

N° d'ordre :

6/75  
Année 1975

# THÈSE

présentée



A L'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE DE L'UNIVERSITE D'ALGER

en vue de l'obtention

du Grade de Docteur-Ingénieur

par

**MUHAREM DOBARDZIC**

---

**FORMES DE DECHARGES GLISSANTES SOUS TENSIONS DE  
CHOC 1,2/50  $\mu$ s SUR LES SURFACES DE DIELECTRIQUES SOLIDES  
POLLUÉES PAR LE SABLE DU SAHARA**

---

Soutenue le 6 Juin 1975 devant la Commission d'examen :

MM. A. AMOKRANE

Président

R. LACOSTE

J.L. JAKUBOWSKI

Y. FLAMANT

} Examineurs

# THÈSE

présentée

A L'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE DE L'UNIVERSITE D'ALGER

en vue de l'obtention

du Grade de Docteur-Ingénieur

par

**MUHAREM DOBARDZIC**

---

**FORMES DE DECHARGES GLISSANTES SOUS TENSIONS DE  
CHOC 1,2/50  $\mu$ s SUR LES SURFACES DE DIELECTRIQUES SOLIDES  
POLLUÉES PAR LE SABLE DU SAHARA**

---

*Soutenue le 6 Juin 1975 devant la Commission d'examen :*

MM. A. AMOKRANE

Président

R. LACOSTE

J.L. JAKUBOWSKI

Y. FLAMANT

} Examineurs

**A la mémoire de mon père**

**A ma mère**

## AVANT PROPOS

Le présent travail a été réalisé au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique de l'Université d'Alger sous la direction de Monsieur le Professeur J.L. JAKUBOWSKI.

J'exprime ma plus profonde reconnaissance aux Autorités Universitaires d'Alger qui m'ont encouragé dans la poursuite de mes études post-universitaires et qui m'ont permis de mener à bien les présentes recherches.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à Monsieur A. AMOKRANE, Professeur et Directeur du Département Physique à la Faculté des Sciences d'Alger qui a bien voulu accepter de présider le Jury d'examen de ma thèse.

Je tiens également à exprimer mes remerciements à Monsieur R. LACOSTE, Professeur et Directeur du Laboratoire de Génie Electrique à l'Université de Toulouse, à Monsieur Y. FLAMANT, Professeur à la Faculté des Sciences d'Alger et à Monsieur J.L. JAKUBOWSKI, Professeur-Expert de l'UNESCO et Directeur du Laboratoire de Haute Tension à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, d'avoir bien voulu accepter d'être membres du Jury.

Je suis très reconnaissant à la Mission de l'UNESCO auprès de l'Ecole Nationale Polytechnique d'avoir mis à ma disposition de nombreux moyens en instrumentation et en documentation.

J'exprime mes remerciements pour l'aide importante fournie par la Société Nationale SONATRACH qui m'a facilité l'étude dans les zones pétrolières de Hassi Messaoud et In Amenas, par la Société Nationale SONAREM qui a procédé à l'analyse minéralogique complète des sables du Sahara et par la Société Nationale ENEMA, sise à Alger, Hassi Messaoud et In Amenas qui ont mis à ma disposition une importante documentation relative au climat du Sahara.

Mes remerciements vont également à Monsieur A. BOISRAYON, Professeur-Expert et Conseiller Principal de l'UNESCO, à Monsieur le Professeur K. BERGER, à Monsieur A. Ph. GALLO, Docteur-Ingénieur, à Monsieur l'Ingénieur P. VINCENT, Conseiller Technique à la SNERI, pour leurs précieux conseils.

A toutes les personnes qui m'ont apporté leur concours durant mes travaux de recherche, j'exprime ma profonde gratitude.

**FORMES DE DECHARGES GLISSANTES SOUS TENSIONS DE  
CHOC 1,2/50  $\mu$ s SUR LES SURFACES DE DIELECTRIQUES SOLIDES  
POLLUÉES PAR LE SABLE DU SAHARA**

---

# S O M M A I R E

	<u>Page</u>
Introduction	1
Première Partie	
<u>CHAPITRE I</u> Les décharges glissantes dans l'air près des surfaces propres des diélectriques solides.	
1.1. Formes caractéristiques des décharges	1.1
1.2. Systèmes isolants exposés aux décharges glissantes	1.3
1.3. Propriétés électriques des décharges glissantes	1.5
1.4. Développement spatial des décharges glissantes	1.9
1.5. Tension d'amorçage des étincelles glissantes	1.13
<u>CHAPITRE II</u> Les conditions climatiques au Sahara.	
2.1. Généralités	2.1
2.2. Précipitations et humidité relative	2.3
2.3. Les orages	2.8
2.4. Les vents de sable et les dépôts naturels	2.16
2.5. Autres caractéristiques du climat au Sahara	2.20
<u>CHAPITRE III</u> Dépôts naturels sur les isolateurs haute tension au Sahara.	
3.1. Réseaux haute tension dans les régions étudiées	3.1
3.2. Critères actuels du choix des isolateurs HT	3.2
3.3. Comportement des isolateurs HT en cours d'exploitation au Sahara	3.3
3.4. Manifestations principales de la pollution au Sahara	3.6

## Deuxième Partie

	<u>Page</u>
<u>CHAPITRE IV</u> Modèles expérimentés et méthodes de mesure.	
4.1. Modèles expérimentés	4.1
4.2. Equipement de base du laboratoire HT de l'École Nationale Polytechnique d'Alger	4.5
4.3. Méthodes de mesure des tensions	4.7
4.4. Méthodes d'observation d'apparition des étincelles glissantes	4.13
4.5. Disposition du film	4.16
4.6. Mesure de la capacité spécifique superficielle	4.18
4.7. Mesure de la résistivité	4.20
<u>CHAPITRE V</u> Création en laboratoire de dépôts artificiels.	
5.1. Généralités	5.1
5.2. Caractéristiques physiques et chimiques des sables de Hassi Messaoud et In Amenas	5.3
5.3. Création de dépôts polluants	5.10
<u>CHAPITRE VI</u> Etude des décharges glissantes.	
6.1. Généralités	6.1
6.2. Conductivité superficielle des modèles propres et pollués	6.4
6.3. Décharges sur les surfaces propres	6.9
6.4. Décharges sur les surfaces polluées par du sable sec	6.18
6.5. Décharges sur les surfaces polluées par du sable mouillé	6.21
6.6. Essai d'explication des résultats concernant les couches de sable mouillé	6.29
6.7. Décharges sur des isolateurs réels et modèles cylindriques	6.37
6.8. Décharges en présence de traces de pluie	6.40
Conclusions et suggestions pour les recherches ultérieures	7.1
Bibliographie	8.1

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

Les Etincelles glissantes font partie des décharges superficielles qui peuvent avoir lieu dans l'air près de la surface d'un diélectrique solide. Au point de vue technique, elles sont très nuisibles. L'apparition de ces étincelles est liée à l'abaissement très important de la tension d'amorçage des étincelles complètes constituant le court-circuit du système énergétique. La condition qui facilite leur apparition est la grande capacité superficielle entre la décharge et une des électrodes.

Le terme "étincelle glissante" est employé ici dans le sens de décharges sous forme d'un manche sur lequel se branchent des filets lumineux (aigrettes). Ce terme, non prévu par la nomenclature française, correspond au terme allemand "Gleitstielbüschel" ou "Gleitfunkenbüschel".

Plusieurs auteurs ont consacré des travaux théoriques et expérimentaux aux décharges glissantes. Parmi eux, le savant Max TOEPLER a donné pour la première fois des formules pour la tension d'amorçage de l'étincelle glissante et pour sa longueur, en fonction de la capacité spécifique superficielle.

Tous ces travaux sont consacrés en premier lieu aux décharges glissantes sur des surfaces propres de diélectriques solides.

Bien qu'il existe beaucoup de travaux relatifs aux isolateurs haute tension pollués, les lois concernant les décharges glissantes dans ce cas ne sont pas connues.

Les recherches effectuées à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, décrites dans la présente étude, concernent les décharges sur des surfaces polluées par des dépôts de sable saharien. L'étude de l'effet de ces dépôts présente une grande importance pour l'utilisation des isolateurs haute tension au Sahara. En conséquence, le but des présentes recherches est

l'étude des modalités d'apparition des décharges glissantes en présence des dépôts de sable, caractérisés par différents paramètres physiques, minéralogiques et électriques.

La thèse fait partie des recherches planifiées à l'École Nationale Polytechnique d'Alger et c'est à cause de cela qu'elle se limite à l'étude des décharges provoquées par les tensions de choc, imitant les surtensions de la foudre. Les surtensions de choc d'ailleurs sont les plus dangereuses, ce qui est confirmé par le fait que les défauts d'isolation dans les deux régions étudiées du Sahara Algérien (Hassi Messaoud et In Aménas) n'arrivent qu'au cours des orages. L'étude des critères de choix des équipements haute tension et des conditions difficiles de leur utilisation a justifié l'importance pratique du sujet choisi pour la recherche. Pour les recherches des décharges sous les autres formes de tension, la tension alternative de 50Hz y compris, une autre étude est prévue.

La présente recherche consiste en l'étude des phénomènes résultant de l'application de tensions de choc de la forme  $1,2/50$  microsecondes sur des modèles en présence de dépôts de sable saharien. Ce sable, provenant de Hassi Messaoud et d'In Aménas, est employé pour former des dépôts artificiels en laboratoire. Les paramètres variables des dépôts sont leur épaisseur et la quantité d'eau absorbée par leur couche. Ces deux paramètres influencent essentiellement la conductivité superficielle, paramètre électrique de base.

Les modèles expérimentés ont été tour à tour des modèles plats (les plus souvent essayés) caractérisés par une capacité superficielle spécifique constante, des modèles cylindriques et des isolateurs réels. Les dépôts étaient soit formés en Laboratoire, soit naturels, dans le cas des isolateurs réels.

Les résultats des recherches ont permis à l'auteur d'apprécier la limite de conductivité superficielle, en dessous de laquelle le dépôt de sable n'a pas d'influence sur la tension initiale des étincelles glissantes et la limite **au dessus** de laquelle les étincelles glissantes cessent de se produire.

PREMIERE PARTIE

ETUDE PRELIMINAIRE

## CHAPITRE I

LES DECHARGES GLISSANTES DANS L'AIR PRES DES  
SURFACES PROPRES DES DIELECTRIQUES SOLIDES

## 1.1. Formes caractéristiques des décharges

Dans l'air, près de la surface des diélectriques solides, différentes formes de décharges peuvent apparaître : effluves, filets lumineux, étincelles glissantes et étincelle complète qui peut se transformer en arc électrique.

En ce qui concerne les décharges électriques dans les gaz, en général, on peut se baser sur les définitions des Normes Françaises C 01 - 005, qui sont les suivantes :

"L'effluve est le phénomène de conduction électrique dans les gaz qui se manifeste par une faible luminosité sans grand échauffement, sans bruit et sans volatilisation appréciable des électrodes lorsque le champ électrique dépasse une certaine valeur".

"L'effet couronne est une forme particulière de l'effluve dans le cas des lignes électriques à haute tension".

"L'aigrette est une décharge intermittente d'électricité ayant la forme d'une houppe mobile qui sort d'un conducteur lorsque son potentiel dépasse une certaine valeur, mais reste insuffisant pour la formation d'une vraie étincelle. Elle est généralement accompagnée de sifflement ou de crépitement".

"L'étincelle est un phénomène lumineux éclatant, de courte durée et qui caractérise la décharge disruptive".

En ce qui concerne la nomenclature des décharges superficielles, l'auteur estime que la terminologie allemande, qui pour la notion "aigrette" donne quatre termes, est la plus complète. La forme de décharge définie par "Büschel" est générale : ce sont plusieurs filets lumineux sortant d'un point. La "Büschel" correspond à l'aigrette définie ci-dessus. La forme de décharge définie par "Stielbüschel" représente un manche brillant sur lequel se branchent des filets lumineux.

Les décharges par "Gleitbüschel" se manifestent uniquement près des surfaces des diélectriques. Leur allure et forme correspondent souvent à celles de l'aigrette dans l'espace. Pour les décharges superficielles, c'est surtout la forme des décharges définie dans la terminologie allemande par le terme "Gleitstielbüschel" qui est importante. M. TOEPLER parle même de "Funkenbüschel" - aigrettes à étincelle. Ce sont des aigrettes munies d'un manche très brillant, qui d'après l'expression de TOEPLER, constitue "un tronçon de l'étincelle".

Ne trouvant pas de correspondance à "Gleitstielbüschel" dans la terminologie française, nous avons introduit, en accord avec la littérature allemande et polonaise, ainsi que les normes VDE-011/8.53, le terme d'"étincelle glissante".

L'étincelle glissante, qui a la forme d'une étincelle partielle, se distingue de l'étincelle complète le long de la surface par le fait qu'elle n'atteint pas l'autre électrode et qu'elle ne constitue pas un contournement du diélectrique solide. Pour la décharge complète, nous gardons le terme étincelle, sans additif "glissante".

Les tensions d'apparition d'effluves, de filets lumineux, d'étincelle glissante ou d'étincelle complète, seront appelés les "tensions d'amorçage" de ces formes de décharge, et les tensions d'amorçage les plus basses, les "tensions initiales".

L'ancien terme correspondant aux décharges glissantes, et spécialement à leurs traces, est "figures de Lichtenberg". Ce terme ne sera pas utilisé ici.

## 1.2. Systèmes isolants exposés aux décharges glissantes

Le système isolant courant le plus exposé au danger d'apparition des étincelles glissantes est l'isolateur de traversée, dont la forme la plus simple III est représentée à la figure 1.1. La symétrie axiale de ce système n'est d'ailleurs pas essentielle du point de vue des décharges étudiées; les étincelles glissantes peuvent se produire aussi dans le système plat, tel qu'il est présenté à la figure 1.2., dont une électrode a des dimensions beaucoup plus petites que l'autre. Le trait caractéristique de ces deux systèmes est leur grande capacité superficielle, c'est-à-dire la capacité de la décharge (Fig. 1.1.b et 1.2.b) issue d'une électrode (l'électrode active), par rapport à l'autre électrode (la contre-électrode).

M. TOEPLER [2], qui a été le pionnier de la recherche des étincelles glissantes, a introduit la notion de capacité superficielle spécifique : c'est la capacité existant entre  $1 \text{ cm.}^2$  de feuille métallique, collée sur la surface du diélectrique près de l'électrode active et la contre-électrode. Cette capacité est mieux définie que la capacité entre la décharge et la contre-électrode.

