trouver sa valeur dans la littérature. Nous avons arbitrairement pris la même que ci-dessus.

Quant à la hauteur de barrière Al-SiO₂, elle est donnée pour 3,2 eV /43/, tandis que dans le système Al-Al₂O₃, on trouve des valeurs comprises entre 3,05 eV et 3,25 eV /50/. Là encore, nous retiendrons la même donnée pour les deux matériaux, soit 3,2 eV.

Dans ces conditions, la pente minimum théorique vaut 245 MV/cm.

La figure IV-2 donne les variations à 20°C de $\text{Log } \tau_m$ en fonction de $1/E$ correspondant aux mesures du paragraphe précédent. Le tableau suivant permet de comparer les pentes des droites obtenues avec la pente théorique b calculée ci-dessus :

| n° d'ordre | Matériau | Préparation | Pente minimum théorique b MV/cm | Pente expérimentale MV/cm |
|------------|----------|-----------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| 1 | Silice | oxydation thermique | 245 | 33,3 |
| 2 | Silice | CVD | 245 | 24,9 |
| 3 | Alumine | évaporation sous vide | 245(*) | 5,76 |

* Modèles précédents appliqués au champ de rupture spécifique basé sur le temps de retard cumulé

Nous avons vu au paragraphe III-3-4 que l'on pouvait définir un champ de rupture spécifique en se basant sur le temps de retard cumulé correspondant, pour un claquage donné, à la durée totale pendant laquelle l'échantillon a été maintenu sous tension. Rappelons qu'on retient pour chaque amplitude du champ appliqué la valeur t_w qui correspond à une probabilité de claquage de 63,2% sur le diagramme de WEIBULL.

(*) Sous réserve d'une valeur plus exacte de la masse efficace de l'électron libre dans ce matériau.

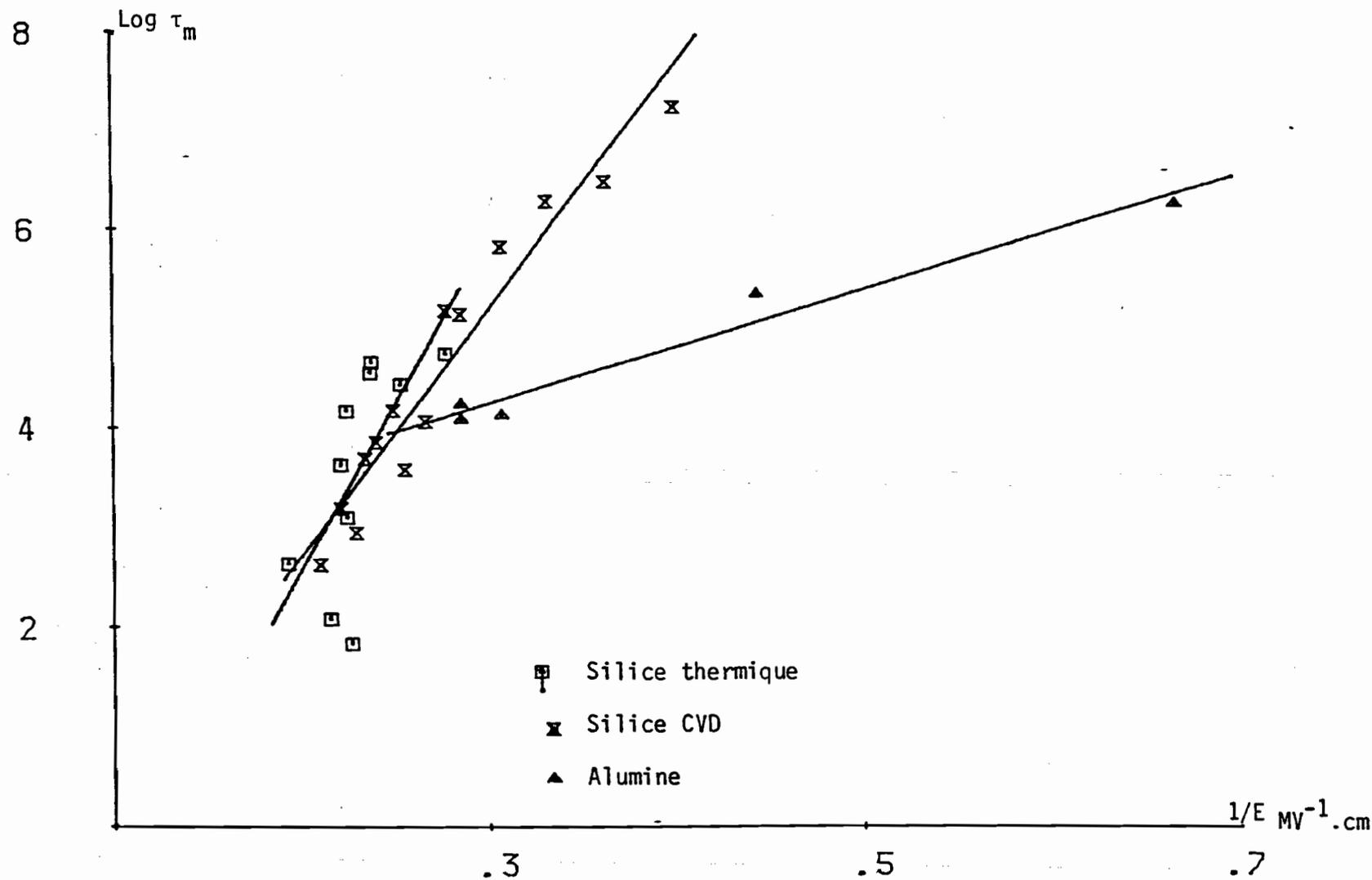


Figure IV.2. Variation à 20°C du logarithme de la durée moyenne séparant deux décharges consécutives en fonction de l'inverse du champ appliqué.

En substituant t_w à t_r dans les expressions (15) et (21), et en effectuant les mêmes approximations, on obtient évidemment les mêmes pentes théoriques (20) ou (24) selon que l'on se réfère à une injection thermoélectronique ou à une injection de type FOWLER-NORDHEIM. De la figure IV-3 qui donne les tracés de $\log t_w = f(\sqrt{E})$ et de $\log t_w = f(1/E)$ pour la silice CVD, on tire les pentes expérimentales que le tableau suivant permet de comparer aux valeurs théoriques. Nous y avons adjoint également les valeurs expérimentales relatives à l'utilisation de τ_m .

| Pentes | Loi en | |
|-----------------------------|-----------------------------------|-------------|
| | \sqrt{E} (cm/MV) ^{1/2} | 1/E (MV/cm) |
| minimale théorique | - 7,60 | 245 |
| expérimentale pour τ_m | - 7,86 | 24,9 |
| expérimentale pour t_w | - 3,06 | 9,75 |

Des trois tableaux figurant dans le présent paragraphe IV-1-1-1, on peut tirer les deux enseignements suivants :

- Lorsqu'on choisit comme temps de retard au claquage, la durée moyenne τ_m séparant deux ruptures consécutives, on trouve expérimentalement une représentation linéaire convenable pour $\log \tau_m$,

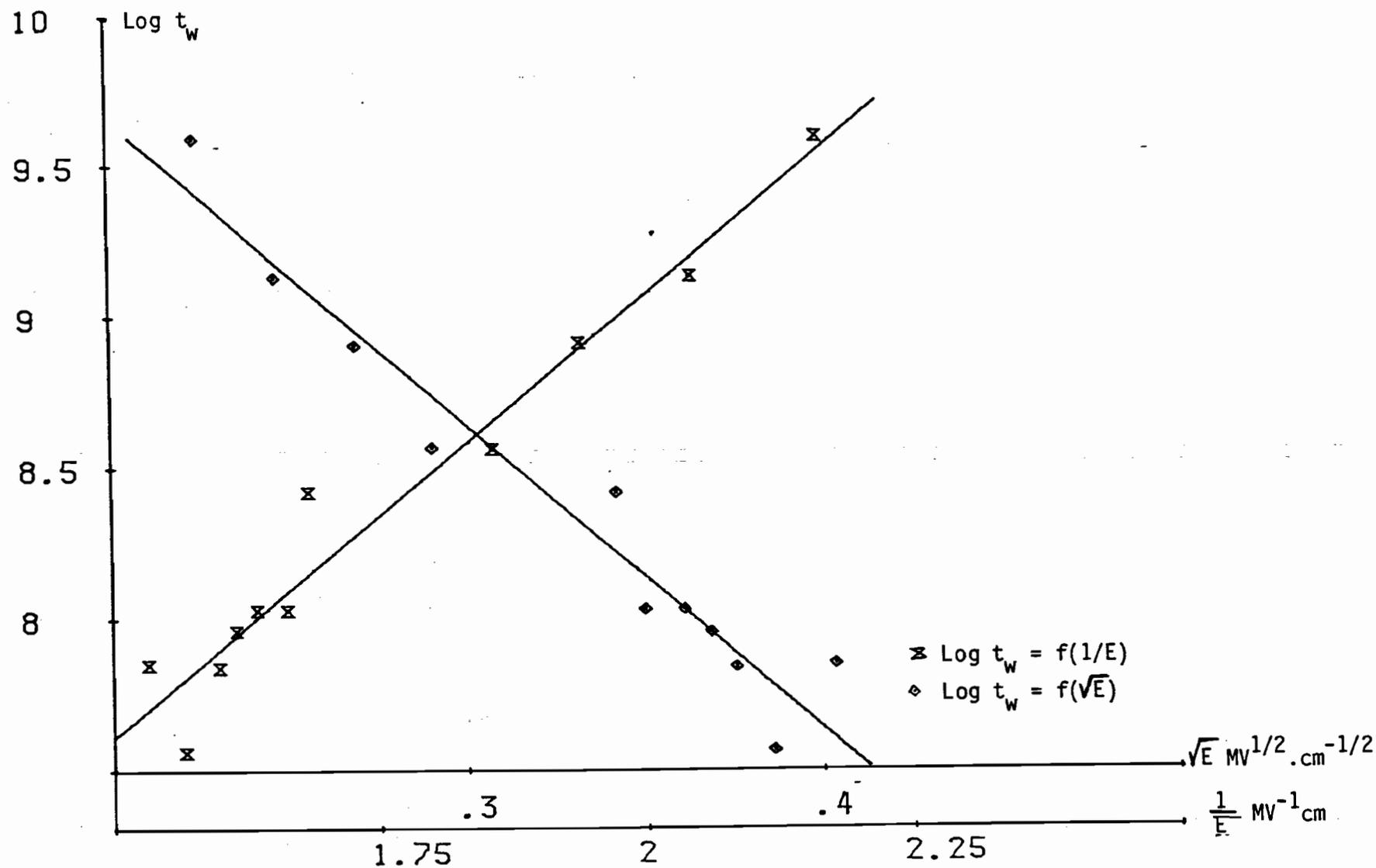


Figure IV.3. Variations à 20°C du logarithme du temps de retard cumulé en fonction de la racine carrée et de l'inverse du champ. Silice CVD

aussi bien en fonction de la racine carrée du champ que de l'inverse de cette grandeur. Cependant, les pentes de ces droites ne s'accordent pas de la même façon dans les deux cas avec la valeur minimale de la pente théorique qui peut être calculée simplement.

En effet, en faisant l'hypothèse d'une injection de porteurs d'origine thermoélectronique, les valeurs théoriques et expérimentales sont pratiquement les mêmes pour les deux types de silice étudiées et très voisines pour l'alumine. Par contre, avec l'hypothèse d'une injection par effet FOWLER-NORDHEIM, les résultats diffèrent nettement et, ce qui nous paraît déterminant, c'est que les valeurs expérimentales soient inférieures au minimum théorique, enlevant ainsi toute signification aux facteurs d'accroissement β figurant dans la relation (21).

Ainsi, au stade actuel de notre expérimentation, il apparaît que la première hypothèse rend bien mieux compte des phénomènes observés.

- Quant au temps de retard cumulé t_w qui, nous l'avons vu, conduit, du moins pour la silice CVD, à un champ de rupture spécifique légèrement inférieur à celui qui résulte du choix de τ_m , la pente de son évolution est inférieure au minimum théorique, mais reste du même ordre de grandeur pour le tracé en \sqrt{E} , alors qu'elle en diffère de plus d'un ordre de grandeur pour la loi en $1/E$, ce qui confirme notre précédente conclusion.

On peut ajouter que les valeurs de τ_m varient de 20 à 1500 μs , alors que les valeurs de t_w sont comprises entre 2500 et 15000 μs . Le fait qu'il n'y ait pas de différence significative dans la nature des résultats obtenus à partir de ces deux grandeurs peut laisser penser que

la durée de "conditionnement" de la rupture est plus courte que les τ_m , bien inférieurs aux t_w correspondants.