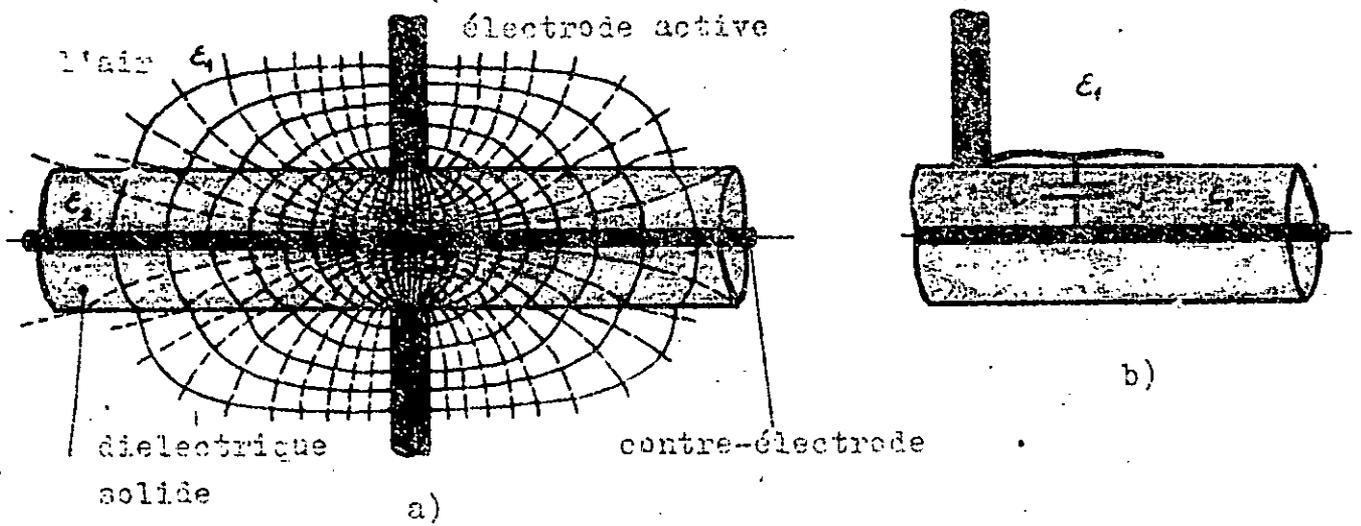


Fig. 1.1  
Système cylindrique simple d'après X. Kuhlmann [1]

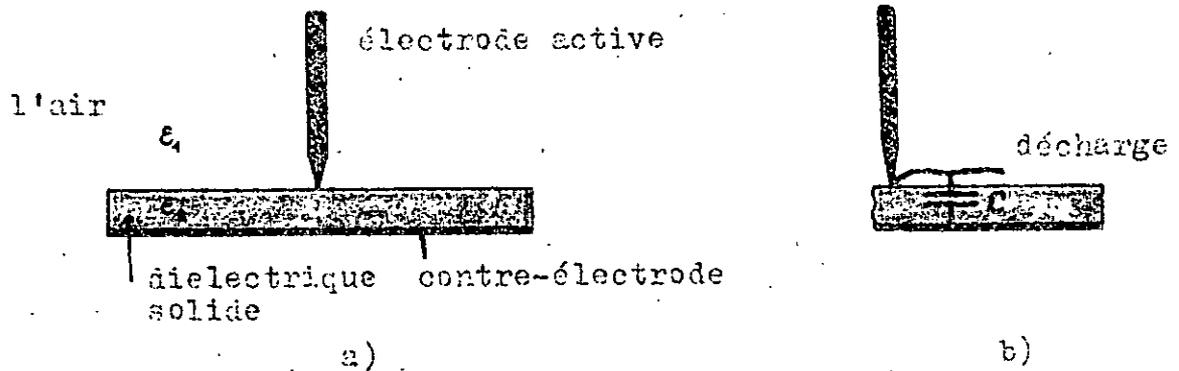


Fig. 1.2  
Système plat d'après M. Toepler [2].

## 1.5.

La capacité superficielle est liée au système des capacités par lequel on peut remplacer le champ électrique. Le champ de la Fig. 1.1 peut être remplacé par une chaîne de capacité  $C_1$ ,  $K$  et  $C$  (Fig. 1.3). En général, on néglige l'existence des capacités  $C_1$  et alors la chaîne se réduit aux capacités  $K$  et  $C$  (Fig. 1.4).

On définit les capacités distribuées  $K$  comme formées par des électrodes très petites, posées sur la surface de l'isolateur, et les capacités  $C$  comme formées par les mêmes électrodes et la contre-électrode. Cette définition admise, il apparaît que la capacité spécifique superficielle est liée à la capacité  $C$ .

Une des conséquences des valeurs élevées de la capacité  $C$  est la grande valeur de l'intensité de champ près de l'électrode active (Fig. 1.5). C'est à cet endroit qu'apparaissent les effluves.

### 1.3. Propriétés électriques des décharges glissantes

Avec l'élévation de la tension, les effluves se transforment en filets lumineux le long de la surface. La composante nominale du champ de la surface  $E_n$  (Fig. 1.6) maintient les porteurs de charges électriques d'une polarité donnée près de cette surface; la composante tangentielle  $E_t$ , qui est en même temps axiale dans un système cylindrique, déplace ces porteurs dans son propre sens.

D'après M. TOEPLER et son Ecole, les filets lumineux ont une caractéristique  $u-i$  (tension-courant) non linéaire, mais montante (positive :  $\frac{du}{di} > 0$ ), c'est-à-dire que l'élévation de tension conduit à une élévation de courant, comme pour un circuit à résistance constante. Après passage en un temps très court d'une quantité déterminée de charge électrique par le filet (environ 1 nC en 0,1  $\mu$ s d'après TOEPLER [2], 7 à 10 nC pour l'électrode active positive et 1 nC pour l'électrode négative d'après G. NEUMÄRKER [3]) cette carac-

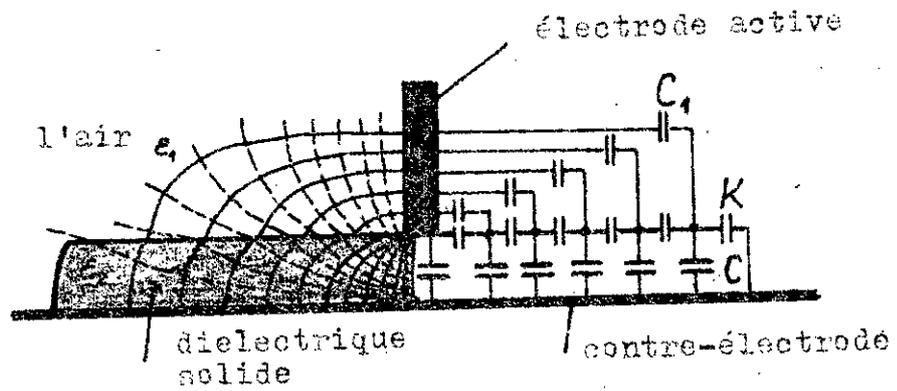


Fig. 1.3

Schéma équivalent avec  $C_1$ ,  $K$  et  $C$  du système cylindrique de la figure 1.1.

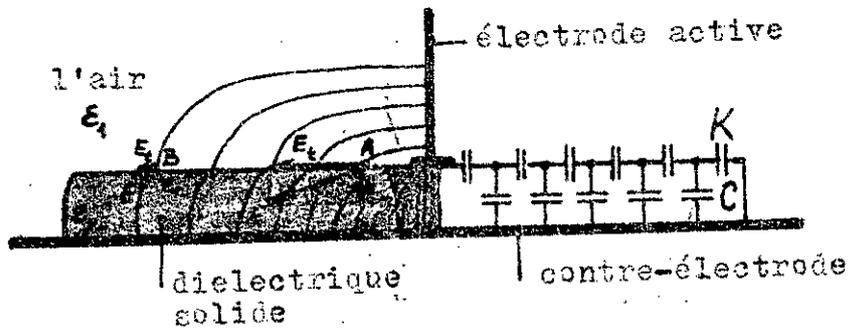


Fig. 1.4

Schéma équivalent simplifié avec  $C$  et  $K$ .

## 1.7.

téristique devient descendante (négative), c'est-à-dire  $\frac{du}{di} < 0$ , comme pour la caractéristique bien connue de l'arc électrique (Fig. 1.7).

Cela conduit à une brusque élévation du courant de décharge (passage du point instable de travail A au point stable B). Ce passage correspond à la transformation du filet en étincelle glissante. Sur la Fig. 1.7 on a supposé que la source de tension possède une impédance interne sous forme de résistance constante R. En pratique (en exploitation et au laboratoire) cette impédance aura une composante inductive prédominante, ce qui ne change pas l'explication qualitative du passage du filet à l'étincelle glissante. Le diagramme réel se substituant alors à celui de la Fig. 1.7 est constitué par les caractéristiques dynamiques aussi bien de la source de tension que de la décharge. L'auteur n'a pas trouvé dans la littérature d'exemple d'un tel diagramme basé sur des mesures.

La tension correspondant à la transformation des filets en étincelles glissantes (point A Fig. 1.7) est liée, comme on l'a déjà mentionné, au passage d'une charge électrique suffisamment importante par le filet lumineux. Ceci permet de comprendre le rôle primordial de la valeur de la capacité superficielle. Sa grande valeur conduit à de grands courants capacitifs et à de grandes charges véhiculées par le filet.

Ces charges (C.du) ne dépendent pas de la vitesse de variation de la tension ( $\frac{du}{dt}$ ) et, en conséquence, cette vitesse n'a pas, d'après TOEPLER, d'influence sur la tension d'amorçage des étincelles glissantes.

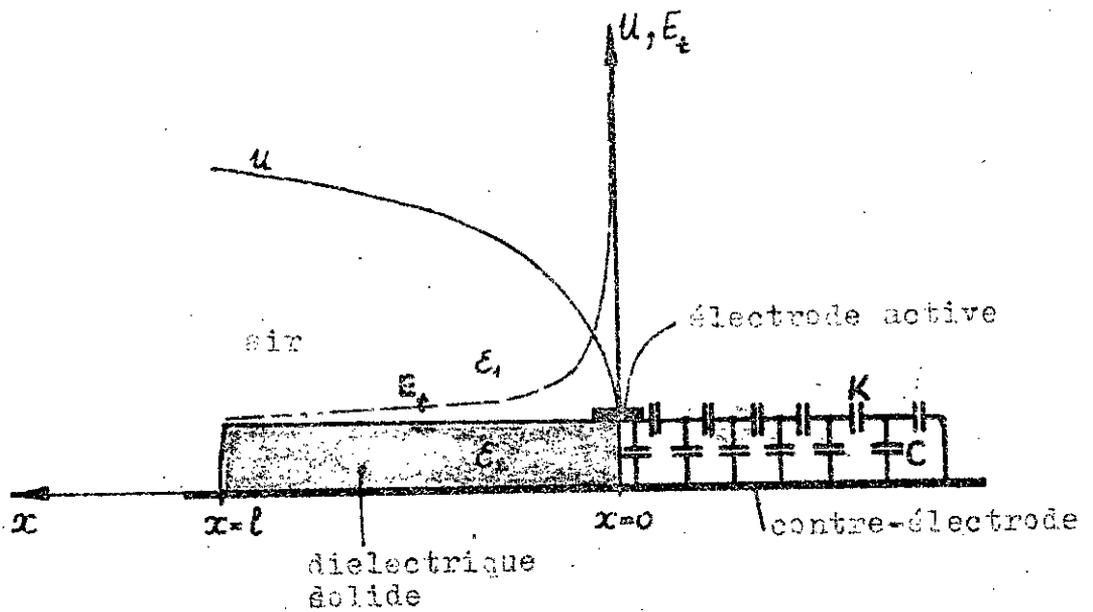


Fig. 1.5

La répartition de la tension et de l'intensité du champ.

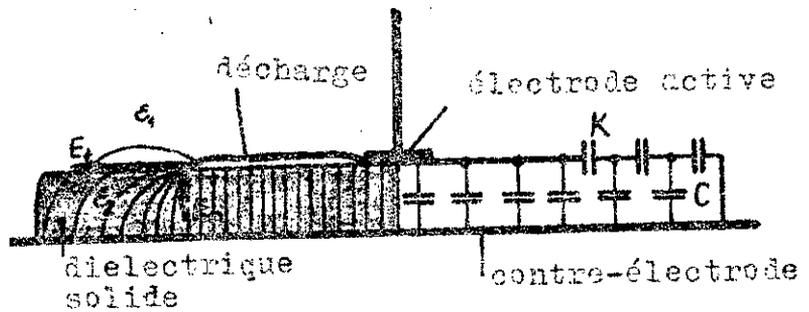


Fig. 1.6

Composantes normale et tangentielle de l'intensité de champ sur la tête du canal de décharge.

#### 1.4. Développement spatial des décharges glissantes

Les modalités d'apparition des décharges glissantes dépendent de la structure du champ électrique qui est lié aux conditions géométriques du système composé des deux diélectriques, solide et gazeux, et des électrodes. Elles dépendent aussi de la nature et de l'état de ces diélectriques (par exemple : la pression de gaz). La polarité et la forme de la tension appliquée ont aussi une influence primordiale. Les modalités d'apparition des décharges glissantes dépendent en outre de l'état de surface du diélectrique solide et de la valeur de la capacité parallèle aux électrodes.

Le développement spatial des décharges glissantes est similaire à celui des décharges dans l'air. Les filets lumineux sont composés de plasma et possèdent à leur extrémité (à leur tête) une concentration de charges. Cette charge engendre le champ propre nécessaire au prolongement du filet. Les avalanches causées par les photoélectrons à proximité de la tête du filet se prolongent dans la direction du champ plus ou moins fort, suivant la polarité de l'électrode active. Cette circonstance explique la plus grande facilité de prolongement des filets quand l'électrode active est positive, c'est-à-dire quand les avalanches mentionnées sont dirigées vers cette électrode. Dans ce cas les longueurs des décharges glissantes sont plus importantes que dans le cas où l'électrode active est négative, à tensions égales.

L'aspect des figures représentant des décharges positives et négatives est très différent pour la même forme de tension appliquée. Les décharges positives présentent des canaux partant de l'électrode active en forme d'étoile. Ces canaux se distinguent bien les uns des autres (voir chapitre VI). Leur nombre dépend de la vitesse de variation de la tension appliquée. Pour des tensions de choc positives variant rapidement, par exemple celles de  $1,2/50 \mu\text{s}$ ,

les canaux partant de l'électrode et les filets partant de ces canaux sont bien séparés, ce qui donne la possibilité de suivre les formes des figures positives dans tous leurs détails. Pour des tensions de choc variant lentement, les détails se perdent et même les canaux se croisant, mais le caractère général des figures reste toujours celui des figures positives.

Les canaux des figures négatives (voir chapitre VI) sont flous vers leurs extrémités. Ils sont aussi régulièrement répartis autour de l'électrode active, mais ils sont séparés par des zones obscures. Pour les tensions de chocs négatives variant rapidement, le nombre des zones obscures est moindre que pour celles variant lentement.

Lors de l'application d'une tension périodique, les décharges auront le caractère des figures positives. Ceci est valable même dans le cas où la première demi-période de la tension alternative est négative, car les décharges positives sont plus longues que les négatives. La forme des décharges périodiques dépend de la fréquence et éventuellement du facteur d'amortissement des oscillations.

Lors de l'application d'une tension continue les décharges glissantes dont le courant se ferme par la capacité, ne se produiront pas. Dans ce cas, les décharges superficielles passeront directement du stade d'effluves au stade d'étincelles complètes [14] court-circuitant les électrodes. Ce problème semble d'ailleurs ne pas être très simple, mais le programme de cette étude ne permet pas de l'aborder.

La longueur des décharges dépend de la nature du gaz. Par exemple, avec les gaz électronégatifs ayant des atomes de chlore et surtout de fluor dans leur molécule (hexafluorure de soufre, fréon, tétrachlorure de carbone), on obtient des décharges glissantes réduites du fait de la formation d'ions négatifs lourds.

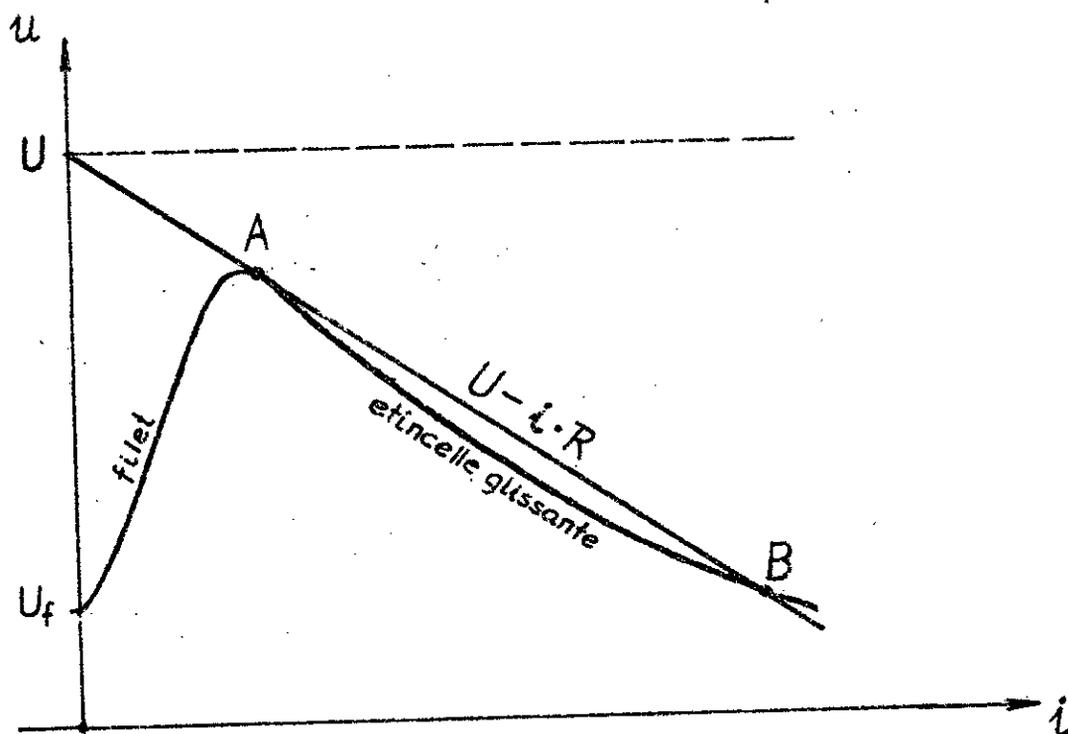


Fig. 1.7

Caractéristique  $u-i$  des décharges glissantes  
(schématiquement).

La longueur des filets lumineux ( $l_f$ ) croît linéairement avec la tension. La formule générale (voir 151) qui donne la longueur des filets est :

$$l_f = \frac{U - U_f}{k}, \quad (\text{cm, kV}) \quad (1.2)$$

où  $U$  = tension appliquée entre les deux électrodes,

$U_f$  = tension d'amorçage du filet,

$k$  = constante, dépendant du matériau isolant ( $\epsilon_r$ ) et de la forme de la tension.

H. PAPAN 141, pour des diélectriques solides caractérisés par  $\epsilon_r = 5,76$  ou  $\epsilon_r = 7,55$  et pour des modèles plats du type Toepler à électrode active de 25 cm de diamètre, donne pour  $k$  une valeur de 5, ce qui veut dire que pour  $U - U_f = 5$  kV, par exemple, la longueur du filet est de 1 cm.

M. TOEPLER [2] a donné la relation de la longueur de l'étincelle glissante en fonction de la capacité spécifique superficielle ( $C$ ), de la tension appliquée ( $U$ ) et de sa variation par rapport au temps ( $\frac{du}{dt}$ ). Sa formule peut s'écrire sous la forme :

$$l_e = k \cdot C^2 \cdot U^n \cdot \left(\frac{du}{dt}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad \left(\text{cm}, \frac{\text{F}}{\text{cm}^2}, \text{kV}_{\text{max}}, \frac{\text{kV}}{\mu\text{s}}\right) \quad (1.3)$$

où  $k$  est une constante dépendant de la polarité de l'électrode active. La formule (1.3) est valable pour des ondes de tension dont la variation est approximativement constante et dans les limites de  $\frac{du}{dt} \approx 300$  à 2 kV/ $\mu$ s.

Dans la formule  $U$  apparaît avec un exposant  $n = 4$  à 5. Certains auteurs ont trouvé une valeur plus faible (d'après E. MARX, 161,  $n = 3$ ). A partir de la formule (1.3), avec  $n = 5$ , il est possible de vérifier que la tension d'amorçage de l'étincelle complète ( $U = U_c$  pour  $l_e = l_c$ ) dépend très peu de la dérivée  $\frac{du}{dt}$ , du fait que pour toutes les ondes de tension que l'on rencontre en exploitation on a  $\left(\frac{du}{dt}\right)^{\frac{1}{20}} \approx 1$ .

L'apparition de l'étincelle glissante sur les isolateurs haute tension n'est pas admissible en exploitation, car il suffit en général d'une légère augmentation de tension pour qu'elle se transforme en étincelle complète, constituant un court-circuit entre les électrodes. Les recherches décrites dans le présent mémoire sont consacrées en premier lieu aux étincelles glissantes et spécialement à leurs formes et leurs tensions d'amorçage.

#### 1.5. Tension initiale d'amorçage de l'étincelle glissante

Les décharges glissantes ont été découvertes en 1777 par G.C. LICHTENBERG [13]. Jusqu'au début du XX<sup>ème</sup> siècle (travaux de M. TOEPLER) les recherches sur les décharges glissantes ont plutôt eu un caractère descriptif. Un historique détaillé de ces recherches est donné par K. PRZIBRAM et B. GÄNGER (voir [14]) ainsi que par J.M. MECK et J.D. GRAGGS [15] et R. STRIGEL [16]. L'évolution de la transmission d'énergie par des lignes à haute tension, l'apparition dans ces installations des tensions de choc d'origine atmosphérique et d'origine interne et le développement des méthodes précises de mesures ont conféré aux décharges glissantes une très grande importance pratique. Les travaux théoriques les plus remarquables, débouchant sur des applications pratiques, ont été menés par Max TOEPLER (surtout ceux publiés en 1921 [2]). Jusqu'à nos jours, ces travaux ont servi de base pour toutes les recherches ultérieures. Les successeurs de TOEPLER ont entrepris de vérifier ses résultats sur les modèles les plus compliqués et dans les conditions les plus variées, en introduisant différents systèmes de distribution du champ, en employant différents diélectriques solides et gazeux, en appliquant des tensions de différentes formes, en modifiant les conditions d'ambiance, etc...

Le résultat principal des recherches de M. TOEPLER est sa formule de la tension initiale de l'étincelle glissante, qui était à l'origine :

$$U_e = k \cdot a^{0,5} \quad (\text{kV, cm}), \quad (1.4)$$

où  $k = 48,5$  pour l'électrode active négative et  $k = 45$  pour la positive,

$a =$  épaisseur du verre ( $\epsilon_r = 7,5$ ).

En remplaçant  $a$  dans la formule (1.4) par  $\frac{7,5}{4\pi \cdot C}$ , on obtient la formule générale suivante pour la tension initiale de l'étincelle glissante :

$$U_e = \frac{k'}{C^{0,5}} \cdot \left( \text{kV, } \frac{\text{F}}{\text{cm}^2} \right), \quad (1.5)$$

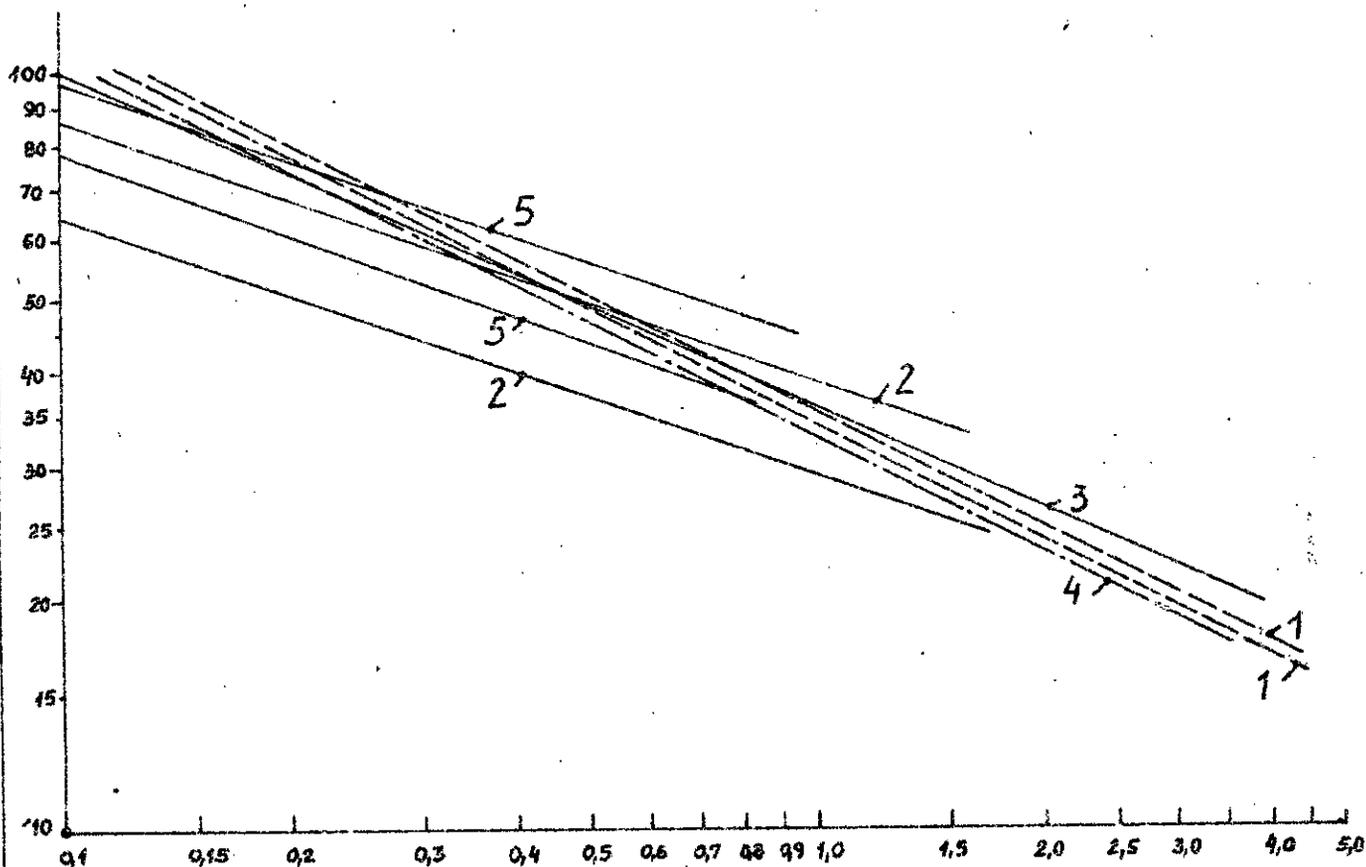
où  $k'$  est la constante dépendant de la polarité de l'électrode active. TOEPLER a obtenu empiriquement cette expression lors de recherches sur des modèles plats (Fig. 1.2) en plaques de verre de différentes épaisseurs, dont la capacité  $C$  est comprise entre 0,3 et 3,1 pF/cm<sup>2</sup>.

E. HAFELY [71], E. HUETER [81], K. KAPPELER [91], A. ROTH [51], JAKOBY [101], H. PAPEN [41], partant de la formule (1.5) ont obtenu leurs propres formules dont la forme est :

$$U_e = \frac{k}{C^n} \cdot \quad (1.6)$$

Les constantes  $k$  et  $n$  varient suivant les auteurs. On peut trouver l'analyse de ces formules chez H. PAPEN [41] et W. LIDANOWSKI [111]. Le premier de ces auteurs a établi un diagramme (Fig. 1.8) comparant les résultats obtenus en utilisant les différentes formules. On peut constater que les divergences sont assez importantes. Cela retire à la formule son importance pratique sans diminuer pour autant sa valeur théorique.

$U_0$  en kV max.



— capacité spécifique superficielle  $C$  en pF/cm<sup>2</sup> →

Fig. ...  
 Tension initiale d'étincelle glissante  $U_0$ , [4]:  
 1- Toepler ; 2- Hafely ; 3- Kappeler ; 4- Jakobi ; 5- Papen.  
 valeurs maximales et minimales.

Quelles peuvent être les raisons de ces divergences ?

D'après l'auteur de cette étude, une des principales causes des différences entre les formules donnant les tensions initiales est due aux méthodes très diverses employées pour la constatation de l'apparition de l'étincelle glissante. On emploie des méthodes optiques (visuelles ou photographiques) et acoustiques (constatation de bruits caractéristiques). Ce sont surtout les méthodes visuelles qui permettent une interprétation subjective. Ce point de vue se trouve confirmé par l'analyse de G. NEUMÄRKER [31]. Cet auteur distingue trois phases dans la formation de l'étincelle glissante :

- phase 1 : manche de quelques millimètres de longueur. Cette phase correspond à une charge d'injection de 6 à 8 nC dans la décharge préliminaire (filet).
- phase 2 : manche ayant à sa tête plusieurs filets (10 à 15 nC).
- phase 3 : manche plus long avec plusieurs branches (100 à 200 nC). D'après NEUMÄRKER, c'est la phase qui devrait servir aux techniciens comme définition de la tension d'amorçage de l'étincelle glissante. Cette dernière est dans ce cas bien visible sous la forme d'un arbre lumineux en miniature.

L'auteur de cette étude adopte pour base la définition de la phase 2, qui peut être constatée avec une certitude suffisante par la méthode photographique choisie par lui-même. La phase 1 est très difficilement décelable, même par la méthode photographique.

La tension d'amorçage de l'étincelle glissante dépend de tous les facteurs pouvant avoir une influence sur la répartition de la tension le long de la surface du diélectrique solide. Dans les cas pratiques (décharges atmosphériques, surtensions d'origine interne) l'influence de la forme de l'onde sur la valeur de la tension initiale de l'étincelle glissante n'est pas essentielle. Les formules du type de celle de TOEPLER ne contiennent pas de paramètre lié à la variation de la tension dans le temps. Par contre, il existe une influence de la polarité de l'onde de choc.

Il faut cependant mentionner la formule mi-théorique, mi-expérimentale de HELLER et VEVERKA (voir [11]) qui fait apparaître la pulsation de la tension alternative.

Parmi les travaux modernes les plus remarquables, il faut citer ceux de H. PAPEN, déjà mentionnés, et ceux surtout de G. NEUMARKER, qui pour la première fois a obtenu une corrélation entre les décharges et les grandeurs électriques correspondantes (courant, charge électrique).

Il faut mentionner aussi les travaux remarquables de F.H. MERILL-A. VON HIPPEL [17] et E. NASSER [18]. Les deux premiers auteurs ont, pour la première fois généralisé les phénomènes des décharges glissantes pour l'explication des processus de décharges dans les gaz, en utilisant les conditions variées (nature et pression des gaz). E. NASSER a étudié sur un modèle original ("Modèle de NASSER") le développement spatial de décharges positives en obtenant des familles de caractéristiques "longueur-temps" et "vitesse-temps". Selon cet auteur le temps nécessaire pour la formation des décharges positives est de 2 à  $20 \cdot 10^{-8}$  s, tandis que la vitesse de leur propagation est entre 1 à  $6 \cdot 10^{+8}$  cm/s.

Plusieurs autres travaux non cités ici ont une certaine importance théorique ou pratique, tels ceux de A. WEBER (voir [12]) qui a utilisé la notion de capacité spécifique superficielle pour expliquer l'influence des cloches des isolateurs sur les décharges glissantes, et ceux de R. ELSNER et J. REBHAN [12], qui ont appliqué la formule de TOEPLER à des isolateurs de traversée de formes différentes.