IV-1-1-2 Claquages dus à une augmentation continue du courant dans l'isolant/30/

Cette augmentation peut avoir deux origines : le passage des électrons de la bande de valence dans la bande de conduction sous l'effet du champ ou l'ionisation par collision.

Les auteurs qui se sont intéressés au premier type de phénomène, tels ZENER /48/ et FRANTZ /9/, ont calculé la probabilité de passage d'un électron de la bande de valence dans la bande de conduction. Pour aboutir à une relation entre le temps de retard t_r et le champ appliqué E , FRANTZ fait appel à la théorie du claquage thermique par impulsion. Il aboutit à une équation implicite difficilement manipulable ; il en existe fort heureusement une bonne approximation dont nous pourrions nous contenter si l'on tient compte de l'incertitude qui subsiste sur les valeurs d'un certain nombre de grandeurs entrant dans l'expression complète.

$$E = 40 \frac{I^{3/2}}{\text{Log} (10^{20} t_r^2)} \quad (26)$$

Dans cette relation,

I , énergie d'ionisation dans la silice, est en eV,

t_r , temps de retard, en microsecondes, et

E , champ électrique, en MV/cm

Elle n'est autre que l'équation linéaire (22) avec, simplement, deux

nouvelles valeurs pour les paramètres :

$$\text{Log } t_r = \text{Log } C + c \frac{1}{E} \quad (27)$$

La pente c s'exprime maintenant par

$$c = 20.I^{3/2} \quad (28)$$

Pour la silice, $I = 9 \text{ eV}$; d'où

$$c = 540 \text{ MV}^{-1} \cdot \text{cm} \quad (29)$$

Si l'on admet pour l'énergie d'ionisation dans l'alumine le même ordre de grandeur que le précédent, les valeurs théoriques de la pente, pour les deux types de matériaux que nous avons étudiés, sont encore plus éloignées de nos résultats expérimentaux que dans la précédente loi en $1/E$, et cela que l'on identifie t_r avec τ_m ou, à plus forte raison, avec t_w . De plus, les valeurs de ces durées tirées de (26) sont considérablement plus élevées que celles de nos observations.

Nous ne retiendrons donc pas l'augmentation cumulative du courant par effet direct du champ comme interprétation de nos résultats. Quant au phénomène d'ionisation par collision, la formulation que nous en connaissons ne fait pas intervenir le temps de retard au claquage. Nous le retrouverons plus loin à propos des variations de E_c en fonction de l'épaisseur.

IV-1-2 Utilisation de la théorie thermique /30/

On sait qu'un claquage est dit "thermique" lorsqu'il est provoqué par l'effet cumulatif de l'augmentation de la conductivité de l'isolant et de

la température. C'est la valeur du champ appliqué qui permet d'amener la température du matériau jusqu'à sa valeur critique T_m qui est appelée champ de claquage. Son calcul est basé sur la résolution de l'équation fondamentale traduisant le bilan énergétique dans le milieu considéré, lorsqu'on suppose qu'il n'y a pas accumulation de charges, c'est à dire

$$\operatorname{div}(\sigma E) = 0$$

L'équation de base s'écrit alors :

$$\mu C_v \frac{\partial T}{\partial t} - \operatorname{div}(K \operatorname{grad} T) = \sigma E^2 \quad (30)$$

où μ représente la masse volumique du matériau,

C_v sa chaleur spécifique à volume constant,

T la température,

t le temps,

σ et K , respectivement, les conductivités électrique et thermique de l'isolant,

E le champ électrique appliqué.

Le second membre représente l'apport d'énergie d'origine électrique ; le terme $\mu C_v \frac{\partial T}{\partial t}$ du premier membre traduit l'accroissement d'énergie interne de l'échantillon et le deuxième, $-\operatorname{div}(K \operatorname{grad} T)$, correspond à la dissipation thermique.

Cette équation ne peut être résolue qu'à l'aide d'approximations et dans certains cas particuliers.

Compte tenu des durées relativement courtes des créneaux utilisés et bien qu'il s'agisse de couches minces, nous nous plaçons dans le cas d'un

régime adiabatique, c'est à dire que nous pouvons négliger le terme $-\text{div}(K \text{ grad } T)$ correspondant à la dissipation thermique de l'échantillon. L'équation (30) devient donc semblable à celle que l'on considère dans le cas des claquages par impulsion, c'est à dire :

$$\mu C_V \frac{dT}{dt} = \sigma E^2 \quad (31)$$

En utilisant une expression de la conductivité donnée par :

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left(\frac{-\phi}{kT} \right) \quad (32)$$

où σ_0 est une constante indépendante de la température T et ϕ une grandeur assimilable à une énergie d'activation, on peut écrire :

$$\mu C_V \frac{dT}{dt} = \sigma_0 \exp \left(\frac{-\phi}{kT} \right) \cdot E^2 \quad (33)$$

Comme nous appliquons un échelon de tension et que E est constant, les variables T et t sont séparées et l'intégration de l'équation précédente donne :

$$\int_{T_0}^{T_m} \exp \left(\frac{\phi}{kT} \right) dT = \frac{\sigma_0}{\mu C_V} E^2 \int_0^{t_r} dt \quad (34)$$

Les limites d'intégration du premier membre sont la température initiale T_0 de l'échantillon, c'est à dire la température ambiante, et T_m la valeur critique déterminant la rupture. Le second membre fait apparaître directement le temps t_r au bout duquel la température maximum dans l'échantillon atteint la valeur T_m , c'est à dire le temps de retard au

claquage sous le champ E.

L'intégrale du premier membre de cette équation n'est pas connue sous forme analytique. On adopte, en première approximation /30/, une solution de forme

$$- \frac{kT^2}{\phi} \cdot \exp \left(-\frac{\phi}{kT} \right)$$

qui se justifie tant que $kT \ll \phi$

L'équation (34) devient alors

$$\frac{kT^2}{\phi} \exp \left(-\frac{\phi}{kT} \right) \Bigg|_{T_m}^{T_0} = \frac{\sigma_0}{\mu C_V} E^2 t_r \quad (35)$$

Finalement, en prenant T_m très grand devant T_0 ($T_m > 10.T_0$), on obtient l'expression

$$t_r E^2 = \frac{\mu C_V}{\sigma_0} \cdot \frac{kT_0^2}{\phi} \exp \frac{\phi}{kT_0} \quad (36)$$

ou encore, le second membre étant constant :

$$t_r E^2 = K \quad (37)$$

En substituant les valeurs expérimentales de τ_m et t_w , respectivement, au temps de retard t_r de cette expression, nous avons porté dans le tableau ci-après le rapport des valeurs du produit $t_r \cdot E^2$ calculé pour les amplitudes extrêmes du champ appliqué.

| Matériau | SiO ₂ thermique | SiO ₂ CVD | SiO ₂ CVD | Al ₂ O ₃ |
|--|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| Temps de retard t _r | τ _m | τ _m | t _w | τ _m |
| Amplitudes extrêmes du champ E en MV/cm | 3,6 | 2,5 | 2,5 | 1,5 |
| | 5,25 | 4,75 | 4,75 | 3,25 |
| Rapport des valeurs de t _r E ² | 15 | 28 | 2,3 | 1,75 |

On voit donc que le produit $t_r \cdot E^2$ est loin d'être constant. Cela signifie que la relation (37) ne saurait convenir pour rendre compte de nos résultats, la formulation en $1/E^2$ du temps de retard n'arrivant pas à compenser la représentation en $1/(E-E_c)$ que nous avons trouvée en introduisant la notion de champ de rupture spécifique.

IV-2 INTERPRETATION DE LA VARIATION DU CHAMP DE RUPTURE SPECIFIQUE AVEC L'ÉPAISSEUR DE L'ÉCHANTILLON

Bien que ne disposant que d'un nombre limité d'échantillons, nous avons pu évaluer les variations $E_c(e)$ du champ de rupture spécifique en fonction de l'épaisseur du matériau pour de la silice obtenue par oxydation thermique du silicium. Les résultats ont été portés sur la figure III.27 du chapitre précédent.

Nous nous étions proposé de comparer ces variations à celles déduites des différentes théories dans l'expression desquelles apparaît l'épaisseur de l'échantillon. Ceci, afin de préciser l'intérêt de l'utilisation du champ de rupture spécifique, substitué à la rigidité

diélectrique pratique obtenue par la moyenne d'un certain nombre de mesures relevées en appliquant au matériau des rampes de tension.

Cependant, à l'égard du paramètre épaisseur, la plupart des théories ne permettent pas d'aboutir à des valeurs numériques, en raison du manque de données sur les grandeurs qui y interviennent et surtout de la forme implicite des équations. Nous avons pu cependant envisager la confrontation avec une explication particulière de chacune des théories électronique et thermique.

IV-2-1 Théorie électronique

Le modèle de KLEIN ne se référant pas directement à l'épaisseur de l'échantillon, seule la théorie de la rupture par avalanche peut être d'une utilisation simple.

Nous avons vu, au paragraphe IV-1-1-2 qu'une telle augmentation pouvait être due à l'effet du champ ou à l'ionisation par collision. C'est sur cette deuxième hypothèse qu'est fondé le modèle de FORLANI et MINNAJA /8/, cité par O'DWYER /30/, qui prend aussi en considération les effets de l'avalanche sur l'émission à la cathode. On trouve dans ce cas, "avec des valeurs raisonnables" pour les paramètres habituels : hauteurs de barrière, énergies d'ionisation, masses efficaces,, l'expression suivante du champ de claquage auquel nous substituons notre champ de rupture spécifique E_c ,

$$E_c \approx 0,03.e^{-1/2} \text{ MV/cm,} \quad (38)$$

expression dans laquelle l'épaisseur de l'échantillon e est exprimée en cm.

Sur la figure IV-4 nous avons porté les valeurs expérimentales de E_c en fonction de l'inverse de la racine carrée de e . Nous en avons déduit deux valeurs de la pente selon que l'on prend en compte la totalité des points expérimentaux ou que l'on élimine ceux qui correspondent aux épaisseurs les plus élevées ne traduisant pas la diminution bien connue du champ avec l'augmentation de l'épaisseur :

| Valeur théorique | Valeur expérimentale en tenant compte de l'ensemble des mesures | Valeur expérimentale en éliminant les mesures aux fortes épaisseurs |
|------------------|---|---|
| 0,03 | 0,013 | 0,022 |

Bien entendu, on ne peut pas attacher à la valeur théorique ci-dessus une signification absolue étant donné l'imprécision qui demeure sur les paramètres intervenant dans le calcul du coefficient numérique de l'équation (38). C'est pourquoi, nous avons tracé également la courbe $E_c(e)$ en échelles logarithmiques pour en mesurer la pente dont la valeur théorique, d'après (38), devrait être de $-1/2$.

Les résultats sont les suivants :

| Valeur théorique | Valeur expérimentale en tenant compte de l'ensemble des mesures | Valeur expérimentale en éliminant les mesures aux fortes épaisseurs |
|------------------|---|---|
| -0,5 | - 0,58 | - 1,0 |

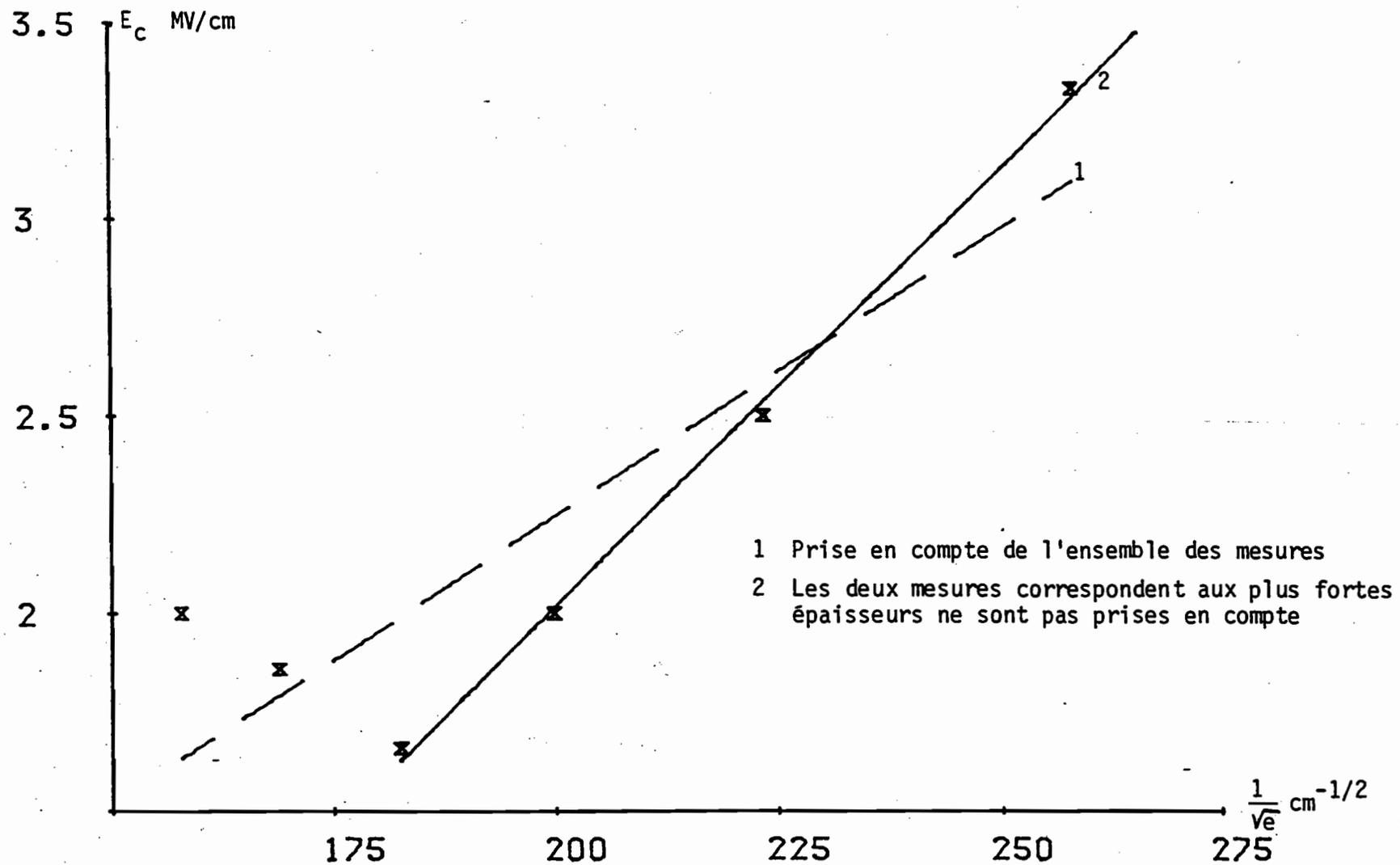


Figure IV.4. Variations à 20°C du champ de rupture spécifique de la silice thermique en fonction de l'inverse de la racine carrée de l'épaisseur de l'échantillon

On voit donc que l'épaisseur conduit plutôt à une loi en $1/e^n$ avec $0,05 < n < 1$ et qu'il conviendrait, pour conclure, d'augmenter le nombre de mesures à la fois vers les épaisseurs plus fortes et plus faibles.

IV-2-2 Théorie thermique

Une application de la théorie générale du claquage thermique aux films minces a été présentée en particulier par KLEIN et GAFNI /20/ qui supposent que la conductivité électrique dépend à la fois de la température T et du champ E , mais que ces deux variables sont séparables. Ils ont proposé comme expression de cette conductivité

$$\sigma = \sigma_0 \exp (aT + bE) \quad (39)$$

où σ_0 , a et b sont des constantes, caractéristiques du matériau, et ils ont trouvé pour le champ de rupture la relation :

$$E_c = \frac{1}{b} \operatorname{Log} \left(\frac{\lambda}{a \sigma_0 \epsilon e E_c^2} \right) - a T \quad (40)$$

où e représente toujours l'épaisseur de l'échantillon et ϵ sa permittivité.

Cette relation ne donne pas E_c de façon explicite, mais le champ de rupture pourrait être calculé par approximations successives. Nous supposons simplement que E_c^2 du second membre, placé sous le logarithme, est une constante.

La relation $E_c(e)$ s'écrit alors

$$E_c = \frac{1}{b} \operatorname{Log} \frac{1}{e} + c^{te} \quad (41)$$

Le tableau suivant permet la comparaison de la pente théorique tirée de /20/ ($b = 1,5$ pour la silice) et des valeurs déduites des courbes expérimentales qui font l'objet de la figure IV.6.

| Valeur théorique | Valeur expérimentale en tenant compte de l'ensemble des mesures | Valeur expérimentale en éliminant les mesures aux fortes épaisseurs |
|------------------|---|---|
| 0,66 | 1,44 | 2,43 |

Ici encore, comme au paragraphe précédent, les approximations inhérentes à la théorie et au choix des valeurs numériques ne permettent pas de porter un jugement définitif sur ce type d'interprétation, en tout cas de prendre parti en faveur de la théorie électronique ou de la théorie thermique.

Nous confirmons donc notre conclusion ci-dessus en suggérant d'élargir la gamme de mesures en fonction de l'épaisseur et d'appliquer la notion de champ de rupture spécifique à d'autres matériaux.

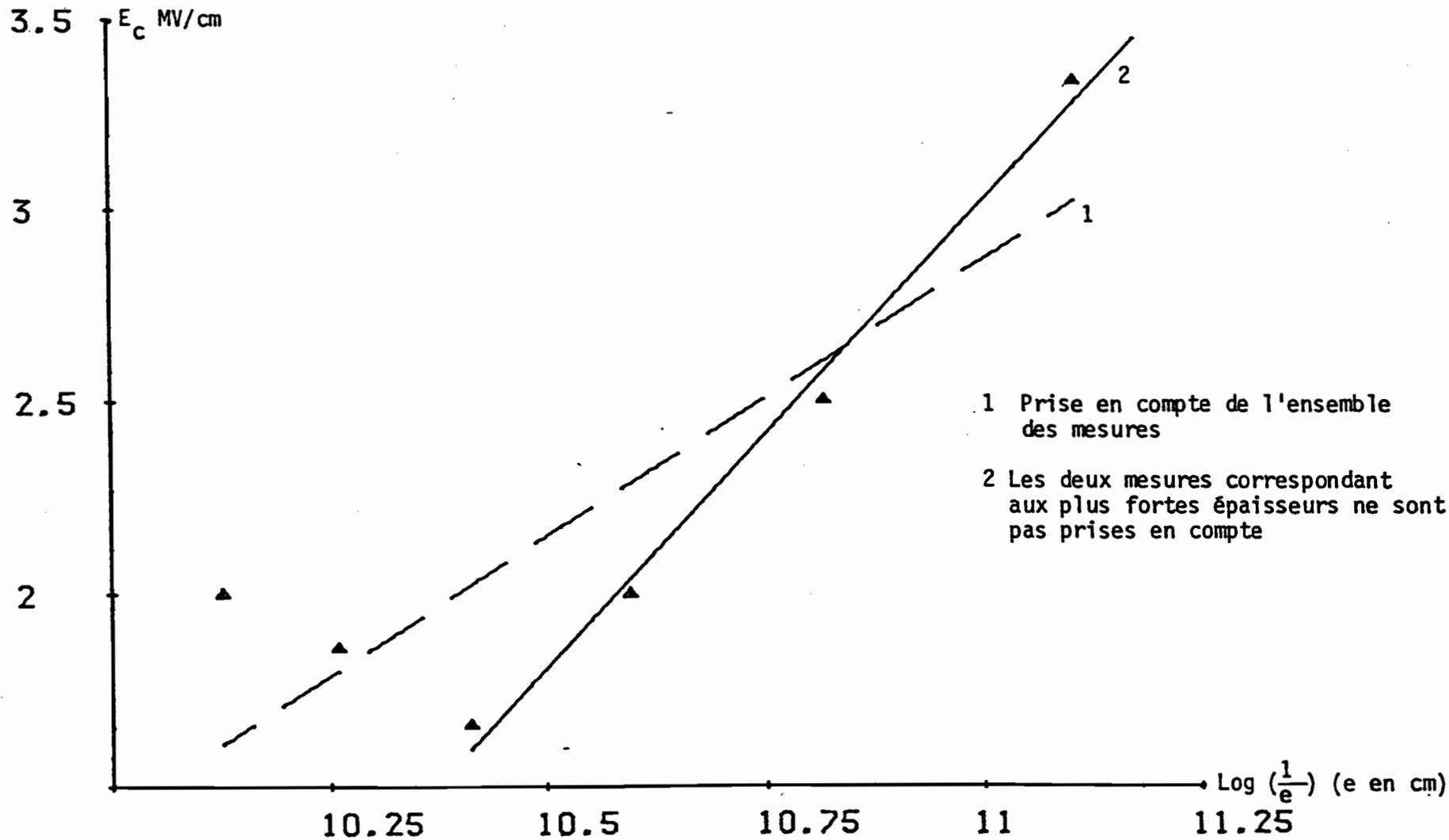


Figure IV.6. Variations à 20°C du champ de rupture spécifique de la silice thermique en fonction du logarithme de l'inverse de l'épaisseur de l'échantillon

CONCLUSION

CONCLUSION



CONCLUSION

Partant de l'hypothèse d'un "conditionnement" nécessaire pour l'apparition d'un claquage et de l'idée que la durée de sa mise en place pourrait être identifiée au temps de retard à la rupture, nous avons proposé une nouvelle manière d'aborder le problème de la tenue diélectrique des isolants solides. Pour cela, nous avons porté tous nos efforts sur la mise en évidence de la relation pouvant exister entre le temps de retard, déterminé statistiquement à partir d'un grand nombre de mesures, et l'amplitude du champ électrique.

Notre premier travail a été de concevoir et de réaliser un dispositif automatisé qui, appliquant à des échantillons autocicatrisables des contraintes programmées, recueille, puis traite les informations liées aux ruptures qui se manifestent sous forme d'impulsions de tension. En fait, ce sont deux appareils que nous avons mis au point : l'un travaille avec des rampes de tension et nous a servi à déterminer un ordre de grandeur des gradients disruptifs ; l'autre délivre des créneaux de tension, d'amplitude constante mais réglable, substitués à un échelon unique en raison de la capacité limitée de nos moyens informatiques. Les deux ensembles, munis de leurs logiciels et complétés par une imprimante et un traceur de courbes, sont opérationnels pour des expériences de longue haleine qui doivent faire suite à nos propres travaux.

Les échantillons de silice, thermique ou CVD, sur lesquels nous avons travaillé pour l'essentiel, étaient munis d'un anneau de garde reposant sur une surépaisseur du matériau afin d'éviter les claquages périphériques, hors de la partie où le champ est uniforme. Quant à l'alumine, la structure matricielle des électrodes nous plaçait, aux

points d'intersection, en champ relativement divergent. Dans l'un et l'autre cas, les épaisseurs dans la partie active étaient comprises entre 1000 et quelques milliers d'angströms. Des observations microscopiques et par analyse EDAX des dégradations subies par les électrodes supérieures ont confirmé, d'une part, la possibilité de réaliser plusieurs centaines de claquages sur un échantillon sans diminuer sa surface utile de plus de quelques centièmes et, d'autre part, le groupement des ruptures par paquets autour de sites aléatoires. Il serait peut être utile de voir, dans une étude ultérieure, si cette proximité ne s'accompagne pas d'une accélération de la cadence des claquages au sein de distributions plus étalées.

Parmi les nombreux paramètres que notre dispositif expérimental peut relever pour la caractérisation électrique des claquages répétitifs sous créneaux de tension, nous avons choisi les plus significatifs dont les exemples d'application donnés dans le mémoire appellent les remarques suivantes :

- L'évolution, avec le temps d'application de la contrainte, du nombre de claquages par créneau et, corrélativement, de la durée τ_{ji} qui sépare deux impulsions consécutives, s'opère dans des sens opposés, pour tous les matériaux étudiés, selon que l'électrode autocicatrisante est en chrome, et le régime s'accélère, ou qu'elle est en aluminium, et il se ralentit jusqu'à, parfois, disparition complète des ruptures lorsque le champ est assez faible. Nous n'avons pas pu donner, jusqu'à présent, d'explication à ce phénomène.

- Lorsqu'on repère un claquage, non plus par rapport à celui qui le précède immédiatement, mais par la durée totale t_{ji} pendant laquelle l'échantillon a été maintenu sous tension, on retrouve la même

différence de comportements.

- Les histogrammes des τ_{ji} se modifient très sensiblement avec le champ électrique : très plats lorsque ce dernier est faible et les ruptures peu nombreuses, ils se rassemblent autour d'un maximum très aigu pour les amplitudes les plus élevées de la contrainte. Il est donc préférable, lorsqu'on souhaite caractériser le "temps de conditionnement" sous un champ donné E, d'avoir recours à la valeur moyenne τ_m des τ_{ji} plutôt qu'à la valeur la plus probable.