L'analyse des modalités d'apparition de l'étincelle glissante contenue dans ce chapitre confirme le rôle essentiel joué par la capacité superficielle. La tension initiale de l'étincelle glissante dépend de cette capacité, mais les formules contenant ce paramètre ne sont pas assez générales pour être employées dans la technique de la haute tension.

Le mécanisme des décharges discuté jusqu'à présent concerne les surfaces propres des diélectriques solides. En cas de dépôts sur ces surfaces, ce mécanisme sera sans doute valable dans certaines limites des paramètres caractérisant les dépôts. Le chapitre VI donne la définition de ces limites.

Les chapitres II et III traitent des contraintes naturelles auxquelles sont soumis les isolateurs H.T au Sahara, plus particulièrement au Sahara Algérien, tandis que les chapitres IV et V définissent les dépôts de sable, les modèles et les méthodes de recherche.

## CHAPITRE II

## LES CONDITIONS CLIMATIQUES AU SAHARA

## 2.1. Généralités

La pollution des isolateurs haute tension et leur comportement au Sahara sont très étroitement liés au climat qui y règne. Avant d'aborder ces deux problèmes, il est indispensable de donner quelques caractéristiques principales sur le climat du Sahara, en se limitant aux manifestations pouvant intéresser les isolateurs haute tension du point de vue des phénomènes étudiés ici.

Il existe au Sahara plusieurs stations météorologiques et de radio-sondages, mais leur nombre est insuffisant; parfois il n'existe aucune station sur des étendues dépassant cent ou deux cents mille  $\text{km}^2$ . Il est donc impossible de donner des caractéristiques complètes et précises pour le Sahara entier, ou bien pour une de ses parties. Dans le cadre de l'ensemble du Sahara, la partie algérienne est la mieux connue du point de vue climatologique, mais la remarque sur l'insuffisance des renseignements est néanmoins valable pour elle aussi.

Le climat du Sahara Algérien varie sur une très grande échelle, et est parfaitement représentatif du Sahara entier. Il a surtout été étudié par l'Institut de Recherches Saharien et par les Climatologies Nationales des pays qui l'entourent. Des études ont parfois été menées par des sociétés pétrolières

et par d'autres organismes installés au Sahara. Ainsi, au Centre Pétrolier de Hassi Messaoud existent deux stations météorologiques : l'une rattachée à l'Établissement National pour l'Exploitation Météorologique et Aéronautique (E.N.E.M.A), l'autre à la Société Nationale de Transport et de Commercialisation des Hydrocarbures (SONATRACH). Les principaux résultats qui ressortent des travaux de ces organismes sont résumés ici.

Le climat du Sahara dépend de nombreux facteurs, et en particulier des différents types de perturbations atmosphériques. Les causes principales de sa variété sont expliquées par plusieurs auteurs, comme par exemple : P. GUENEY 1201, J. DUBIEF 1211, R. MAYENCON 1261, G. TSCHIRHART 1271, M. FRAILLETEZ 1291. Ces auteurs ont ainsi donné de nombreuses informations sur le climat du Sahara, informations que nous utiliserons dans la présente étude.

Il faut préciser que les valeurs moyennes caractérisant les phénomènes climatiques au Sahara n'ont pas grande importance pour notre étude, car les valeurs extrêmes s'en écartent trop; ainsi, l'humidité relative moyenne annuelle de l'air au Centre Pétrolier de In Amenas est de 37 %, mais en cours d'année, elle atteint plusieurs fois la saturation; la hauteur moyenne des précipitations annuelles à Tindouf, autre région du Sahara Algérien, est d'environ 40 mm, mais une hauteur maximale d'environ 80 mm en 24 heures a déjà été constatée. Sur la côte, par contre, cette différence entre les valeurs maximales et moyennes est beaucoup plus réduite. A Alger par exemple, la valeur moyenne annuelle de l'humidité relative est de 75 % 1231 et la maximale, de 100 %.

Les phénomènes climatiques les plus intéressants pour la présente étude sont : les précipitations, les orages et les vents de sable. Dans le but de compléter les informations sur le climat du Sahara, nous donnerons en outre quelques renseignements sur les températures, durées d'ensoleillement, évaporation et radiations, bien que ces paramètres soient secondaires pour nous.

## 2.2. Précipitations et humidité relative

Certaines précipitations apparaissent au Sahara, mais rarement. Il s'agit de pluies, brouillards, rosées, gelées blanches, et dans certaines régions, neige. Les plus faibles précipitations au Sahara Algérien ont lieu en général au cours du mois de Juillet, et les plus importantes sont réparties suivant les dispositions géographiques, de Novembre à Février.

### 2.2.1. Caractéristiques principales des pluies sahariennes

Les pluies sahariennes sont caractérisées par leur courte durée : quelques minutes ou heures. Exceptionnellement, en hiver, elles peuvent persister plusieurs heures et quelquefois, plusieurs jours (au voisinage du Soudan).

Les variations relatives des hauteurs annuelles et mensuelles des pluies augmentent au fur et à mesure que la pluviosité diminue : plus une région est aride, plus les jours de gouttes ou de traces de pluies sont prédominants, c'est-à-dire les jours où les pluies ne sont pas mesurables ( $< 0,1$  mm) par les moyens techniques actuels. La fréquence de ce type de pluies est élevée au Sahara Algérien. Le total des pluies mesurables ou non est de 1,5 à 3,4 fois plus élevé que celui des pluies mesurables ( $> 0,1$  mm), [21].

Quelquefois ont lieu au Sahara de fortes pluies, dont la hauteur dépasse 30 mm en 24 heures; elles peuvent se

produire plusieurs fois dans le courant de l'année. Ces pluies ont en général lieu en Septembre et Octobre, mais jamais en Juin et Juillet. Pour la période 1950-1959, R. HAYENCON 1261 a constaté des précipitations maximales en 24 heures à Ouargla, In Salah, Biskra et Tindouf, dont les hauteurs atteignaient respectivement 32, 45, 69 et 82,6 mm.

Les pluies sahariennes peuvent être orageuses ou non. La proportion des orages par rapport aux pluies mesurables est plus élevée en été qu'en hiver, et cela pour toutes les régions. Ce phénomène a déjà été constaté dans plusieurs stations climatologiques où le nombre de jours d'orages est supérieur au nombre de jours de pluie. Il peut même y avoir des manifestations orageuses au cours d'un mois sans qu'il y ait la moindre précipitation durant celui-ci. Au Sahara Algérien, le nombre d'orages non accompagnés de pluies diminue vers le Nord. L'absence de pluies au niveau du sol au cours des orages est vraisemblablement causé par l'évaporation des gouttes de pluie au cours de leur chute. La période d'orages sans pluies est accompagnée d'une brume sèche due à des poussières en suspension dans l'air (21).

Le nombre de jours de pluie au Sahara est très faible par rapport à celui de la côte méditerranéenne. Le nombre moyen de jours où les précipitations ont été supérieures ou égales à 1 mm est compris entre 50 et 75 au bord de la mer, tandis qu'il est de 2 à 28 par an au Sahara Algérien, (In Salah : 2; Hassi Messaoud : 7; In Amenas : 4; Tamanrasset : 8; Laghouat : 28). La fréquence des pluies supérieures ou égales à 10 mm est encore plus réduite (In Salah : 0,5; Hassi Messaoud : 2; In Amenas : 1; Tamanrasset : 2; Laghouat : 4; mais à Alger : 21 jours par an) (24).

TABLEAU 2.1

Hauteurs maxima des pluies mensuelles en mm (période 1926-1960) ; sur base de 1211.

Région du Sahara Algérien	Janv.	Fév.	Mars	Av.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
OUARGLA	34	18	29	32	13	8	0	2	5	32	47	34
GHARDATA	47	34	41	71	20	12	5	2	5	32	47	34
EL GOLEA	49	38	36	14	5	9	0	10	14	64	51	46
IN SALAH	50	8	46	21	9	2	0	20	4	17	47	23
DJANET	65	20	12	16	32	10	2	5	49	12	42	39
TAMANRASSET	50	15	5	32	88	29	18	74	96	19	34	43

Remarque : toutes les valeurs sont arrondies aux nombres entiers.

Les stations les plus élevées des hauteurs maximales des pluies sont celles relevées par J. DUBIEF 1211 dans quelques régions du Sahara Algérien, durant la période 1926-1960. La hauteur maximale a été enregistrée à Tamanrasset : 96,4 mm pour le mois de Septembre.

### 2.2.2. Caractéristiques principales des précipitations occultes

Parfois au Sahara, ont lieu des phénomènes de rosée, de gelée blanche (couche mince d'eau d'origine atmosphérique condensée sur ou près du sol) et de brouillard (eau en suspension dans l'air). Les renseignements sur ce genre de précipitations sont peu nombreux pour l'ensemble du Sahara. On trouve seulement quelques données sur les brouillards au Sahara Algérien. La fréquence moyenne d'apparition de brouillards dans cette région (tableau 2.2) est de l'ordre de 2 fois par an (à Alger : 22 fois). Cette fréquence peut être plus élevée ; pour Hassi Messadou et In Amenas par exemple, au cours de l'année 1972, le brouillard est apparu respectivement 7 et 4 fois (tableau 2.2.a).

### 2.2.3. Humidité relative

L'humidité relative moyenne mensuelle ou annuelle de l'air au Sahara est toujours moindre que celle de l'Europe ou du Bassin Méditerranéen. Les moyennes mensuelles vont de 14 % (In Salah, Juillet) à 63 % (El Oued, Décembre) et les moyennes annuelles de 23 % (Tamanrasset) à 48 % (In Salah). Les valeurs correspondantes sur la côte méditerranéenne algérienne sont de 67 à 81 % et de 72 à 78 %. Mais les valeurs maximales, dans presque toutes les régions du Sahara algérien, atteignent au moins une fois par an 90 à 100 %. Les durées de ces conditions d'humidité sont en général très brèves, mais elles peuvent néanmoins se mesurer quelquefois en heures.

TABLEAU 2.2.

Nombre moyen mensuel et annuel de brouillard (période 1960-1969 ; 1241.

Région du Sahara Algérien	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Anné
Hassi Messaoud	X	X	0	X	0	0	0	X	0	0	X	X	1
Ouargla	X	0	0	0	0	0	0	0	X	0	X	1	1
Ghardaïa	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X	0	0	X
El Goléa	X	0	0	X	0	0	X	0	0	X	X	X	X
In Amenas	0	X	0	0	X	0	0	X	0	0	X	X	1
In Salah	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X	0	0	X
Djanet	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tamanrasset	0	0	0	0	0	X	X	0	X	0	0	X	1
Alger	5	4	4	2	5	4	4	4	3	2	3	3	42

X = Fréquences inférieures à 1/2 de jour.

Les précipitations et l'humidité au Sahara, malgré leur faible fréquence d'apparition, créent beaucoup de difficultés pour l'exploitation des isolateurs haute tension, surtout au cours des orages qui provoquent des surtensions dans les réseaux haute tension.

### 2.3. Les orages

Les sources d'informations sur les orages au Sahara, utilisées dans la présente étude, sont : J. DUBIEF [24] et l'ENEMA [23], [24]. Dans [21], on trouve une carte de la fréquence des orages pour l'ensemble du Sahara (Fig. 2.1), dans [23] un tableau de jours d'orages pour le Sahara Algérien (tableau 2.3), dans [24] quelques détails relatifs aux orages à Hassi Messaoud et In Amenas (tableau 2.4). Certaines informations importantes sur le nombre de décharges sur les lignes HT et le comportement des isolateurs au cours de ces décharges nous ont été données par les services spécialisés de la SONATRACH dans les deux centres pétroliers précités.

Tous ces renseignements concordent et nous montrent que les orages au Sahara sont moins fréquents qu'en Europe et dans le Bassin Méditerranéen, mais qu'il y a au moins un jour d'orages par an dans toutes les localités du Sahara Algérien. Le tableau 2.3 donne le nombre de jours d'orages par an dans de nombreuses régions algériennes. Dans les zones côtières, ce nombre atteint 36 (Alger), par contre, dans les zones sahariennes, ce nombre descend parfois à 1 (In Salah).

Il existe un rapport entre le nombre de jours d'orages et le nombre de décharges atmosphériques sur  $1 \text{ km}^2$  de surface de sol. D'après J.L. JAKUBOWSKI [29], le nombre des décharges se produisant sur  $1 \text{ km}^2$  de surface, pour chaque jour d'orage en Europe Centrale, est compris entre 0,1 et 0,2.

Ceci est confirmé pour la région de In Amenas. D'après les informations locales, le nombre annuel des décharges atmosphériques sur In Amenas sur la ligne 60 kV (longue  $L = 120$  km, haute  $H = 12$  m environ) est compris entre 8 et 12. D'après JAKUBOWSKI 1291 la surface correspondante à cette ligne est approximativement égale à  $S = 10 \cdot H \cdot L = 10 \cdot 12 \cdot 10^{-3} \cdot 120 = 14,4 \text{ km}^2$ . Le nombre de décharges atmosphériques sur  $1 \text{ km}^2$ , pour 4 jours d'orages par an à In Amenas est donc compris entre 0,56 et 0,80.

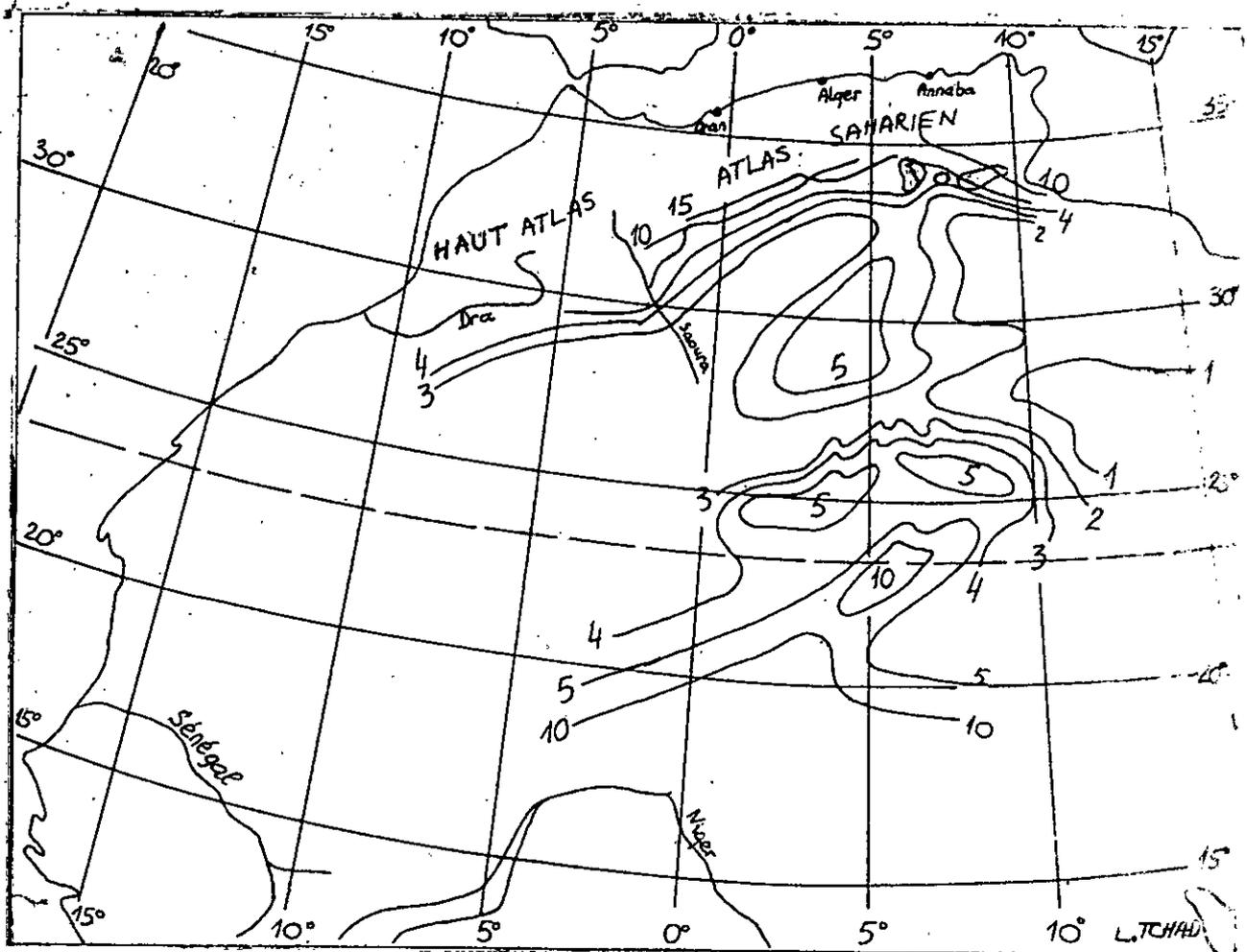


Fig.2.1.