- Ajoutons que, lorsqu'on se réfère aux durées totales t_{ji} , on peut également n'avoir recours qu'à un seul critère en prenant arbitrairement la durée t_w correspondant à la probabilité caractéristique de 63,2% dans la représentation de WEIBULL.

L'élément central de notre expérimentation consistait à étudier les variations de τ_m (E) et de t_w (E). C'est ce que nous avons pu réaliser, dans la limite des échantillons dont nous disposions, sur les trois matériaux : silice thermique, silice CVD, alumine, ce qui a permis d'éprouver les performances et la commodité d'emploi de l'appareillage et des méthodes de traitement de données. Il convient de souligner, étant donné l'évolution du régime des claquages avec le temps, l'importance qu'il y a à fixer le temps d'observation sur lequel se calculent les moyennes τ_m et t_w pour une amplitude donnée du champ. Nous l'avons choisi, pour ce qui nous concerne, autour de 5 ms (10 créneaux).

Au niveau de l'interprétation, nous avons passé en revue les théories électroniques et thermiques et parmi celles-ci, nous avons retenu, bien entendu, celles qui font apparaître un temps de retard au claquage. En raison des larges approximations qui sont faites et des

incertitudes sur les valeurs de certaines grandeurs qui entrent en jeu dans les formulations, il n'est pas question de comparer les valeurs absolues des résultats théoriques et expérimentaux, encore que les ordres de grandeurs soient respectés. Mais, en se référant à des représentations linéaires dans différents systèmes de coordonnées, les pentes sont comparables. De cette confrontation, il ressort que les phénomènes de rupture relèvent davantage d'une interprétation électronique, plus précisément de celle qui suppose une injection de porteurs d'origine thermoélectronique.

Pour notre part, nous sommes parti d'une hypothèse tout à fait différente, en posant qu'au dessous d'une certaine amplitude du champ, le conditionnement ne s'opérait plus ou, en l'exprimant autrement, le temps de conditionnement, c'est à dire le temps de retard, devenait infini. On admet donc que la courbe $\tau_m(E)$ ou $t_w(E)$, de type hyperbolique, comporte une asymptote verticale dont l'abscisse E_c peut être considérée comme caractéristique du matériau dans des conditions données : température, épaisseur, type d'électrode, etc... On écrit alors

$$\tau_m \text{ ou } t_w = \frac{a}{(E - E_c)^\alpha}$$

expression dont l'identification aux résultats expérimentaux donne a , et E_c .

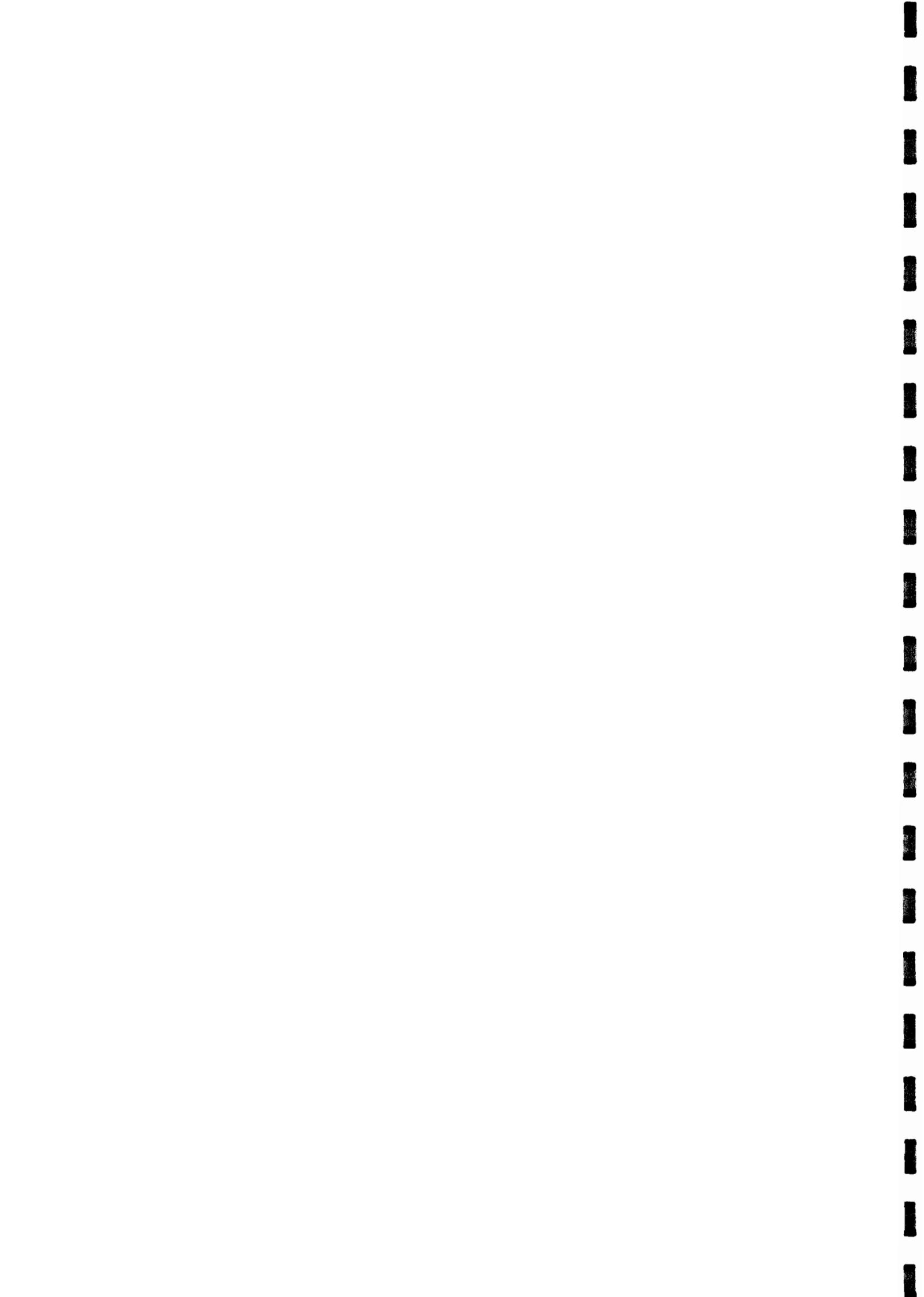
Nous proposons de désigner cette valeur E_c sous les termes de "champ de rupture spécifique".

Les essais de détermination que nous avons effectués sur l'ensemble des matériaux déjà cités se sont révélés très encourageants, et nous avons pu observer, en particulier, que la durée d'application du champ,

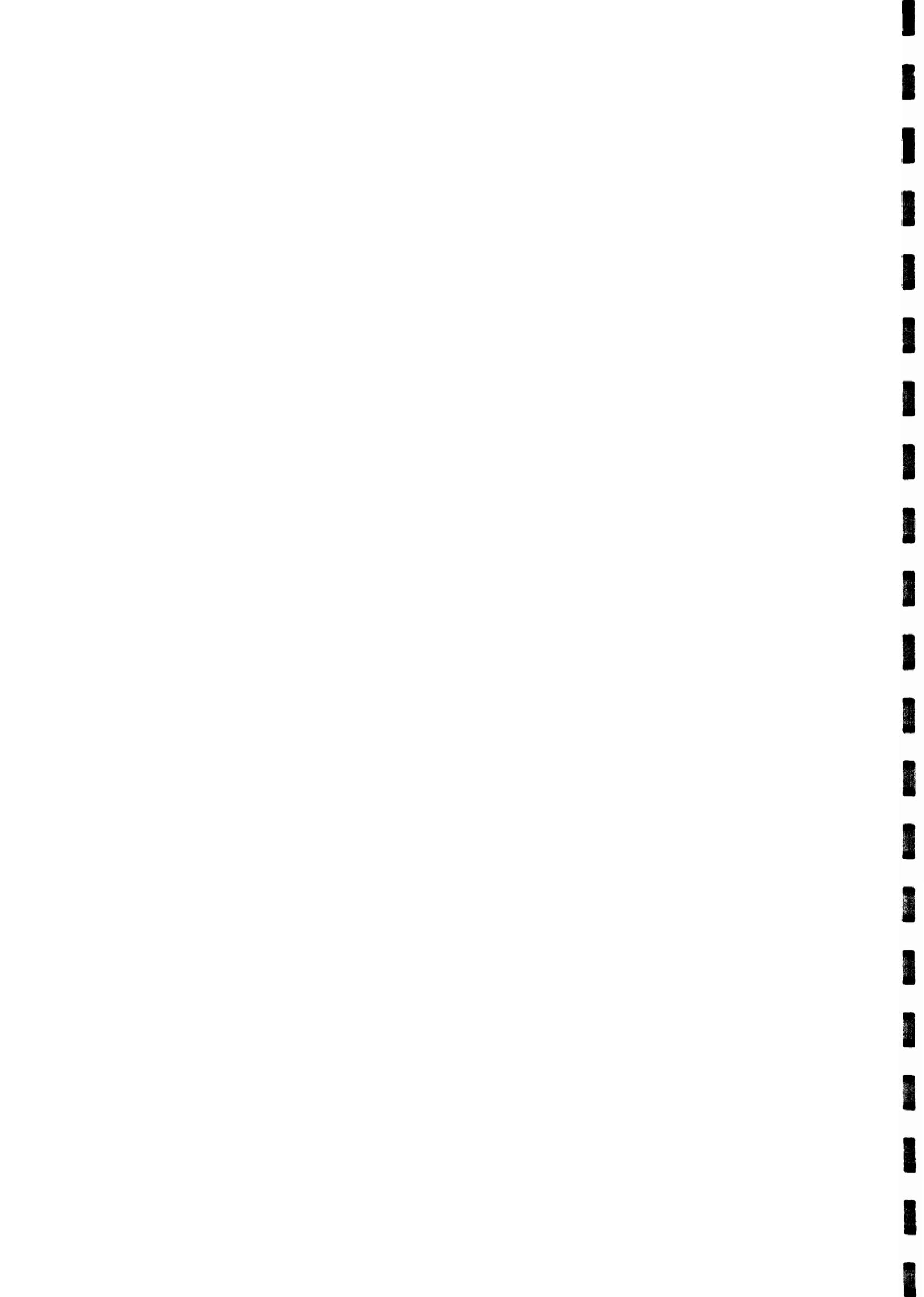
dans la limite de quelques millisecondes, n'avait pratiquement pas d'incidence sur la valeur de E_c . On note également que les grandeurs τ_m et t_w qui traduisent pourtant le conditionnement de façons très différentes conduisent à des résultats assez voisins.

Il convient évidemment de parfaire la méthode de calcul du champ de rupture spécifique à partir des valeurs expérimentales : nous nous sommes arrêté pour notre part à une première approximation sur E_c en partant d'une hyperbole équilatère, puis en retouchant l'exposant dont la valeur n'est d'ailleurs pas très éloignée de l'unité. Il sera également nécessaire, malgré ce qui vient d'être dit, d'étudier de plus près l'incidence de la durée d'observation des claquages sur laquelle se calculent τ_m et t_w . Il faudra enfin étendre les expériences à des familles de matériaux très différentes placées dans les conditions les plus diverses.

Il nous semble cependant que, dès à présent, notre critère puisse se substituer avec avantage aux moyennes, utilisées jusqu'à ce jour, de champs de ruptures obtenus par applications répétées de rampes de tension. Cette notion nouvelle doit en effet trouver sa place dans la recherche des processus fondamentaux responsables des claquages, en aidant à préciser notamment l'incidence des paramètres géométriques et physiques caractérisant l'échantillon et son environnement. C'est ce que nous avons tenté de faire, bien que de façon incomplète, en étudiant les variations de E_c avec l'épaisseur du diélectrique. Sur le plan pratique, ce critère peut également permettre de comparer la tenue de matériaux en couches minces en vue d'une application donnée et nous pensons, en particulier, aux composants et à la microélectronique : structures MIS, circuits intégrés, écrans de visualiaation...