Nombre annuel des jours d'orages au Sahara, d'après J. Dubief 1161.

TABLEAU 2.2.a

Précipitations occultes à Hassi Messaoud et In Amenas au cours de l'année 1972 (24).

	Hassi Messaoud			In Amenas		
	Rosée	Gelée bl.	Brouillard	Rosée	Gelée bl.	Brouillard
Janvier	-	-	4	-	-	1
Mai	-	-	-	-	-	1
Octobre	-	-	-	-	2	-
Novembre	-	-	1	-	-	-
Décembre	2	1	2	2	-	1
Année 1972	2	1	7	2	2	3

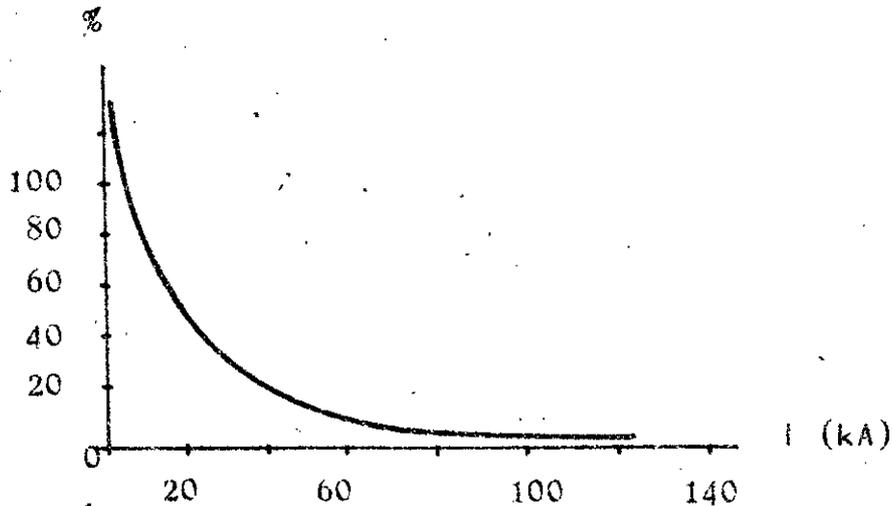


Fig. 2.2.

Courbe des fréquences cumulatives des valeurs de crête des courants de foudre, d'après BLITZSCHUTZ (29).

TABLEAU 2.3

Nombre moyen mensuel et annuel de jours d'orages - (période 1960-1969), 1231.

Régions du Sahara Algérien	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
HASSI MESSAOUD	X	0	X	X	X	1	0	X	1	1	X	0	4
OUARGLA	X	0	1	X	1	1	0	1	1	1	X	X	5
GHARDAIA	X	X	X	X	1	1	1	X	1	1	X	0	5
TIMIMOUN	0	0	X	X	1	0	0	X	X	X	0	0	2
IN AMENAS	0	X	0	X	1	1	0	X	X	1	X	X	4
LAGHOAT	0	X	1	1	4	3	3	4	4	2	X	X	22
IN SALAH	0	X	X	X	X	0	0	X	0	0	0	X	1
DJANET	0	0	1	X	2	1	X	1	2	X	0	1	7
TAMANRASSET	X	X	X	1	1	2	1	2	2	1	X	X	12
ORAN	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2	1	16
ALGER	2	3	3	3	3	4	3	2	4	4	4	4	36
ANNABA	3	3	2	2	2	3	1	3	4	4	2	3	29

X = fréquences inférieures à 1/2 de jour.

Les courants de décharges atmosphériques n'ont pas été mesurés au Sahara et il est difficile de donner une précision quelconque sur leurs valeurs. On peut supposer cependant que la courbe de fréquence cumulative des courants de foudre au Sahara ne se distingue pas de celle de l'Europe Centrale. La figure 2.3 représente une courbe de fréquences cumulatives des valeurs de crête des courants de foudre, d'après BLITZSCHUTZ 1291 ; d'après elle, dans 50 % des cas, les courants ne dépassent pas 20 kA.

Il y a une différence entre les paramètres atmosphériques avant et après les orages. Le tableau 2.4 représente les valeurs des pressions, des températures, de l'humidité relative et des vitesses de l'air définissant les conditions atmosphériques au cours des orages et l'heure d'apparition de ceux-ci. L'auteur a établi ce tableau à partir des renseignements trouvés dans les coduments internes de la station météorologique de l'ENEMA 1191 de Hassi Messaoud. En analysant le tableau 2.4, on peut donner les limites des paramètres atmosphériques comme suit :

- pression au moment de l'apparition d'un orage :
  - 991 à 1003 milibars,
- différence entre la pression au début et à la fin des orages :
  - 13 à + 28 milibars,
- humidité relative après orage : 16 % à 64 %,
- différence entre l'humidité relative au début et à la fin des orages :
  - 5 % à + 16 %,
- température de l'air après orage : 19 à 40° C,
- vitesse maximum du vent pendant les orages : 12 à 23 m/s.

Le tableau 2.4 montre aussi qu'au cours de l'année 1972, les orages sont apparus à Hassi Messaoud dans la plupart des cas entre 17 et 18 h (MGT).

On a constaté que les décharges atmosphériques causées par les coups de foudre directs apparaissent sur les lignes haute tension de Hassi Messaoud et d'In Amenas. Lorsque ces décharges se produisent dans des conditions défavorables (surfaces des isolateurs pollués et mouillées en même temps), elles provoquent des contournements des isolateurs.

TABEAU 2.4

Conditions atmosphériques caractérisant des orages à Hassi Messaoud au cours de l'Année 1972 ; 1241.

2.15

Grandeur	Mars	Juin	Juil.	Sept.	Oct.	Nov.
heure (h) de l'apparition de l'orage	17	18	18	21 ; 23	11	24
pression (milibar) au moment d'apparition de l'orage	998	994	997	998 ; 991 995 ; 992	1003	996
température (°C) après l'orage	23	36	39	34 ; 34 29 ; 39	26	19
humidité relative (%) après l'orage	29	16	17	45 -	53	64
vitesse max. (m/s) du vent au cours de l'orage	23	16	13	18 ; 16 15 ; 13	12	20
Différence entre le début et la fin du phénomène : (milibar)	14	14	10	10 ; 7 28 ; 8	24	- 13
(%)	16	2	10	9 ; 4 - 3 ; - 3	3	- 5

Remarque : toutes les valeurs sont arrondies aux nombres entiers

## 2.4. Les vents de sable et dépôts naturels

On appelle "vent de sable" tout vent transportant une quantité importante de particules au-dessus d'une surface de plusieurs kilomètres carrés. Le diamètre moyen de ces particules est de  $1/16$  mm, 1301.

Le vent de sable est un phénomène typiquement saharien qui se produit très souvent, parce que dans cette région les pourcentages de temps calmes sont assez faibles (Timimoun 5 %, In Amenas 10 %, Hassi Messaoud 15 %). Ils n'ont lieu en principe que le jour ; durant la nuit ils sont rares, sauf dans les régions suivantes : Atlas Saharien et son Sud immédiat, régions au Nord-Est et à l'Ouest du Massif Central Saharien. Cela est peut-être lié à la grande fréquence de vents d'origine orageuse qui n'atteignent leur plein développement qu'en fin d'après-midi.

Les vents de sable du secteur Est débutent en général aux environs de 8 heures 1301 pour cesser au début de l'après-midi, tandis que ceux du secteur Ouest ne commencent qu'aux environs de midi pour s'arrêter brusquement au coucher du soleil. La durée des vents de sable croît de la périphérie vers le centre du Sahara, et des massifs montagneux vers les plaines.

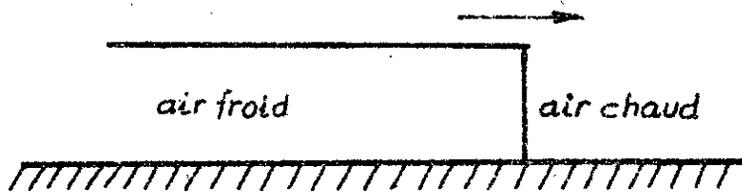
La quantité de sable transportée par les vents peut être considérable : pour un front d'un mètre, elle est de 3 à  $64 \text{ m}^3$  par an, 1301.

La hauteur des vents de sable peut aller de quelques centimètres à quelques kilomètres. Les vents de sable élevés sont créés par le mécanisme de la génèse des cumulonimbus de front froid (27) quand l'instabilité turbulente intense se produit à l'avant du front par la différence de vitesse entre les couches moyennes de l'air froid, non freinées par le frottement sur le sol, et celles freinées par le sol.

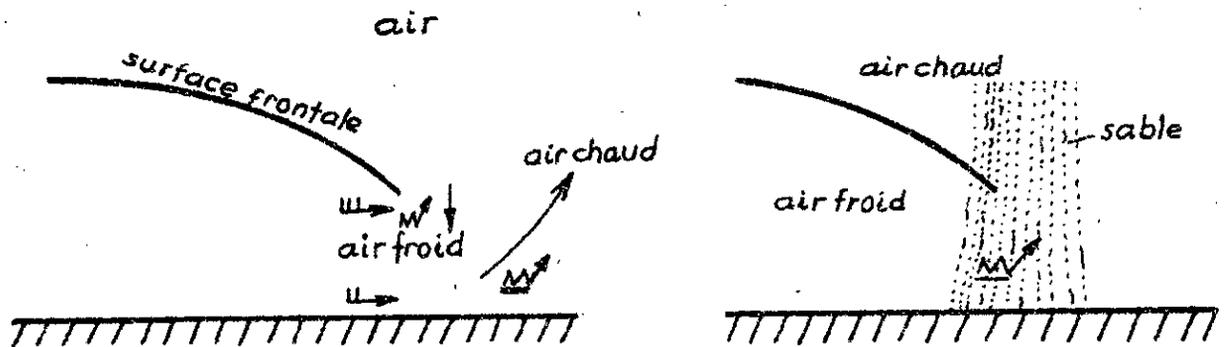
2.17.

Les masses d'air froid descendantes à l'avant du front déterminent une ascension rapide des masses d'air chaud. Cela est expliqué schématiquement dans la figure 2.3.

Depuis le moment où le sable est enlevé par l'air jusqu'au moment où il retombe immobile sur le sol, le grain de sable passe par un cycle composé des trois stades suivants .



a) structure théorique d'un front froid déterminant une discontinuité de pression.



c) formation de vents de sable

b) vitesses différentes des couches froides moyennes et de celles au niveau de sol.

Fig. 2.3

Principe de formation de vents de sable d'après G. TSCHIRNART [22].

## 2.19.

Au cours du premier stade ("arrachement") les grains les plus fins sont entraînés les premiers. La quantité de sable croît jusqu'à saturation de l'air par le sable. Dans l'air saturé par le sable, les vitesses de l'air et du sable sont les mêmes.

Au cours du deuxième stade ("transport") la plus grande partie des grains de sable est entraînée en reptation (roulage) tandis qu'une proportion très faible est transportée en saltation et en suspension. La saltation s'effectue en l'air à une hauteur dépendant de la nature du terrain (la hauteur moyenne est de 1,5 m environ).

Au cours du troisième stade ("dépôt") les grains de sable tombent sur le sol ou sur les objets. Ce stade est le plus intéressant pour la présente étude.

Le dépôt de grains de sable au Sahara s'effectue de trois façons : par "sédimentation", par "atterrissage", et par "accrochage".

Le dépôt de sédimentation est le seul mode à envisager pour les grains de sable très fins, transportés en suspension sur de grandes distances. Ces grains sont littéralement transportés au sein des masses d'air et ils peuvent atteindre des altitudes de quelques kilomètres. Les grains tombent librement. Leur vitesse horizontale au niveau des surfaces sur lesquelles ils tombent est très faible pour qu'ils soient repris par le vent ou pour arracher d'autres grains.

Les dépôts d'atterrissage apparaissent lorsque la vitesse du vent en surface diminue ; les grains sont poussés sur la surface jusqu'à ce qu'ils aient trouvé une position protégée.

Le dépôt d'accrochage est formé à la suite d'accrochage de grains de sable à un obstacle qui arrête leur déplacement (par exemple : une dénivellation de la surface).

Le dépôt qui se forme sur des isolateurs situés à l'extérieur des bâtiments à une hauteur supérieure à quelques mètres est principalement dû à la sédimentation mais aussi partiellement à l'atterrissage et l'accrochage, surtout lorsque les surfaces des isolateurs sont rugueuses ou graissées.

Les vents de sable provoquent des surtensions dans les réseaux électriques sahariens, ce qui crée des difficultés aux utilisateurs. La forme et les valeurs de ces surtensions ne sont pas connues jusqu'à présent et ne constituent pas le sujet de notre recherche.

## 2.5. Autres caractéristiques de climat au Sahara

### 2.5.1. Température

Pour les équipements haute tension en utilisation au Sahara, on peut distinguer quatre cas de montages différemment exposés à la température : montage extérieur sans protection contre le soleil ou avec protection, montage intérieur et montage souterrain (câbles).

Pour les décharges glissantes qui ont lieu dans l'air, près des surfaces des isolateurs propres, les variations de températures dans les limites caractérisant le Sahara, ne sont pas d'un grand intérêt car la densité de l'air dépend de la température absolue et la constante diélectrique des diélectriques non organiques reste pratiquement inchangée pour des températures allant jusqu'à 200° C.

Pour les surfaces polluées, les hautes températures ont certainement une influence positive, car elles sèchent le dépôt et augmentent sa résistance superficielle.

La température des très basses couches de l'atmosphère terrestre est en grande partie sous l'influence de la température de la surface de la terre. Cette dernière dépend des conditions atmosphériques locales, de la situation géographique et de la nature de la surface (couleur, orientation, végétation). Les amplitudes annuelles des températures au Sahara Algérien diminuent avec l'altitude et la proximité de la mer.