BIBLIOGRAPHIE



BIBLIOGRAPHIE

- 1 V.K. ARGAWAL
Breakdown and conduction in thin dielectric films : a bibliographical survey. Thin Solid Films 24, 55-70, 1974
- 2 J.C. ASSELINO
Doctorat de 3^{ème} Cycle, TOULOUSE, N° 2752, 1982
"Structures MIS sur phosphore d'indium réalisées par dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma".
- 3 C. BAGNOL
Doctorat de 3^{ème} Cycle, TOULOUSE, N° 2126, 1978
"Contribution à l'étude de la rupture diélectrique dans les films minces de polystyrène obtenus par décharge lumineuse dans les vapeurs de styrène".
- 4 A.K. JONSCHER et R. LACOSTE
Communication personnelle
- 5 P.P. BUDENSTEIN
On the mechanism of dielectric breakdown of solids.
IEEE Trans. Elect. Ins., Vol. EI-15 N°3, 1980
- 6 P.P. BUDENSTEIN
Dielectric breakdown. Rapport NASA
Rpt N° RG 75-25, 1974
- 7 H. CARCHAND
Doctorat es-sciences, TOULOUSE, N° 544, 1973
"Elaboration, caractérisation et applications des couches minces obtenues par décharge dans les vapeurs de styrène".
- 8 F. FORLANI and N. MINNAJA
Thickness influence of breakdown phenomena of thin dielectric films. Phys. Status Solidi, 4, 311, 1964
- 9 W. FRANTZ
Dielektrischer durchschlag
Handbuch der physic, Vol 17, Springer Verlag, 1956
- 10 H. FROLICH
Dielectric breakdown in solids
Proc. Roy. Soc. LONDON, B69, 21, 1956
- 11 Eli HARARI
Dielectric breakdown in electrically stressed thin films of thermal SiO₂. J.A.Phys., 49 (4), pp2478-2489, 1978
- 12 H. HAUT
Mathématiques et statistiques. Ed. du PSI, 1981
- 13 Masayuki HIKITA
A dissertation for the degree of doctor of engineering,
"Thermal breakdown process in polymeric insulating materials".
NAGOYA University, 1982

- 14 Yoshio INUISHI
High field conduction and breakdown in solid dielectrics.
IEEE Trans. Elec. Ins., Vol EI-15 N°3 139-151, 1980
- 15 N. KLEIN
Electrical breakdown in solids, Advances in electronics and
electron physics. 26, pp 309-424, 1969
- 16 N. KLEIN
A theory of localized electronic breakdown in insulating films.
Advances in physics, 21, 92 p.605, 1972
- 17 N. KLEIN, E. BURSTEIN
Electrical pulse breakdown of silicon oxide films
J.A.P. Vol. 40 N°7, 1969
- 18 N. KLEIN
Mechanisms of electrical breakdown in thin insulators. An
open subject. Thin Solid Films, 100, 335-340, 1983
- 19 N. KLEIN
The mechanism of self-healing electrical breakdown in MOS
structures. IEEE Trans. Elec. Dev., vol. ED-13 N°11, 1966
- 20 N. KLEIN, H. GAFNI
The maximum dielectric strength of thin silicon oxide films.
IEEE Trans. Elec. Dev. Vol ED-13 N°12, 1966
- 21 N. KLEIN
A theory of localized electronic breakdown in insulating films.
Advances in physics, 21, 92p. 605, 1972
- 22 Richard M. KLEIN
Mathematical analysis of thermal breakdown in dielectrics.
Ceramic Bull. Vol.49, N°6, 1970
- 23 V.F. KORZO
Disruption of the stationary state and electrical breakdown
in amorphous dielectrics :I Covalent dielectrics
II Ionic dielectrics. Thin Solid Films 38, 225-246, 1976
- 24 R. LACOSTE, A. MUHAMMAD, Y. SEGUI, L. VOUMBO MATOUMONA
Determination of a specific value for the dielectric breakdown
of thin insulating layers. pp317-321
First International Conference on Conduction and Breakdown in
Solid Dielectrics, TOULOUSE, 1983
- 25 A. LESEA, R. ZAKS
Technique d'interface, Sybex, 1979
- 26 J. MASERJIAN, N. ZAMANI
Behavior of the Si-SiO₂ interface observed by Fowler-Nordheim
tunneling. J.A.P. 53(1) 559-567, 1982
- 27 L.S. MILLER et al
Breakdown in point-contacted silicon oxide films
Thin Solid Films 45, 11-14, 1977

- 28 A. MURRAY, LAMPERT et Al.
Study of electronic transport and breakdown in thin insulating films. Princetown University, 1973
Defense advanced research projects agency Rpt N°26
- 29 A. N'DIAYE
Doctorat de 3^{ème} Cycle, TOULOUSE, N° 2759, 1983
"Etude du phénomène de rupture diélectrique dans les films minces de polystyrène sous l'effet de fortes pressions hydrostatiques".
- 30 J.J. O'DWYER
The theory of electrical conduction and breakdown in solid dielectrics. Clarendon Press, OXFORD, 1973
- 31 C.M. OSBURN, D.W. ORMOND
Dielectric breakdown in SiO₂ films on silicon :
I -Measurement and interpretation
II-Influence of processing and materials.
J. Electrochem. Soc., 119, 591, 1972
- 32 C.M. OSBURN, E.J. WEITZMAN
Electrical conduction and dielectric breakdown in SiO₂ films on silicon. J. Electrochem. Soc., 119, 603, 1972
- 33 Hani Fikri RAGAIE
Doctorat es-sciences, GRENOBLE, 1980
"Diffusion à basse température d'impuretés métalliques dans des couches de SiO₂ sur silicium".
- 34 S.I. RAIDER
Time dependent breakdown of silicon dioxide films.
Appl. Phys. Lett., vol.23 N°1, 1973
- 35 B.K. RIDLEY
Mechanism of electrical breakdown in SiO₂ films.
J.A.Phys. Vol 46, N° 3, pp 998-1007, 1975²
- 36 S. SAPIEHA, M.R. WERTHEIMER, A. YELON
A simple method for breakdown voltage measurements in thin films.
IEEE Trans. Elec. Ins. Vol EI-14, N° 4, pp 229-230, 1979
- 37 Y. SEGUI
Doctorat de 3^{ème} Cycle, TOULOUSE, N° 1357, 1973
"Mise en évidence, caractérisation et application d'un effet de commutation bistable sur des couches minces obtenues par décharge dans les vapeurs de styrène".
- 38 F. SEITZ
On the theory of electron multiplication in crystals
Phys. Rev., Vol 7, pp 1376-1393, 1949
- 39 J. SIMONNE
Doctorat es-sciences, TOULOUSE, N° 552, 1973
"Propriétés physiques des interfaces Si-SiO₂ sous l'action de contraintes électriques".

- 40 P. SOLOMON
Breakdown in silicon oxide. A review
J. Vac. Sci. Technol., Vol.14, N°5, 1977
- 41 M. SPARKS et al
Theory of electron-avalanche breakdown in solids.
Phys. Rev. B Vol.24, N°6, 1981
- 42 R. STRATTON
The theory of dielectric breakdown in solids.
Progr. Dielectrics, 3, 235, 1961
- 43 S.M. SZE
Physics of semiconductor devices.
John Wiley & Sons, Inc., NEW YORK, 1981
- 44 A.R. Von HIPPEL
Ergeb. Exak. Naturw. 14, 79, 1935
- 45 L. VOUMBO MATOUMONA
Rapport DEA, TOULOUSE 1981
"Etude de la rupture diélectrique des isolants inorganiques"
- 46 W. WEIBULL
J.A.Mech., 18, pp293-297, 1951
- 47 S. WHITEHEAD
Dielectric breakdown of solids. OXFORD Univ. Press, LONDON, 1953
- 48 C. ZENER
Proc. Roy. Soc., LONDON, A145, 523, 1934
- 49 G.A. BARAFF
Phys. Rev., 128, 1507, 1962
- 50 D.J. DiMARIA
J. Appl. Phys., Vol.45, No.12, 1974

ANNEXES



ANNEXE 1

```

10 CLEAR
20 DIM V(500),T(500),P(200)
30 DIM E#E20J
40 T1=0 @ V1=0
50 OUTPUT 710 USING "K" ; 2000
60 DISP "TENSION MAX="
70 INPUT V
80 DISP "INCREMENTATION="
90 INPUT N
100 DISP "NOMBRE D'ESSAIS="
110 INPUT E
120 DISP "ECHANTILLON:" @ INPUT E#
130 PRINT @ PRINT
140 PRINT "### ",E#," ###"
150 PRINT @ PRINT
160 PRINT "TENSION MAX= ",V
170 V2=V
180 PRINT "INCREMENT = ",N
190 PRINT @ PRINT
200 CLEAR
210 DISP "*****"
220 DISP "*****"
230 DISP "##"
240 DISP "##"
250 DISP "## NE PAS ARRETER S.V.P"
260 DISP "##"
270 DISP "##"
280 DISP "## MANIP EN COURS"
290 DISP "##"
300 DISP "##"
310 DISP "*****"
320 DISP "*****"
330 N=INT(N#1000/340)
340 V=CEIL(1999-V#1000/340)
350 OUTPUT 700 ; "F100M1V0"
360 FOR J=1 TO E
370 D0=TIME
380 FOR I=2000 TO V STEP N
390 OUTPUT 710 USING "K" ; I
400 NEXT I
410 D1=TIME
420 T=D1-D0
430 OUTPUT 700 ; "M4"
440 ENTER 700 ; V(J)
450 T(J)=V(J)#T/V2
460 OUTPUT 700 ; "M1"
470 T1=T1+T(J) @ V1=V1+V(J)
480 OUTPUT 710 USING "K" ; 2000
490 WAIT 3000
500 IF V2<=80 THEN 520
510 WAIT 3000
520 NEXT J
530 T1=T1-(T(1)+T(2)) @ V1=V1-(V(1)+V(2))

```

```

540 T1=T1/(E-2) @ V1=V1/(E-2)
550 PRINT USING 560
560 IMAGE 10X,"ESSAI",2X,"TENSION",3X,"DUREE"
570 IMAGE 11X,3D,2X,3D,DDD,2X,3D,DD
580 IMAGE "MOYENNE SUR",3D,2X,3D,DDD,2X,3D,DD
590 FOR I=1 TO E
600 PRINT USING 570 ; I,V(I),T(I)
610 NEXT I
620 PRINT "-----"
630 PRINT USING 580 ; E,V1,T1
640 PRINT "VITESSE= ",INT(V2/T1),"Volts/sec"
650 GCLEAR
660 SCALE 0,E,0,V2
670 YAXIS 0,5
680 YAXIS 0,50
690 FOR I=1 TO E
700 PENUP @ MOVE I,V(I)
710 PENUP @ LABEL ","
720 NEXT I
730 PRINT @ PRINT
740 COPY
750 REM CLASSEMENT
760 N=E @ M=N
770 FOR L=INT(N/2) TO 1 STEP -1
780 W=V(L) @ GOSUB 1100
790 NEXT L @ L=1
800 FOR M=N-1 TO 1 STEP -1
810 W=V(M+1) @ V(M+1)=V(L) @ GOSUB 1100
820 NEXT M
830 REM HISTO CLASSE DE 2V
840 REM --> Pour 2000 A a 0,1MV/cm
850 X=0 @ P=0
860 A1=2
870 FOR I=1 TO N
880 IF V(I)>=A1 THEN 920
890 P=P+1
900 NEXT I
910 GOTO 970
920 A1=A1+2
930 X=X+1
940 P(X)=P
950 P=0
960 GOTO 880
970 X=X+1
980 P(X)=P
990 IMAGE 4X,"CLASSE",4X,"NOMBRE"
1000 IMAGE 3X,3D,1A,3D,6X,4D
1010 PRINT
1020 PRINT
1030 PRINT USING 990

```

```

1040 FOR I=1 TO X
1050 IF P(I)>=0 THEN 1070
1060 PRINT USING 1000 ; (I-1)*2, "-", I*2, P(I)
1070 NEXT I
1080 GOSUB 1360
1090 GOTO 1180
1100 P=L
1110 J=P+P
1120 IF J>M THEN 1170
1130 IF J=M THEN 1150
1140 IF V(J+1)>>V(J) THEN J=J+1
1150 IF W>=V(J) THEN 1170
1160 V(P)=V(J) @ P=J @ GOTO 1110
1170 V(P)=W @ RETURN
1180 DISP LGT(V(I)),LGT(V(N))
1190 DISP "V1,V2,G1"
1200 INPUT V1,V2,G1
1210 DISP LGT(-LOG(1-1/(N+1))),LGT(-LOG(1-N/(N+1)))
1220 DISP "P1,P2,G2"
1230 INPUT P1,P2,G2
1240 GCLEAR
1250 SCALE V1,V2,P1,P2
1260 XAXIS P1,G1
1270 YAXIS V1,G2
1280 FOR I=1 TO N-1
1290 GOTO 1340
1300 NEXT I
1310 PRINT @ PRINT @ COPY
1320 PRINT V1,V2,G1 @ PRINT P1,P2,G2
1330 END
1340 MOVE LGT(V(I)),LGT(-LOG(1-1/(N+1)))
1350 PLOT LGT(V(I)),LGT(-LOG(1-1/(N+1)))
1360 PENUP
1370 GOTO 1300
1380 DISP "PMIN,MAX,G2" @ INPUT P1,P2,G2
1390 DISP "CLASSE MIN,MAX,G1" @ INPUT V1,V2,G1
1400 GCLEAR
1410 SCALE V1,V2,P1,P2
1420 XAXIS P1,G1 @ YAXIS V1,G2
1430 MOVE V1,P1
1440 FOR I=V1+2 TO V2 STEP 2
1450 DRAW I-2,P(I/2)
1460 DRAW I,P(I/2)
1470 NEXT I
1480 PRINT @ PRINT
1490 PRINT "V1=";V1,"V2=";V2
1500 PRINT "P1=";P1,"P2=";P2
1510 PRINT
1520 COPY
1530 RETURN
818