Les limites des températures de l'air sous abri au Sahara Algérien (231, 1241), sont les suivantes :

température maximale : ..... de 40° C à 50° C  
 température moyenne : ..... de 20° C à 26° C  
 température minimale : ..... de -6° C à 0° C

Les températures de l'air au soleil et celles du sol sont beaucoup plus élevées. Très peu de données existent sur les températures des couches d'air voisines du sol et surtout sur celles des objets exposés au soleil à différentes hauteurs. Selon quelques renseignements obtenus de la part d'utilisateurs des réseaux HT de Hassi Messaoud et d'In Amenas, la température des isolateurs haute tension exposés au soleil à des hauteurs de 3 à 14 m peut dépasser de 35° C à 20° C celle des isolateurs sous abri conventionnel.

La température maximale du sable à la surface du sol peut atteindre des valeurs très élevées : par exemple, à Tamanrasset, on a mesuré 84° C (251).

TABLEAU 2.5.

Température, Humidité et Vitesse du vent à Hassi Messaoud ; d'après 123<sup>(x)</sup> et 1241

Grandeur	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	
Température en °C	maxima	20	29	31	34	38	47	48	47	45	37	25	20
	minima	0	0	4	7	9	19	23	18	17	6	11	0
	moyenne(x)	11	14	17	21	26	31	40	34	29	23	16	11
Humidité relative %	maxima	100	88	97	94	89	52	56	67	80	96	98	95
	minima	10	9	9	10	9	9	9	9	9	15	13	22
	moyenne(x)	59	46	40	34	29	25	22	26	36	45	53	59
Vitesse (m/s)													
maxima du vent	18	28	23	18	22	24	16	21	20	16	20	19	

La température du sol varie beaucoup dans le courant de la journée : elle est la plus élevée vers 13 heures et la plus basse au lever du soleil. La valeur moyenne journalière est, en général, la moyenne de ces deux températures. La variation de la température à la surface du sol dans le courant de la journée peut dépasser 40° C. A l'intérieur du sol, cette variation diminue de telle manière qu'à 10 cm de profondeur, elle n'atteint pas 20° C et qu'à 20 cm de profondeur, elle se limite à 5° C.

#### 2.5.2. Quelques données sur l'insolation et l'évaporation au Sahara

La durée d'insolation au Sahara est beaucoup plus importante qu'en Europe ou dans le Bassin Méditerranéen. Elle dépend de la disposition géographique. Par exemple, le nombre annuel de jours d'insolation continue est de 73 à Laghouat, 182 à Hassi Messaoud, 196 à In Amenas, 166 à In Salah, tandis qu'il est de 36 à Alger. Cela provoque au Sahara une intense évaporation, qui atteint une valeur moyenne annuelle pouvant aller jusqu'à 500 cm, tandis qu'à Alger, elle est de 110 cm environ (231). Le phénomène d'évaporation est important pour le séchage des dépôts sur des isolateurs haute tension.

#### 2.5.3. Quelques données sur les radiations au Sahara

Les radiations solaires au Sahara sont également plus intenses que celles du Bassin Méditerranéen, où elles sont gênées par les grandes quantités d'eau contenues dans l'air. Mais leurs valeurs exactes ne sont pas connues. La valeur maximale de radiation mesurée à Tamanrasset entre 12 h et 13 h au mois de Janvier est de 1,56, et la minimale au mois de Juin est de 1,33 cal/cm<sup>2</sup>.mn (à Alger : 1,37 en mars, et en Juillet-Août 1,14 cal/cm<sup>2</sup>.mn.).

## 2.24.

Les radiations solaires sont partiellement réfléchies et partiellement absorbées par la terre. L'énergie réfléchie est assez élevée au Sahara. M. FRAILLETAZ 1291 a mesuré à Tamanrasset, entre 9 h et 13 h et à 1,60 m au-dessus d'un sol de nature calcaire une énergie réfléchie de  $0,7 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{mn}$ .

En fonction de sa température, la terre émet aussi ses rayonnements propres. L'énergie de ces rayonnements au Sahara est environ 40 à 53 % 1251 de cette envoyée par le soleil à la limite de l'atmosphère.

Les objets placés à proximité de la terre, au Sahara, sont soumis à un échauffement par le haut et par le bas, ce qui donne la possibilité d'un séchage uniforme des isolateurs des lignes.

Le tableau 2.5 donne pour Hassi Messaoud les valeurs de températures, d'humidité et de vitesses des vents qui ont été obtenues par la station météorologique correspondante. Ces valeurs ne se différencient pas beaucoup de celles d'In Amenas.

Au chapitre suivant, nous étudierons l'influence des conditions climatiques du Sahara sur les manifestations de la pollution des surfaces des isolateurs haute tension et sur leur comportement en cours d'exploitation.

## CHAPITRE III

DEPOTS NATURELS SUR LES ISOLATEURS  
AU SAHARA

## 3.1. Réseaux haute tension dans les régions étudiées

A l'heure actuelle, les régions les plus industrialisées du Sahara Algérien sont les centres pétroliers de Hassi Messaoud et d'In Amenas. Dans ces deux régions existent des réseaux haute tension sur lesquels certaines expériences ont été déjà faites, surtout en ce qui concerne la fréquence et les conséquences des décharges atmosphériques.

Ces deux régions sont représentatives sur les plans climat et géologie d'une grande partie non seulement du Sahara Algérien, mais aussi de l'ensemble du Sahara, en particulier de Tunisie et de Lybie.

Hassi Messaoud et In Amenas sont situés dans le Grand Erg Oriental. Leurs coordonnées géographiques [31] sont :

	Altitude	Latitude	Longitude
Hassi Messaoud	142 m	31°40	6°09 Est
In Amenas	561 m	28°03	9°38 Est

Les caractéristiques climatiques de Hassi Messaoud et d'In Amenas ont été données au chapitre précédent ; elles sont situées dans les limites définies pour le Sahara Algérien.

### 3.2

Les tensions et les longueurs des lignes haute tension existantes sont données au tableau 3.1.

Tableau 3.1. : Tensions et longueurs des lignes existantes dans les deux régions

	5,5 kV	15 kV	30 kV	60 kV
Hassi Messaoud	20 km	15 km	30 km	en cours de montage
In Amenas	30 km	110 km	-	120 km

Ces lignes sont surtout aériennes, mais il existe quelques portions de lignes souterraines (5,5 et 15 kV). La plupart d'entre-elles sont en service depuis plus de dix ans.

De nombreux systèmes isolants haute tension, exposés aux dangers d'apparition d'étincelles glissantes, sont actuellement en exploitation. Il s'agit (liste non limitative) de :

Montage extérieur : - isolateurs de traversée des transformateurs de puissance et de murs.

Montage intérieur : - isolateurs de traversée des cloisons ;

- têtes de câbles ;

- isolateurs des disjoncteurs et des transformateurs de mesure ;

- têtes de sorties des enroulements des stators des machines tournantes.

Les tensions nominales de ces systèmes isolants, à l'exception des transformateurs de puissance, correspondent à la tension nominale des réseaux.

### 3.3.

L'utilisation des réseaux haute tension dans les deux régions pétrolières est permanente et les coupures éventuelles causent de très grandes pertes. Pour cette raison, ces réseaux sont réalisés avec certains équipements électriques largement surdimensionnés.

### 3.2. Critères actuels de choix des isolateurs haute tension

Les documents concernant les installations haute tension en service ou en projet à Hassi Messaoud et In Amenas ne précisent pas clairement les critères de base utilisés pour le choix des tensions nominales des isolateurs haute tension. Il s'agit des conditions sahariennes qui ont influencé le dimensionnement des isolateurs actuellement installés. Cela peut s'expliquer par le manque de données précises sur le comportement des isolateurs en utilisation dans de pareilles conditions.

Les projets des réseaux électriques à Hassi Messaoud prévoient un surdimensionnement des isolateurs de traversée des transformateurs de puissance pour montage extérieur. Les autres types d'isolateurs de traversée ont des dimensions qui correspondent aux tensions de service. Les documents techniques de la nouvelle centrale thermique à Hassi Messaoud ("Haoud El Hamra") 1321, déjà en utilisation, prévoient pour les isolateurs de traversée des transformateurs de puissance de 12,5 MVA, 30 kV, installés à l'extérieur "des bornes HT isolées à 45 kV". Les surdimensionnements prévus dans les projets existants sont justifiés par quelques lignes à la page 6 du descriptif de cette centrale :

### 3.4.

"... Les vents de sable se manifestent encore ici et ont une influence sur l'isolement électrique des organes extérieurs. En effet, ces vents sont la cause de phénomènes électro-statiques qui nécessitent un surisolement. On est d'ailleurs limité dans cette voie par le fait que la sécurité finie par augmenter relativement peu en regard des dépenses au delà d'une augmentation de 50 % de l'isolement..."

"... En plus de la baisse d'efficacité des isolateurs provoquée par le sable en suspension dans l'air, la sécheresse de l'atmosphère nuit à la bonne tenue de la plupart des isolateurs courants".

"Toutes ces conditions locales ont conduit :

1. à dimensionner très largement le matériel électrique et plus particulièrement les contacts et les câbles ;

2. à utiliser des câbles secs (isolements butyl et gainage néoprène ainsi que des vernis à l'épreuve de la sécheresse) ;

3. à surisoler les lignes et les bornes HT et BT des transformateurs élévateurs à l'extérieur ;

4. à établir des réseaux équipotentiels pour les circuits de terre réunis à un forage dans la nappe phréatique".

Ces restrictions et précautions sont purement empiriques et l'auteur de la présente étude n'a pu trouver dans tous les projets des installations existantes de référence à des études théoriques, à des essais ou même à des résultats statistiques d'incidents d'exploitation. Il n'existe donc aucune justification exacte des critères employés pour le choix des isolateurs haute tension destinés aux réseaux sahariens.

### 3.5.

Les rares statistiques existantes montrent que des surtensions sont à l'origine de tous les incidents dangereux dans les installations haute tension dans les deux régions étudiées (les surtensions ayant pour origine des manoeuvres sont beaucoup moins graves que celles d'origine atmosphériques, ceci en raison du niveau actuel des tensions de service).

#### 3.3. Comportement des isolateurs haute tension en cours d'exploitation au Sahara

Les surtensions d'origine externe (atmosphériques et liées aux vents de sable) ou d'origine interne (manoeuvres, changement du régime de travail des réseaux) n'ont pas causé jusqu'à présent de dommages sur les isolateurs haute tension du type traversée même lorsqu'ils étaient à la fois recouverts par des couches de sable et mouillés. On peut expliquer cette constatation par le fait que, déjà lors du projet d'installation, on a prévu pour des isolateurs de traversées un surdimensionnement (tension nominale de 45 kV au lieu de 30 kV par exemple). En employant des isolateurs du type traversée de tension nominale correspondant à celle du réseau, c'est-à-dire non surdimensionnés, on aurait sans doute obtenu des contournements pendant les orages. Cette supposition est confirmée par le fait que les isolateurs, choisis d'après la tension nominale du réseau, et qui en général ont une meilleure tenue diélectrique que les traversées, ont été plusieurs fois contournés pendant des orages, et même mis hors service.

### 3.4. Manifestations principales de la pollution au Sahara

Les dépôts sur les isolateurs haute tension, utilisés au Sahara, proviennent principalement du phénomène de sédimentation des particules se trouvant dans l'air. Ces particules peuvent avoir des compositions chimiques différentes en fonction du genre de pollution de l'atmosphère.

La pollution atmosphérique, dans le cadre de cette étude, peut être définie comme la présence dans l'air de particules constituant à partir d'une certaine concentration un danger pour la tenue électrique des isolateurs.

Les sources principales de la pollution de l'atmosphère au Sahara peuvent être de trois natures :

- a) sable saharien porté par les vents de sable ;
- b) eau atmosphérique sous forme de précipitations ;
- c) fumée de gaz industriels brûlés, sortant des torchères pétrolières ou qui se produisent au cours des incendies accidentels.

La pollution des isolateurs et d'autres objets par le sable fin est un processus permanent quel que soit le type de montage, extérieur ou intérieur. Dans les deux cas, une couche de sable se dépose sur les surfaces des isolateurs. La forme et les dimensions de cette couche dépendent du type de montage des isolateurs, de leur forme géométrique, de leur disposition par rapport à la terre et surtout de l'état de leur surface.

Il existe, en général, une très grande différence entre les types de couches de sable formées sur les isolateurs extérieurs et les isolateurs intérieurs.

La couche de sable sur des isolateurs disposés à l'extérieur des bâtiments peut être discontinue ou continue. Cela dépend de l'état de surface.

Les couches de sable discontinues au Sahara se forment le plus souvent de telle manière que le sable se rassemble aux environs immédiats de l'électrode et donne à cet endroit une couche complète, tandis que les parties d'isolateur plus distantes de l'électrode sont recouvertes par des agglomérats isolés de sable. L'existence de la couche complète aux abords de l'électrode peut s'expliquer par l'accumulation du sable dans les fentes existant à ces endroits et par des raisons électriques dues à l'influence des forces électrostatiques sur les grains de sable se trouvant à proximité des parties métalliques, endroits où le champ électrique est le plus intense. Les électrodes sont en général symétriques : la couche de sable provoquée par les forces électrostatiques est donc régulièrement répartie autour d'elles.

L'agglomération des grains de sable autour des électrodes d'un isolateur HT a été étudiée par d'autres auteurs, par exemple en Suède par N. KNUDSEN et L. HERMANS (331). Ces deux auteurs ont proposé une formule selon laquelle le vecteur d'accélération d'un grain de sable dans un point considéré dépend du vecteur de l'intensité du champ électrique, de la vitesse relative de l'air et de la gravité dans ce point. Tenant compte que les forces qui agissent sur un grain, sont maximales là où le champ est maximal (surtout près d'électrode active) la quantité de sable la plus grande sera à cet endroit.

La couche de sable continue se présente au Sahara lorsque la surface est couverte par une couche fine d'huile minérale, de noir de fumée ou d'eau régulièrement répartie. Dans le cas d'huile ou de noir de fumée, le sable est collé à la surface et les vents ne l'enlèveront pas ; dans le cas de couche d'eau, le sable est peu adhérent et, après séchage, les vents pourront l'enlever.

a)

b)

c)

Fig. 3.1. Pollution naturelle de deux bouteilles en verre : a) vue générale ;  
b) et c) vue partielle.

### 3.9.

Les isolateurs haute tension qui se trouvent à proximité des zones industrielles pétrolières sont soumis à une pollution permanente de la part de la fumée des torchères et des centrales thermiques. Les vitres des bâtiments situés près des torchères sont noircies de telle manière qu'elles deviennent souvent opaques. Les fumées des centrales électriques noircissent les isolateurs situés à leur proximité, mais beaucoup moins que les torchères situées aux mêmes distances.

Quelquefois, les isolateurs des transformateurs de puissance et de mesure, et les isolateurs des disjoncteurs haute tension peuvent être aussi pollués par les fuites d'huile de ces appareils.

A l'extérieur des bâtiments, on peut donc avoir deux cas principaux de pollution. Sur les isolateurs qui se trouvent loin des centres pétroliers, la pollution se manifeste sous la forme d'une couche discontinue de sable fin ayant une granulométrie régulière. Son épaisseur varie : elle est plus importante au voisinage des électrodes et sur les parties des isolateurs bien protégées du vent, où elle peut atteindre jusqu'à 2 mm, et plus faible sur les surfaces non protégées des vents, où elle dépasse rarement 0,2 mm. Sur les isolateurs extérieurs qui se trouvent à proximité des centres pétroliers, la pollution se manifeste principalement sous forme soit d'une couche continue de sable régulière répartie soit sur une pellicule de noir de fumée, soit sur une pellicule d'huile. A ces endroits, on peut avoir des cas de pollution des isolateurs à la fois par l'huile, noir de fumée et sable. L'épaisseur de la couche de sable déposé au cours d'une année sur le noir de fumée ou l'huile peut parfois dépasser 2 mm.

Les couches de sable se trouvant sur des isolateurs montés à l'extérieur des bâtiments sont presque toujours sèches, mais quelquefois, pendant des rosées, des brouillards ou des pluies sahariennes, elles deviennent humides.

Dans les cas de traces de pluie, les gouttes d'eau solitaires sont absorbées entièrement par la couche de sable car la quantité d'eau déposée est inférieure à la capacité d'absorption d'eau par le sable. Dans ces cas-là, la plus grande partie de la couche de sable reste sèche.

Dans les cas de pluies sahariennes bien développées, le sable est entièrement mouillé ; la quantité d'eau déposée est souvent supérieure à celle nécessaire à la saturation du sable. Nous appellerons l'eau qui s'égoutte des isolateurs et qui contient certains composants chimiques de sable dissout "eau de lavage du sable".

La couche de sable sur les isolateurs installés à l'intérieur de bâtiments est presque dans tous les cas continue et constituée par du sable fin sec ayant une granulométrie régulière et une épaisseur assez importante, dépendant de la disposition des isolateurs et de la fréquence de nettoyage. Cette épaisseur peut souvent croître de 3 mm au cours d'une année. Le sable sec sur les isolateurs intérieurs peut s'enlever facilement par simple soufflage par exemple.

Les caractéristiques électriques de cette couche varient dans le cas d'une humidité élevée de l'air. Ces variations n'ont pas eu à ce jour de conséquences importantes, ni à Hassi Messaoud, ni à In Amenas, puisque les statistiques n'indiquent aucun contournement des isolateurs intérieurs.

Les couches de sable à Hassi Messaoud et In Amenas sont perméables à l'air et peu adhérentes à la surface des isolateurs et, en conséquence, entre la couche et la surface, on a toujours des inclusions d'air. Dans ces deux régions on n'a pas trouvé des couches imperméables, complètement adhérentes à la surface, c'est-à-dire des couches sans inclusions d'air. Pour cette raison, les couches de sable de ce dernier genre ne constituent pas l'objet de la présente étude.

Pour les mêmes conditions d'exposition, les couches de sable sur les isolateurs extérieurs d'In Amenas sont plus épaisses que sur ceux de Hassi Messaoud. Les caractéristiques physiques et chimiques des deux sables sont différentes et expliquent ces divergences.

Les figures 3.1 à 3.2 montrent quelques cas de pollution dans les régions étudiées.

La figure 3.1 représente deux bouteilles qui ont été exposées pendant deux mois à Hassi Messaoud, à l'extérieur du bâtiment d'énergie, à 1,50 m au-dessus du sol. L'une était propre à l'origine, l'autre recouverte d'une pellicule graisseuse fine d'huile de transformateur. La bouteille propre à l'origine est couverte (fig. 3.1.b) partiellement par une couche de sable dont l'épaisseur ne dépasse pas 0,2 mm environ (on voit sur la photographie de la figure 3.1.a par transparence, l'étiquette collée de l'autre côté de la bouteille).

Par contre, la bouteille graisseuse est totalement recouverte par une couche de sable dont l'épaisseur est de l'ordre de 1 mm (au cours du transport, la couche de sable a été enlevée en certains endroits), fig. 3.1.c.

DEUXIEME PARTIE

*E*TUDE *E*XPERIMENTALE

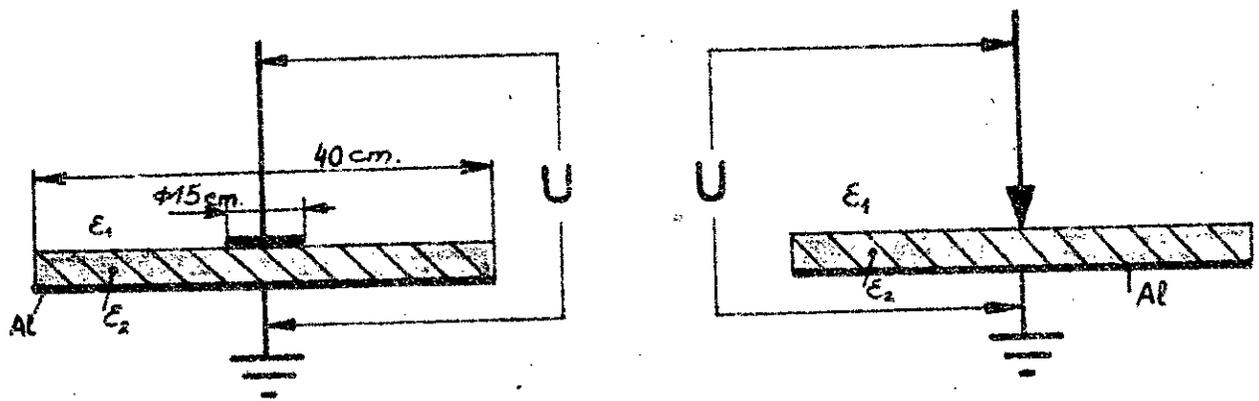
## CHAPITRE IV

MODELES EXPERIMENTES ET  
METHODES DE MESURES

## 4.1. Modèles expérimentés

Les modèles expérimentés dans cette étude sont ceux qui ont déjà été employés par la plupart des chercheurs précédents, c'est-à-dire le modèle "plat" et le modèle "cylindrique" (fig. 4.1). Ces deux modèles présentent un avantage réel, car la forme des décharges glissantes qui apparaissent sur eux est plus simple que celle des décharges qui apparaissent sur des isolateurs haute tension réels. La forme symétrique de ces systèmes donne la possibilité de mesurer la capacité spécifique superficielle par des méthodes simples et d'apprécier facilement la distribution du champ et la répartition de la tension le long de la surface du diélectrique. Les résultats qui seront obtenus lors des essais de ces deux modèles non pollués seront comparables aux résultats des recherches d'autres auteurs.

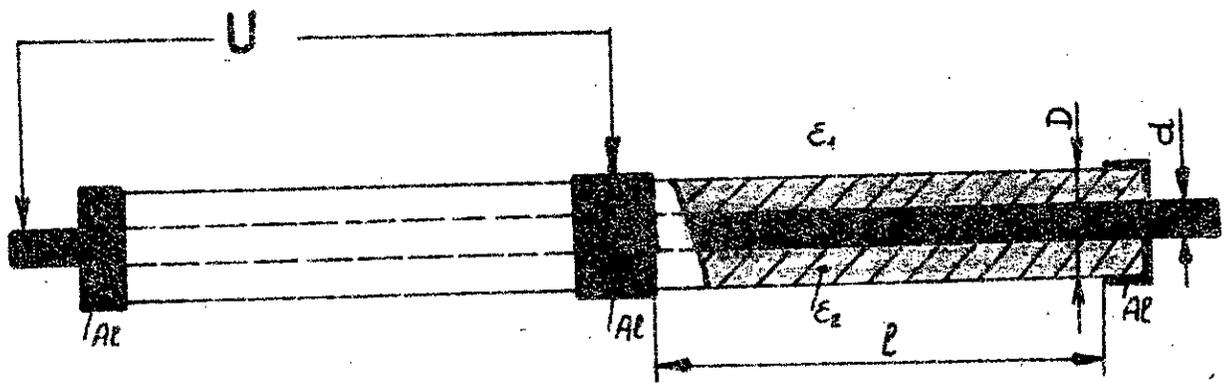
Dans le modèle plat (fig. 4.1.a), une plaque de diélectrique solide est placée entre une électrode plate de grandes dimensions (contre-électrode) et une électrode de petites dimensions (électrode active). Le modèle cylindrique (fig. 4.1.b) est composé d'un tube isolant lisse avec à l'intérieur une électrode cylindrique (contre-électrode) et à l'extérieur un anneau (électrode active).



Electrode active plate

Electrode active point

a) Modèles plats



b) Modèle cylindrique

Fig. 4.1

Modèles employés pour étudier les décharges glissantes.

### 4.3.

C'est sur le modèle plat que l'auteur a effectué les essais les plus complets. Sur le modèle cylindrique les essais se sont limités à la vérification des principaux résultats obtenus sur le modèle plat. Quelques mesures ont été effectuées aussi sur des isolateurs réels, pollués au Sahara et sur des isolateurs réels pollués au Laboratoire (fig. 4.2.).

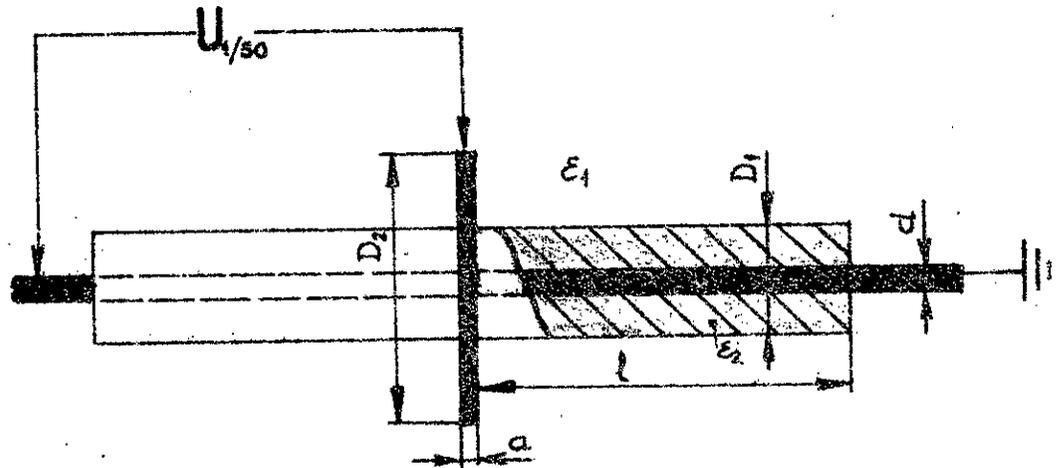
Les diélectriques choisis sont des plaques et des tubes en verre et en plexiglas. Le verre ( $\epsilon_r = 7,5$ ) a été pris comme matériel principal car il est surtout utilisé pour les isolateurs. A titre de comparaison, on a utilisé aussi le plexiglas, dont la constante diélectrique ( $\epsilon_r = 4$ ) et l'état de surface sont différents de ceux du verre.

Le changement de la capacité spécifique superficielle était obtenu en superposant plusieurs plaques de diélectriques ayant des épaisseurs allant de 2 à 40 mm environ. L'assemblage des plaques a été fait de telle manière que les couches d'air entre les plaques soient éliminées. Pour cela, il a été utilisé du "gas-oil"\* comme adhésif, liquide isolant, régulièrement réparti en couches très minces sur les surfaces des diélectriques à assembler. Le gas-oil a aussi été utilisé pour la pose des électrodes sur les diélectriques.

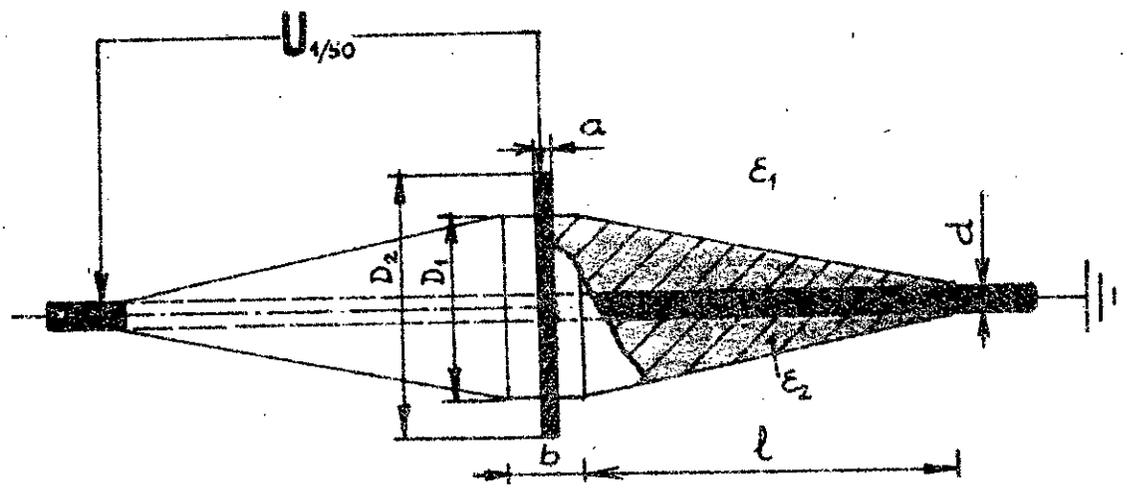
Les électrodes des modèles expérimentés étaient en feuilles d'aluminium dont l'épaisseur était de 0,1 mm.

Avant la pose du gas-oil sur les diélectriques solides, leurs surfaces ont été nettoyées et séchées soigneusement ce qui a permis d'exclure les influences des inclusions éventuelles. Le dégraissage a été effectué avec du trichloréthylène, conformément aux normes NF C 26-230.

\*gas-oil = huile extraite par distillation du pétrole brut entre 250 et 350°C.



a)



b)

Fig. 4.2

Modèles réels : a) pollués au Sahara et au Labo  
 b) pollués au Labo

#### 4.2. Equipement de base du Laboratoire haute tension de l'E.N.P Alger

Au début de cette étude, le Laboratoire HT de l'E.N.P d'Alger n'existait pas encore. Parallèlement aux études théoriques, l'auteur, pendant deux ans, a assuré sous la direction du Professeur J.L. JAKUBOWSKI, l'étude, la réalisation et l'organisation de ce Laboratoire, ce qui lui a permis d'adopter au mieux l'équipement prévu aux impératifs de la présente étude.

L'équipement du laboratoire comporte deux groupes d'essais :

- a) transformateur 300 kV, 50 Hz, 50 kVA,
- b) générateur de choc à 8 étages, 600 kV, 4 kJ, donnant en particulier des ondes de chocs normalisées 1,2/50 us.

L'ensemble de l'équipement du laboratoire est de marque "Haefely".

Le générateur de choc (fig. 4.3) peut être couplé de différentes manières, en série et en parallèle. Au cours des recherches sur les modèles plats, dans presque tous les cas, on a utilisé le générateur couplé en 2 étages, constitués chacun par 4 condensateurs en parallèle. La tension maximale qui pourrait être obtenue de cette manière était de l'ordre de 150 kV, mais les besoins n'ont jamais dépassé 100 kV. Les recherches sur les modèles cylindriques et réels ont été effectués avec le couplage précité et avec le couplage en série complète.



Fig. 4.3.

Générateur de choc avec  
l'antenne de couplage  
pour la mise en marche  
de l'oscillographe.



Fig. 4.4.

Chambre noire permettant  
photographies de contact.