```

ANNEXE 2

```

5 REM #####
10 REM # BEETHOVEN #
11 REM # INITIALISATIONS #
12 REM #####
20 SPEED= 255
30 CALL - 936
40 INPUT "DATE" : "DAS
50 PRINT
60 INPUT "ECHANTILLON" : "E1$
70 PRINT
80 INPUT "EPAISSEUR" : "E
90 PRINT
100 INPUT "TENSION" : "V
110 PRINT
120 INPUT "HORLOGE" : "H
130 PRINT
140 INPUT "DUREE ENTRE 2 CRENEAUX(MN,SE):" : "M,S
150 PRINT
160 INPUT "DUREE DU CRENEAU" : "D
180 PRINT
190 INPUT "DUREE MAXIMUM DU CLAQUAGE" : "T
200 PRINT
210 INPUT "NOMBRE DE CRENEAUX" : "C
230 D$ = CHR$(4)
236 REM FICHER DONNEES
237 REM =====
240 PRINT D$:"OPEN BEETHOVEN TAMPON"
250 PRINT D$:"WRITE BEETHOVEN TAMPON"
260 PRINT M: PRINT S: PRINT D: PRINT C: PRINT H: PRINT T
270 PRINT D$: PRINT E1$: PRINT V: PRINT E
280 PRINT D$:"CLOSE BEETHOVEN TAMPON"
290 REM MOZART:MANIPULATION
295 REM =====
300 PRINT D$:"RUN MOZART"

```

```

10 REM #####
11 REM # MOZART #
12 REM # MANIPULATION #
13 REM #####
15 OHERR GOTO 370
20 CALL - 936
30 D$ = CHR$(4):Z$ = CHR$(26)
40 BS = 4096 / 12 + 16 * 13:CR = BS:C4 = BS + 1:U1 = BS + 2
43 T1 = BS + 3:U2 = BS + 4:T2 = BS + 5:U3 = BS + 6:T3 = BS + 7
45 REM LECTURE DONNEES
46 REM =====
50 PRINT D$:"OPEN BEETHOVEN TAMPON"
60 PRINT D$:"READ BEETHOVEN TAMPON"
70 INPUT M: INPUT S: INPUT D: INPUT C: INPUT H
80 PRINT D$:"CLOSE BEETHOVEN TAMPON"
85 D = INT ((D / H) * 32 / 1024 + 1)
90 N = (D + 1) * C:C = C - 1
100 DIM Y$(N + 10)
110 CALL - 936
120 VTAB 10: INVERSE
130 PRINT "
140 PRINT "M A N I P EN COURS " : PRINT "
145 NORMAL
146 REM COMMANDE ANALYSEUR
147 REM =====
150 PRINT D$:"PR#3"
160 PRINT D$:"IN#3"
170 PRINT "RA"
180 PRINT "LL"
185 PRINT "WT$": CHR$(97):Z$:"S0,C0,T0,W1"
190 FOR I = 0 TO C
200 PRINT "WT$": CHR$(97):Z$:"M"
210 FOR K = 1 TO 125: NEXT K
215 REM IMPULSION
216 REM =====
220 IM = PEEK (- 16320)
230 FOR J = 1 TO D + 1: PRINT "R" : "D": CHR$(97):Z$
235 INPUT Y$(I * (D + 1) + J): NEXT J
236 REM ATTENTE
237 REM =====
240 IF N = 0 AND S = 0 THEN 280
250 POKE C4,1: POKE CR,1: POKE C4,0: POKE CR,130: POKE U3,19
255 POKE T3,213: POKE C4,1: POKE CR,149
260 POKE C4,149: POKE U1,99: POKE T1,99: POKE U2,59
265 POKE T2,99: POKE CR,148
270 MN = (99 - PEEK (U1)) * 100 + 99 - PEEK (T1)
275 SE = 59 - PEEK (U2): IF MH < > M OR SE < > S THEN 270
280 NEXT I
285 REM FICHER RESULTAT BRUT
286 REM =====
290 PRINT D$:"PR#0"
300 PRINT D$:"IN#3"
310 PRINT D$:"OPEN MOZART TAMPON"
320 PRINT D$:"WRITE MOZART TAMPON"
330 FOR I = 1 TO N
340 PRINT Y$(I): NEXT I
350 PRINT D$:"CLOSE MOZART TAMPON"
355 PRINT D$:"RUN VIVALDI"
370 PRINT D$:"RUN"

```

```

10 REM #####
11 REM # VIVALDI #
12 REM # TRAITEMENT #
13 REM #####
20 CALL - 936:H1$ = CHR$(14):H2$ = CHR$(15)
30 D$ = CHR$(4)
40 DEF FN ACX) = X + 10 * (1 - X / 10 + INT(X / 10))
45 REM LECTURE DONNEES
46 REM =====
50 PRINT D$:"OPEN BEETHOVEN TAMPON"
60 PRINT D$:"READ BEETHOVEN TAMPON"
70 FOR I = 1 TO 3: INPUT D: NEXT I
80 INPUT C: INPUT PH: INPUT T0
90 INPUT K$: INPUT N$
100 INPUT V: INPUT EP
110 PRINT D$:"CLOSE BEETHOVEN TAMPON"
120 H1 = D
130 D = INT((D / PH) * 32 / 1024 + 1)
140 DIM Y$(D),C(25),B(500),P(H1),N(C),TM(C),T2(C),B1(500)
150 DIM AAC(3,3),BBK(3),PC(3),PL(3),CS(3),X(C),Y(C)
160 VTAB 10: INVERSE
170 PRINT "
180 PRINT " TRAVAIL EN COURS " : PRINT "
185 NORMAL
186 REM LECTURE RESULTAT BRUT
187 REM =====
190 PRINT D$:"OPEN MOZART TAMPON"
200 PRINT D$:"READ MOZART TAMPON"
210 FOR C2 = 1 TO C
220 FOR I = 0 TO D: INPUT Y$(I): NEXT I
225 REM TRAITEMENT
226 REM =====
230 P = 0
240 FOR H = 1 TO D: FOR J = 2 TO 64 STEP 2: IF J = 64 THEN 270
250 IF MID$(Y$(H),J,1) < > MID$(Y$(H),J + 2,1) THEN 320
260 P = P + 1: GOTO 390
270 IF H = D THEN 390
280 IF MID$(Y$(H),64,1) < > MID$(Y$(H + 1),2,1) THEN 300
290 GOTO 260
300 IF MID$(Y$(H + 1),2,1) = "0" THEN 360
310 GOTO 330
320 IF MID$(Y$(H),J + 2,1) = "0" THEN 360
330 IF (PH = .5 AND (P + 1) = 1) THEN 360
340 N = N + 1: B(N) = PH * (P + 1) + DT: T = T + B(N): B1(N) = T
345 IF N = 500 THEN 460
350 GOTO 360
360 DT = (P + 1) * PH: IF DT < T0 THEN 360
370 K = K + 1: C(K) = DT
380 P = 0
390 NEXT J: H: DT = 0
400 FOR C1 = N1 + 1 TO N: TM = TM + B(C1): NEXT C1
410 IF (N - N1) = 0 THEN 455
420 TM(C2) = TM / (N - N1): N(C2) = N - N1
430 FOR I = 1 TO C2: T2(C2) = N(I) * TM(I) + T2(C2): NEXT I
440 IF N = 0 THEN T2(C2) = 0: GOTO 460
450 T2(C2) = T2(C2) / N: GOTO 460

```

```

455 TM(C2) = 0: N(C2) = 0: T2(C2) = T2(C2 - 1)
460 N1 = N: TM = 0: T = T + C2 * H1: IF N = 500 THEN 480
470 NEXT C2
480 PRINT D$:"CLOSE MOZART TAMPON"
490 IF N = 0 THEN 2540
495 REM RESULTAT FINAL
496 REM =====
500 PRINT D$:"OPEN":N$
510 PRINT D$:"WRITE":N$
520 PRINT N: PRINT C: FOR I = 1 TO N: PRINT B1(I): NEXT I
530 FOR I = 1 TO N: PRINT B(I): NEXT I
540 FOR I = 1 TO C: PRINT N(I): NEXT I
550 PRINT D$:"CLOSE"
555 REM IMPRIMANTE
556 REM =====
560 PR# 2
570 PRINT CHR$(9),"60N"
580 PRINT H1$
590 PRINT "TOULOUSE LE " : K$
600 PRINT "ECHANTILLON *** " : N$) " ***"
610 PRINT "NOMBRE DE CLAQUAGES=" : N
620 PRINT "NOMBRE DE CRENEAUX=" : C
630 PRINT "TEMPS MOYEN=" : INT(T2(C) * 100) / 100:"MICROSECONDES"
640 PRINT "TENSION = " : V: " VOLTS"
650 PRINT "EPAISSEUR = " : EP: " A"
660 PRINT : PRINT "DUREE DES CLAQUAGES"
670 PRINT H2$
680 J = 1
690 FOR I = 1 TO N
700 POKE 36,J: PRINT B(I): J = J + 8
705 IF J > = 80 THEN PRINT : J = 1
710 NEXT I
720 PRINT H1$
730 PRINT : PRINT "NOMBRE DE CLAQUAGES PAR CRENEAU"
740 PRINT H2$
750 J = 1
760 FOR I = 1 TO C
770 POKE 36,J: PRINT N(I): J = J + 8
775 IF J > = 80 THEN PRINT : J = 1
780 NEXT I
790 IF K = 0 THEN 850
800 PRINT H1$
810 PRINT : PRINT "COURT CIRCUIT": J = 1
820 PRINT H2$
830 FOR I = 1 TO K: POKE 36,J: PRINT C(I): J = J + 8
835 IF J > = 80 THEN PRINT : J = 1
840 NEXT I
850 PRINT H1$
860 PRINT : PRINT "TEMPS MOYEN PAR CRENEAU"
870 PRINT H2$
880 J = 1
890 FOR I = 1 TO C
900 POKE 36,J: PRINT INT(TM(I) * 1000) / 1000: J = J + 10
905 IF J > = 80 THEN PRINT : J = 1
910 NEXT I
920 PRINT H1$

```

```

930 PRINT : PRINT "TEMPS MOYEN CUMULE PAR CRENEAU"
940 PRINT H2#
950 J = 1
960 FOR I = 1 TO C
970 POKE 36,J: PRINT INT (T2(I) * 1000) / 1000: J = J + 10
975 IF J > = 80 THEN PRINT : J = 1
980 NEXT I
990 PRINT H1#
1000 PRINT : PRINT "DUREE CUMULEE": U = 1
1010 PRINT H2#
1020 FOR I = 1 TO N
1030 POKE 36,U: PRINT B1(I): U = U + 10
1035 IF U > = 80 THEN PRINT : U = 1
1040 NEXT I
1045 REM TABLE TRACANTE
1046 REM =====
1050 PR# 0
1060 CALL - 936
1070 CALL - 1052: CALL - 1052: CALL - 1052
1080 PRINT "TRACE DES COURBES O/N?": GET R#
1090 IF R# = "N" THEN 2540
1100 IF R# < > "O" THEN 1080
1110 CALL - 936
1120 VTAB 10: INVERSE
1130 PRINT " "
1140 PRINT " TRACE DES COURBES "
1150 PRINT " "
1160 NORMAL
1170 PR# 1
1180 PRINT "S3"
1190 PRINT "Q0"
1200 XS = B1(N) / 100
1210 IF XS / 10 < > INT (XS / 10) THEN XS = FN R(XS)
1220 X# = "DC/100"
1230 YS = N
1240 Y# = "N" + CHR# (111)
1250 GOSUB 2610
1260 FOR I = 1 TO N
1270 X(Z) = B1(I) / 100
1280 Y(Z) = I
1290 BA = INT (B1(I) * 03 / (100 * XS)) + 01
1295 BB = INT (I * 04 / YS) + 02
1300 PRINT "M"BA", "BB
1310 PRINT "N1"
1320 PRINT "M"BA", "BB
1330 NEXT I
1340 YS = N(I)
1350 FOR I = 2 TO C
1360 IF YS < N(I) THEN YS = N(I)
1370 NEXT I
1380 Y# = "N"
1390 XS = C
1400 X# = "C"
1410 GOSUB 2610
1420 FOR I = 1 TO C
1430 BA = INT (I * 03 / XS) + 01: BB = INT (N(I) * 04 / YS) + 02

```

```

1440 PRINT "M"BA", "BB
1450 PRINT "N4"
1460 PRINT "M"BA", "BB
1470 NEXT I
1480 GOSUB 4050
1490 YS = TM(I)
1500 FOR I = 2 TO C
1510 IF YS < TM(I) THEN YS = TM(I)
1520 NEXT I
1530 YS = YS / 10
1540 Y# = "TM/10"
1550 XS = C
1560 X# = "C"
1570 GOSUB 2610
1580 FOR I = 1 TO C
1590 BA = INT (I * 03 / XS) + 01
1600 BB = INT (TM(I) * 04 / (10 * YS)) + 02
1610 PRINT "M"BA", "BB
1620 PRINT "N4"
1630 PRINT "M"BA", "BB
1640 NEXT I
1650 YS = T2(1)
1660 FOR I = 2 TO C
1670 IF YS < T2(I) THEN YS = T2(I)
1680 NEXT I
1690 YS = YS / 10
1700 Y# = "TMC/10"
1710 XS = C
1720 X# = "CR"
1730 GOSUB 2610
1740 FOR I = 1 TO C
1750 BB = INT (T2(I) * 04 / (10 * YS)) + 02
1760 BA = INT (I * 03 / XS) + 01
1770 PRINT "M"BA", "BB
1780 PRINT "N4"
1795 PRINT "M"BA", "BB
1790 NEXT I
1800 GOSUB 3140
1805 REM HISTOGRAMME
1806 REM =====
1810 M = N
1820 FOR L = INT (N / 2) TO 1 STEP - 1
1830 W = B(L): GOSUB 3060
1840 NEXT L: L = 1
1850 FOR M = N - 1 TO 1 STEP - 1
1860 W = B(M + 1) * B(M + 1) = B(1): GOSUB 3060
1870 NEXT M
1880 FOR G = 1 TO 2
1890 X = 0: P = 0
1900 A1 = G
1910 FOR I = 1 TO N
1920 IF B(I) > = A1 THEN 1960
1930 P = P + 1
1940 NEXT I
1950 GOTO 2010
1960 A1 = A1 + G

```

```

1970 X = X + 1
1980 P(X) = P
1990 P = 0
2000 GOTO 1020
2010 X = X + 1
2020 P(X) = P
2030 A1 = G
2040 PR# 2
2050 PRINT CHR#(9); "80N"
2060 PRINT H1$
2070 PRINT "CLASSE          NOMERE          "
2080 PRINT H2$
2090 J = 1: PRINT
2100 FOR I = 1 TO X
2110 IF P(I) = 0 THEN 2140
2120 POKE 36, J: PRINT (I - 1) * A1; "-" ; I * A1; J = J + 17
2130 POKE 35, J: PRINT P(I); J = J + 9
2135 IF J >= 70 THEN PRINT J = 1
2140 NEXT I: PRINT
2150 IF G < > 1 THEN 2360
2160 Y# = "NC"
2170 X# = "T"
2180 FOR I = 1 TO X
2190 IF P(I) = 0 THEN 2220
2200 X0 = 10 * INT(I / 10)
2210 I = X
2220 NEXT I
2230 X# = X0 + 100
2240 Y# = P(X0)
2250 FOR I = X0 + 1 TO X#
2260 IF Y# < P(I) THEN Y# = P(I)
2270 NEXT I
2280 PR# 1
2290 GOSUB 2610
2300 FOR I = X0 + 1 TO X#
2310 BA = INT((I - X0) * 03 / X#) + 01
2320 BB = INT(P(I) * 04 / Y#) + 02
2330 BC = INT((I - 1 - X0) * 03 / X#) + 01
2340 PRINT "D"BC"; "BB"; "BA"; "BB"
2350 NEXT I
2360 NEXT G
2370 PR# 1
2380 PRINT "Q1"
2390 PRINT "M1610,300"
2400 PRINT "P"K$
2410 PRINT "M1680,300"
2420 PRINT "P"N$
2430 PRINT "M1750,300"
2440 PRINT "FNERE DE CRENEAUX: "C
2450 PRINT "M1830,300"
2460 PRINT "FNERE DE CLAQUAGES: "N
2470 PRINT "M1900,300"
2480 PRINT "PTENSION: "V" V"
2490 PRINT "M1980,300"
2500 PRINT "FEPAISSEUR: "EP" A"
2510 PRINT "M1590,300"

```

```

2520 PRINT "H"
2530 PR# 0
2540 CALL - 936: VTAB 15
2550 IF N < > 0 THEN 2570
2560 PRINT "PAS DE CLAQUAGES APRES "; C2 - 1 "COUPS": END
2565 REM WEIBULL
2566 REM =====
2570 INPUT "WEIBULL OUI OU NON?(O/N)"; R#
2580 IF R# = "O" THEN PRINT D# "RUNWEIBULL"
2590 END
2600 DATA 150,100,1400,1200,150,1500,1000,1000,2500,1500,1000
2605 DATA 1000,1350,1500,1000,1000,2200,100,1300,1200
2606 REM GRADUATION
2607 REM =====
2610 IF Y# < 10 THEN Y# = Y# + 1: GOTO 2630
2620 IF Y# < 10 < > INT(Y# / 10) THEN Y# = FN R(Y#)
2630 F = 1
2640 F = F * 5: IF Y# < = F THEN 2670
2650 F = F * 2: IF Y# < = F THEN 2670
2660 GOTO 2640
2670 G1 = F / 10: F = 1: IF G1 < 1 THEN G1 = 1
2680 VX = X# - X0
2690 F = F * 5: IF VX < = F THEN 2720
2700 F = F * 2: IF VX < = F THEN 2720
2710 GOTO 2690
2720 G2 = F / 10: IF G2 < 1 THEN G2 = 1
2730 READ 01,02,03,04
2740 PRINT "M"01"; "02
2750 K3 = Y# / G1: AA = INT(04 / K3)
2760 K3 = INT(K3)
2770 PRINT "X0,"AA"; "K3
2780 B1 = 01 - 100: B2 = 02 - 17
2790 FOR I = 1 TO K3: B2 = B2 + AA
2800 PRINT "M"B1"; "B2
2810 PRINT "P" I * G1
2820 NEXT I
2830 PRINT "M"01"; "02
2840 B2 = 02 + 04
2850 PRINT "D"01"; "B2
2860 B2 = B2 + 15
2870 PRINT "M"01"; "B2
2880 PRINT "P"Y#
2890 PRINT "M"01"; "02
2900 K3 = VX / G2: AA = INT(03 / K3)
2910 K3 = INT(K3)
2920 PRINT "X1,"AA"; "K3
2930 B1 = 01 - 10: B2 = 02 - 50
2940 FOR I = 1 TO K3: B1 = B1 + AA
2950 PRINT "M"R1"; "B2
2960 PRINT "P" I * G2 + X0
2970 NEXT I
2980 PRINT "M"01"; "02
2990 B1 = 01 + 03
3000 PRINT "D"B1"; "02
3010 B1 = B1 + 10
3020 PRINT "M"B1"; "02

```

```

3560 FOR I = 0 TO 3
3570 AAK(K,I) = AAK(K,I) / PV
3580 NEXT I
3590 BB(K) = BB(K) / PV
3600 FOR J = 0 TO 3
3610 IF J = K THEN GOTO 3650
3620 FOR I = 0 TO 3
3630 AAK(J,I) = AAK(J,I) - CS(J) * AAK(K,I)
3640 NEXT I
3650 BB(J) = BB(J) - CS(J) * BB(K)
3660 NEXT J,K
3670 FOR I = 3 TO 0 STEP - 1
3680 IK = PC(I)
3690 IF IK = I THEN 3780
3700 FOR J = 0 TO 3
3710 TT = AAK(I,J)
3720 AAK(I,J) = AAK(IK,J)
3730 AAK(IK,J) = TT
3740 NEXT J
3750 TT = BB(I)
3760 BB(I) = BB(IK)
3770 BB(IK) = TT
3780 NEXT I
3790 FOR J = 3 TO 0 STEP - 1
3800 JK = PL(J)
3810 IF JK = J THEN 3870
3820 FOR I = 0 TO 3
3830 TT = AAK(I,J)
3840 AAK(I,J) = AAK(I,JK)
3850 AAK(I,JK) = TT
3860 NEXT I
3870 NEXT J
3880 F = 0
3890 FOR XX = 0 TO XS STEP XS / 500
3900 Y = BB(3)
3910 FOR I = 1 TO 3
3920 J = 3 - I
3930 Y = Y * XX + BB(J)
3940 NEXT I
3950 IF (Y < 0 OR Y > YS) THEN 4030
3960 BB = INT (Y * 04 / YS) + 02
3970 BA = INT (XX * 03 / XS) + 01
3980 IF F = 1 THEN 4020
3990 PRINT "M"BA", "BB"
4000 F = 1
4010 GOTO 4030
4020 PRINT "D"BA", "BB"
4030 NEXT XX
4040 RETURN
4045 PV = AAK(I,J):P = ABS (PV):IK = I:JK = J: GOTO 3300
4046 REM APPROXIMATION LINEAIRE
4047 REM =====
4050 J2 = 0:F = 0

```

```

3030 PRINT "P"X$
3040 PRINT "M"01", "02
3050 RETURN
3055 REM CLASSEMENT
3056 REM =====
3060 P = L
3070 J = P + P
3080 IF J > M THEN 3130
3090 IF J = M THEN 3110
3100 IF B(J + 1) > B(J) THEN J = J + 1
3110 IF W > = B(J) THEN 3130
3120 BCP) = B(J):P = J: GOTO 3070
3130 BCP) = W: RETURN
3135 REM APPROXIMATION POLYNOMIALE
3136 REM =====
3140 FOR J = 0 TO 3: FOR K = J TO 3: FOR L = 1 TO C
3150 AAK(K,J) = AAK(K,J) + L ^ (K + J)
3160 NEXT L
3170 AAK(J,K) = AAK(K,J)
3180 NEXT K,J
3190 FOR I = 0 TO 3: FOR J = 1 TO C
3200 BB(I) = BB(I) + (J ^ I) * T2(I) / 10
3210 NEXT J,I
3220 DET = 1
3230 FOR K = 0 TO 3
3240 PV = AAK(K,K)
3250 IK = K:JK = K
3260 PAV = ABS (PV)
3270 FOR I = K TO 3
3280 FOR J = K TO 3
3290 IF ABS (AAK(I,J)) > PAV THEN 4045
3300 NEXT J,I
3310 PC(K) = JK * PL(K) = IK
3320 IF IK < > K THEN DET = - DET
3330 IF JK < > K THEN DET = - DET
3340 DET = DET * PV
3350 IF DET = 0 THEN RETURN
3360 IF IK = K THEN 3450
3370 FOR I = 0 TO 3
3380 TT = AAK(IK,I)
3390 AAK(IK,I) = AAK(K,I)
3400 AAK(K,I) = TT
3410 NEXT I
3420 TT = BB(IK)
3430 BB(IK) = BB(K)
3440 BB(K) = TT
3450 IF JK = K THEN 3510
3460 FOR I = 0 TO 3
3470 TT = AAK(I,JK)
3480 AAK(I,JK) = AAK(I,K)
3490 AAK(I,K) = TT
3500 NEXT I
3510 FOR I = 0 TO 3
3520 CS(I) = AAK(I,K)
3530 AAK(I,K) = 0
3540 NEXT I
3550 CS(K) = 0:AAK(K,K) = 1

```

```

4060 FOR J = 1 TO C
4070 IF (N/J) = 0 THEN 4110
4080 J2 = J2 + 1
4090 X(J2) = LOG (J)
4100 Y(J2) = LOG (N/J)
4110 NEXT J
4120 XM = 0 YM = 0 XY = 0 X2 = 0
4130 FOR J = 1 TO J2
4140 XM = XM + X(J)
4150 YM = YM + Y(J)
4160 NEXT J
4170 XM = XM / J2
4180 YM = YM / J2
4190 FOR J = 1 TO J2
4200 X2 = X2 + (X(J) - XM) * 2
4210 XY = XY + (X(J) - XM) * Y(J)
4220 NEXT J
4230 B = XY / X2 * A - YM - B * XM
4240 A = EXP (A)
4250 FOR XX = XS / 500 TO XS STEP 1 / 500
4260 Y = A * (XX * B)
4270 IF Y < 0 OR Y > YS THEN 4350
4280 BB = INT (Y * 04 / YS) + 02
4290 BR = INT (XX * 03 / XS) + 01
4300 IF F = 1 THEN 4340
4310 PRINT "M"BR", "BB
4320 F = 1
4330 GOTO 4350
4340 PRINT "D"BR", "BB
4350 NEXT XX
4360 RETURN

```

```

3550 FOR I = 0 TO 3
3570 AAK(K,I) = AAK(K,I) / PV
3580 NEXT I
3590 BB(K) = BB(K) / PV
3600 FOR J = 0 TO 3
3610 IF J = K THEN GOTO 3650
3620 FOR I = 0 TO 3
3630 AAK(J,I) = AAK(J,I) - CS(J) * AAK(K,I)
3640 NEXT I
3650 BB(J) = BB(J) - CS(J) * BB(K)
3660 NEXT J,K
3670 FOR I = 3 TO 0 STEP - 1
3680 IK = PC(I)
3690 IF IK = I THEN 3780
3700 FOR J = 0 TO 3
3710 TT = AAK(I,J)
3720 AAK(I,J) = AAK(IK,J)
3730 AAK(IK,J) = TT
3740 NEXT J
3750 TT = BB(I)
3760 BB(I) = BB(IK)
3770 BB(IK) = TT
3780 NEXT I
3790 FOR J = 3 TO 0 STEP - 1
3800 JK = PL(J)
3810 IF JK = J THEN 3870
3820 FOR I = 0 TO 3
3830 TT = AAK(I,J)
3840 AAK(I,J) = AAK(I,JK)
3850 AAK(I,JK) = TT
3860 NEXT I
3870 NEXT J
3880 F = 0
3890 FOR XX = 0 TO XS STEP XS / 500
3900 Y = BB(3)
3910 FOR I = 1 TO 3
3920 J = 3 - I
3930 Y = Y * XX + BB(J)
3940 NEXT I
3950 IF (Y < 0 OR Y > YS) THEN 4030
3960 BB = INT (Y * 04 / YS) + 02
3970 BA = INT (XX * 03 / XS) + 01
3980 IF F = 1 THEN 4020
3990 PRINT "M"BA", "BB
4000 F = 1
4010 GOTO 4030
4020 PRINT "D"BA", "BB
4030 NEXT XX
4040 RETURN
4045 PV = AAK(I,J) : PAV = ABS (PV) : IK = I : JK = J : GOTO 3300
4046 REM APPROXIMATION LINEAIRE
4047 REM =====
4050 J2 = 0 : F = 0

```

```

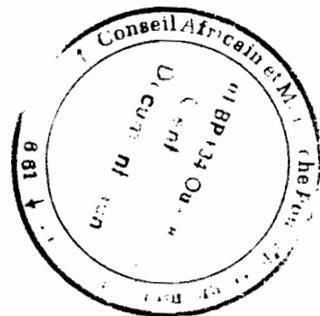
3030 PRINT "F"X$
3040 PRINT "M"01", "02
3050 RETURN
3055 REM CLASSEMENT
3056 REM =====
3060 P = L
3070 J = P + P
3080 IF J > M THEN 3130
3090 IF J = M THEN 3110
3100 IF B(J + 1) > B(J) THEN J = J + 1
3110 IF W > = B(J) THEN 3130
3120 B(P) = B(J) : P = J : GOTO 3070
3130 B(P) = W : RETURN
3135 REM APPROXIMATION POLYNOMIALE
3136 REM =====
3140 FOR J = 0 TO 3 : FOR K = J TO 3 : FOR L = 1 TO C
3150 AAK(K,J) = AAK(K,J) + L ^ (K + J)
3160 NEXT L
3170 AAK(J,K) = AAK(K,J)
3180 NEXT K,J
3190 FOR I = 0 TO 3 : FOR J = 1 TO C
3200 BB(I) = BB(I) + (J ^ I) * T2(I) / 10
3210 NEXT J,I
3220 DET = 1
3230 FOR K = 0 TO 3
3240 PV = AAK(K,K)
3250 IK = K : JK = K
3260 PAV = ABS (PV)
3270 FOR I = K TO 3
3280 FOR J = K TO 3
3290 IF ABS (AAK(I,J)) > PAV THEN 4045
3300 NEXT J,I
3310 PC(K) = JK : PL(K) = IK
3320 IF IK < > K THEN DET = - DET
3330 IF JK < > K THEN DET = - DET
3340 DET = DET * PV
3350 IF DET = 0 THEN RETURN
3360 IF IK = K THEN 3450
3370 FOR I = 0 TO 3
3380 TT = AAK(IK,I)
3390 AAK(IK,I) = AAK(K,I)
3400 AAK(K,I) = TT
3410 NEXT I
3420 TT = BB(IK)
3430 BB(IK) = BB(K)
3440 BB(K) = TT
3450 IF JK = K THEN 3510
3460 FOR I = 0 TO 3
3470 TT = AAK(I,JK)
3480 AAK(I,JK) = AAK(I,K)
3490 AAK(I,K) = TT
3500 NEXT I
3510 FOR I = 0 TO 3
3520 CS(I) = AAK(I,K)
3530 AAK(I,K) = 0
3540 NEXT I
3550 CS(K) = 0 : AAK(K,K) = 1

```

```

4060 FOR J = 1 TO C
4070 IF N(J) = 0 THEN 4110
4080 J2 = J2 + 1
4090 X(J2) = LOG (J)
4100 Y(J2) = LOG (N(J))
4110 NEXT J
4120 XM = 0 YM = 0 XY = 0 X2 = 0
4130 FOR J = 1 TO J2
4140 XM = XM + X(J)
4150 YM = YM + Y(J)
4160 NEXT J
4170 XM = XM / J2
4180 YM = YM / J2
4190 FOR J = 1 TO J2
4200 X2 = X2 + (X(J) - XM) ^ 2
4210 XY = XY + (X(J) - XM) * Y(J)
4220 NEXT J
4230 B = XY / X2 - A - YM - B * XM
4240 A = EXP (A)
4250 FOR XS = 500 TO 950 STEP 50
4260 Y = A * (XS ^ B)
4270 IF Y < 0 OR Y > YS THEN 4350
4280 BB = INT (Y * 04 / YS) + 02
4290 BA = INT (X * 03 / XS) + 01
4300 IF F = 1 THEN 4340
4310 PRINT "M"BA", "BB
4320 F = 1
4330 GOTO 4350
4340 PRINT "D"BA", "BB
4350 NEXT XS
4360 RETURN

```



DECISION

Le Président de l'Institut National Polytechnique de TOULOUSE

VU, les dispositions de l'article 10 de l'arrêté du 16 avril 1974
sur le DOCTORAT de TROISIEME CYCLE

VU, le rapport de thèse établi par un des membres du jury

AUTORISE Monsieur Léon VOUMBO MATOUMONA

à présenter une thèse en soutenance pour l'obtention du grade de
DOCTEUR de TROISIEME CYCLE devant un jury composé de :

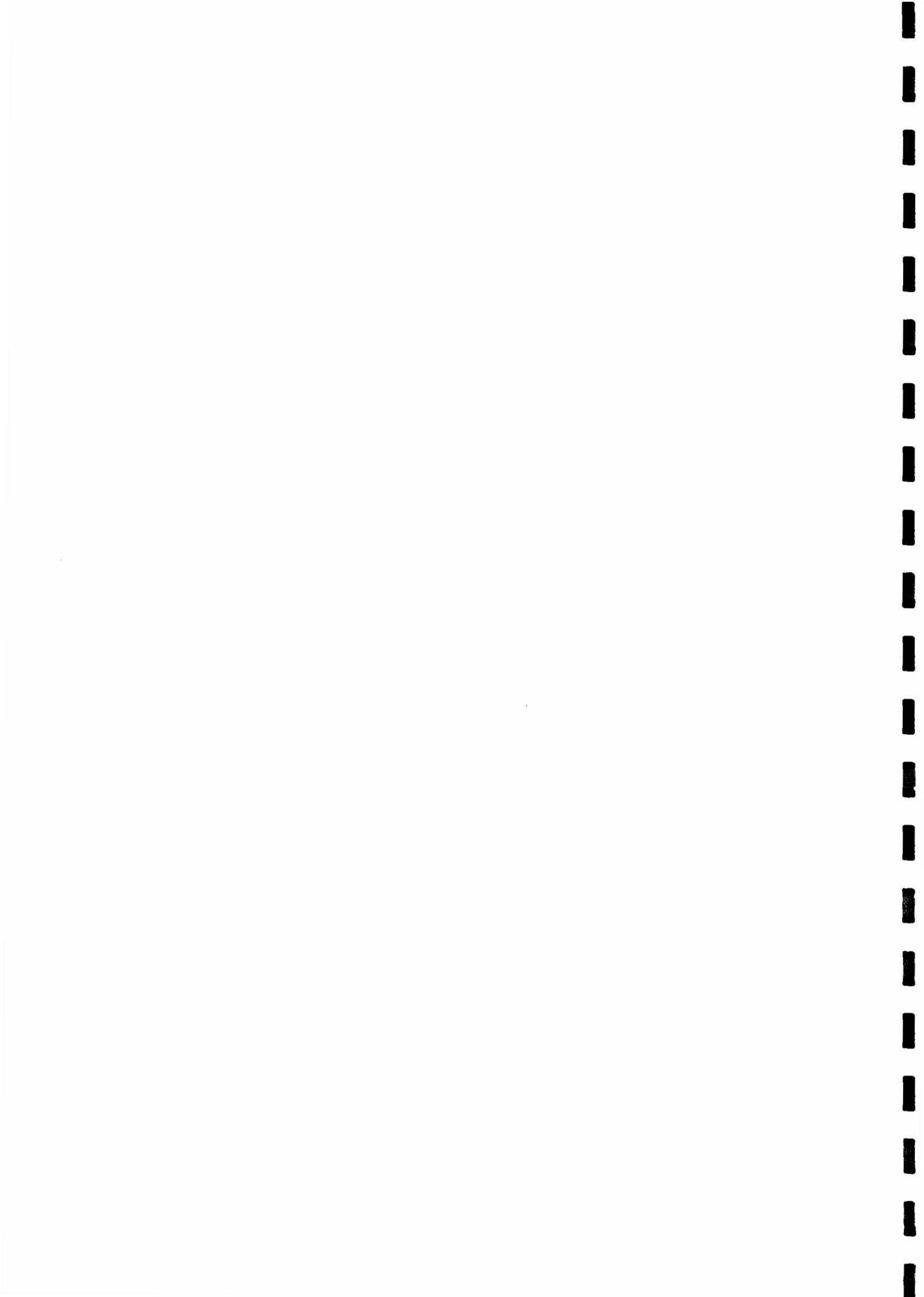
| | | |
|--------------|--------------------------------------|-----------|
| M. TRANNOY, | Professeur à l'I.N.P.T. | Président |
| M. JONSCHER, | Professeur à l'Université de LONDRES |) |
| M. LACOSTE, | Professeur à l'U.P.S. |) |
| M. MAYOUX, | Maître de recherches C.N.R.S. |) |
| M. MERIC, | Professeur à l'U.P.S. |) Membres |
| M. SEGUI, | Chargé de recherches C.N.R.S. |) |

A TOULOUSE, le 20 février 1984

Le Président de l'I.N.P.T.



Professeur J. NOUGARO



Thèse de Monsieur VOUMBO MATOUMONA Léon

« Contribution à la détermination de la rigidité diélectrique d'isolants en couches minces. Champ de rupture scientifique »

RESUME

L'auteur étudie expérimentalement sur des couches minces de silice et d'alumine soumises à des champs électriques en forme de créneaux, les variations du temps de retard au claquage d'un isolant solide en fonction de l'amplitude de ces créneaux.

Il décrit l'appareillage qu'il a conçu et mis au point, appareillage entièrement automatisé grâce à un microordinateur qui le pilote, collecte les données et en assure le traitement statistique. Compte tenu de la nature des évolutions observées, il propose de retenir comme critère caractéristique de la tenue du matériau, l'amplitude du champ pour laquelle le temps de retard au claquage devient infini : « champ de rupture spécifique ». A titre d'exemple d'application, ce concept est substitué à la notion traditionnelle de rigidité diélectrique dans l'étude de la tenue de couches isolantes en fonction de leur épaisseur.

MOTS CLES : Rigidité diélectrique, Isolants électriques, Couches minces.