## 4.7.

Les caractéristiques principales du générateur sont :

	couplage en 2 étages	couplage en série complète
- tension de charge $U_s$	150 kV	600 kV
- capacité de choc $C_s$	360 nF	22,5 nF
- charge capacitive de base (en parallèle à l'objet essayé) $C_b$		2 nF
- résistance série externe (réglage de durée du front) $R_{se}$	150 $\Omega$	
- résistance série interne par étage (réglage de durée de queue) $R_{si}$	10 $\Omega$	
- résistance parallèle par étage $R_{pe}$	430 $\Omega$	
- inductance du circuit	15 $\mu H$	29 $\mu H$
- forme d'onde selon CEI N°60	1,2/50 $\mu s$	

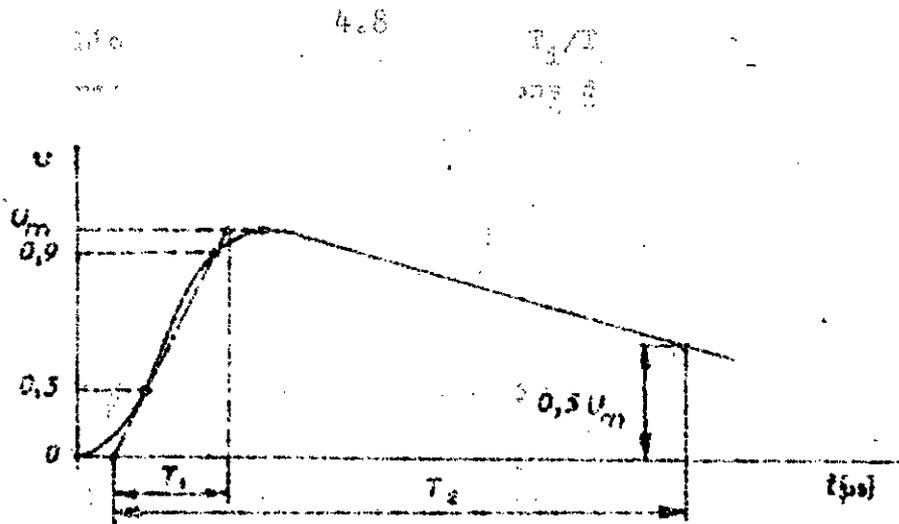
La capacité de choc du générateur était, quel que soit le couplage, très supérieure aux capacités des modèles expérimentés en cours de décharge.

La figure 4.5 représente le schéma équivalent de l'ensemble de l'installation d'essai.

### 4.3. Méthode de mesure de tension

La méthode de base de mesure de la tension d'amorçage des étincelles glissantes était la méthode oscillographique, avec l'oscillographe connecté à un diviseur de tension de choc. Dans plusieurs cas, on a employé aussi un éclateur à sphères.

Le diviseur utilisé, en résistance pure, est branché au générateur de choc par l'intermédiaire d'une résistance d'amortissement  $R_a$  de 200  $\Omega$ . Il est composé de deux résistances : une résistance du bras haute tension 20 000  $\Omega$  et une autre, démontable du bras basse tension 72,28  $\Omega$ .



L'onde de tension de choc  $T_1/T_2 = 1,2/50 \mu s$ ,  
 représentant des surtensions d'origine  
 atmosphérique.

## 4.9

La liaison entre le diviseur et l'oscillographe est effectuée par un câble coaxial, dont l'impédance est de 76  $\Omega$ . Comme ce câble se termine du côté de l'oscillographe par une résistance égale à son impédance d'onde, il n'y a pas d'onde réfléchie et en conséquence, l'impédance du câble est connectée en parallèle au bras basse tension du diviseur. Si on désire diminuer le rapport du diviseur, on peut éliminer la résistance du bras basse tension en laissant le câble coaxial connecté seul sur le diviseur.

L'oscillographe a aussi un diviseur interne (RC) à haute impédance, formant ainsi un atténuateur à 10 positions, permettant de mesurer les tensions jusqu'à 1500 V maximum. Il peut enregistrer des signaux de durées très variables avec l'échelle des temps de 0,1 à 5000  $\mu$ s entre deux marques de temps, grâce à un enregistreur photographique automatique. A chaque oscillogramme correspondent 10 marques de temps.

L'axe de temps de l'oscillographe était mis en marche au moyen d'une antenne disposée à 1 m de distance environ des éclateurs de couplage du générateur de choc (fig. 4.3). L'axe avec les marques de temps et la tension d'étalonnage sont fournies par les sources internes de l'oscillographe.

En employant l'oscillographe pour la mesure des tensions on a photographié les courbes sur l'écran. Le film utilisé pendant les enregistrements était type "Ilford" HP4, de sensibilité 27 DIN.

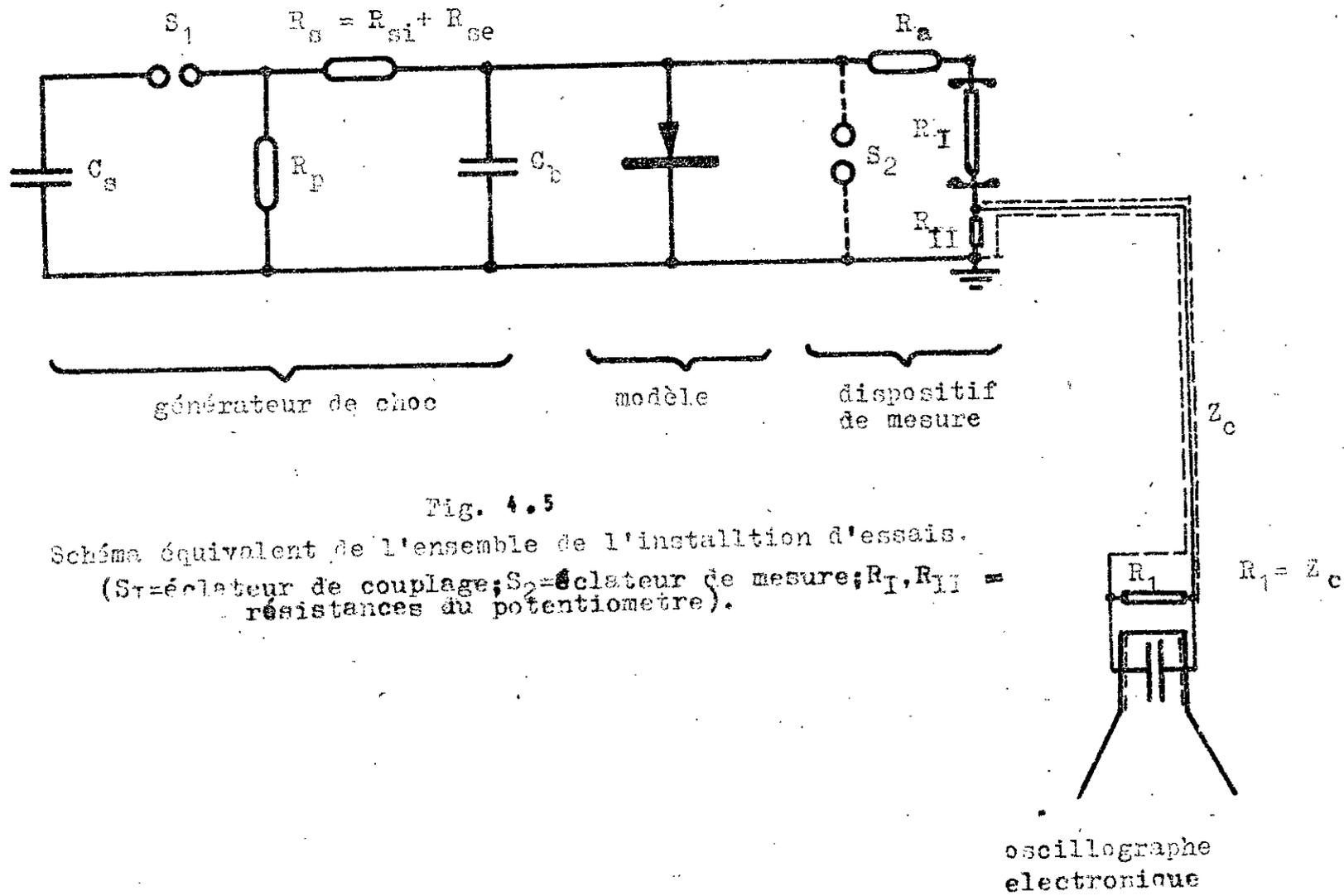


Fig. 4.5

Schéma équivalent de l'ensemble de l'installation d'essais.

( $S_1$  = éclateur de couplage;  $S_2$  = éclateur de mesure;  $R_I, R_{II}$  = résistances du potentiomètre).

#### 4.11.

Les caractéristiques principales de l'oscillographe sont :

- zone de déflexion linéaire ..... 6 x 10 cm
- vitesse de balayage maximale ..... 0,14 cm/ $\mu$ s
- vitesse d'inscription maximale .... 30 cm/ $\mu$ s
- retard au déclenchement environ.... 0,1  $\mu$ s

La méthode oscillographique de mesure de tension nécessite beaucoup de temps. Pour obtenir des résultats plus rapides, surtout dans le cas de modèles "auxiliaires" (voir ci-après) on a employé l'éclateur horizontal à sphères de diamètre 6,25 cm dont la plage de mesure normalisée pour les ondes pleines avec une sphère mise à la terre est de 14,2 à 107 kV. L'éclateur utilisé permet de régler les distances des sphères avec une précision de 0,01 mm.

On a activé les électrodes de l'éclateur par la création de micropointes sur ses surfaces, qui contribuent à fournir les premiers électrons des avalanches. Ces micropointes sont créés en frottant les surfaces des électrodes avec du papier de verre extra fin.

Les résultats des mesures obtenues avec l'éclateur ont été vérifiés plusieurs fois par des mesures oscillographiques et les résultats obtenus étaient suffisamment concordants pour que la mesure des tensions par l'éclateur soit considérée comme admissible, ce dans un souci de gain de temps.

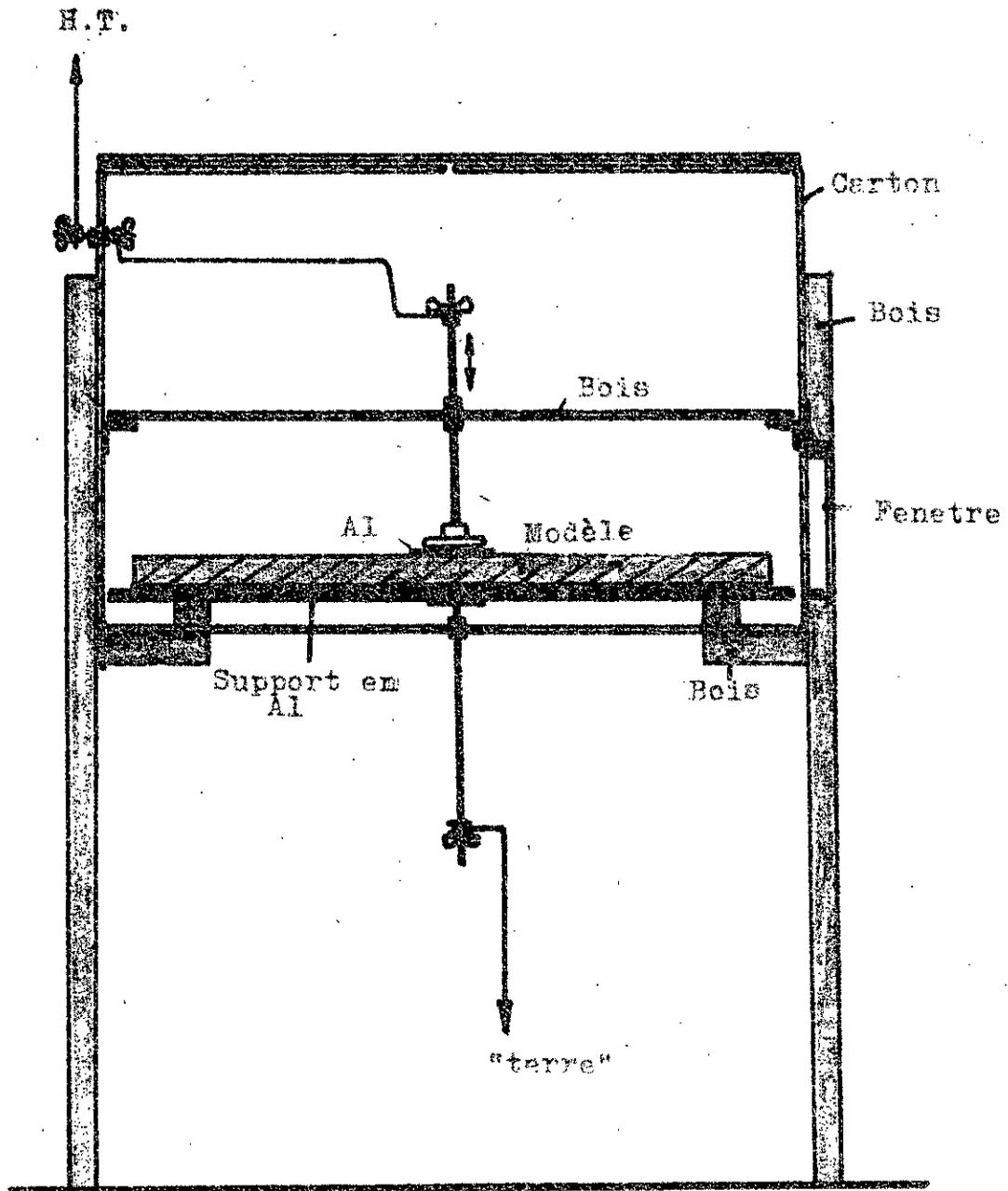


Fig. 4 - 6

Modèle plat à l'intérieur de la chambre noire.

#### 4.4. Méthode d'observation d'apparition d'étincelle glissante

La mesure de la tension initiale d'amorçage d'étincelle glissante ( $U_e$ ) est liée étroitement à la constatation de son apparition. Pour cette constatation sont en général utilisées trois méthodes différentes, soit :

- a) matérialisation des traces de décharges (des figures) sur les surfaces des diélectriques solides recouvertes par une couche spéciale très fine de poudre, de graisse, ou de noir de fumée,
- b) méthode photographique,
- c) méthode visuelle et acoustique.

La matérialisation des traces des décharges au moyen de poudre est une méthode classique et reconnue. Elle est basée sur l'action des forces électrostatiques du champ électrique qui subsiste un certain temps après la disparition de la tension, grâce à la charge retardée sur la surface du diélectrique solide. Pour que les figures des décharges soient le plus visible possible, même dans les détails les plus fins, on utilise en général la poudre de deux matériaux de couleurs différentes (par exemple soufre et minium) qui se chargent de polarités différentes au moment de leur mise en place. L'image de l'étincelle glissante dans ce cas sera limitée et bien visible. Les canaux de décharge laissent des traces visibles aussi lorsque la surface du diélectrique solide est couverte d'une pellicule d'une matière grasse ou de noir de fumée.

La méthode photographique de contact conduisant aux photogrammes est actuellement la plus utilisée et est considérée comme très valable, car tous les détails des décharges glissantes peuvent être conservés et étudiés. Cette méthode se base sur l'influence de la lumière produite par la décharge sur la couche sensible du film (ou du papier

photographique) se trouvant à une petite distance de la décharge, ou bien sur l'influence directe de la décharge lorsqu'elle se déroule sur la surface même du film (ou du papier photographique).

Les appareils photographiques, situés à distance, ne donnent pas autant de détails que la photographie de contact.

L'étincelle glissante est accompagnée de phénomènes acoustiques et optiques caractéristiques qui peuvent permettre de constater son apparition par l'observation directe. Les observations de ce genre ont un caractère subjectif.

En principe, on pourrait constater l'apparition de l'étincelle glissante en se basant sur les mesures simultanées de la tension et du courant. Cette méthode, très difficile, n'est pas développée jusqu'à présent.

Dans certains cas, pour trouver par l'observation directe la valeur approximative de la tension d'amorçage de l'étincelle glissante sans provoquer la modification des conditions initiales du phénomène par la charge résiduelle sur la surface du modèle principal ou par la détérioration de cette surface, on a employé un modèle auxiliaire identique au modèle principal étudié. L'apparition de l'étincelle glissante sur ce modèle était constatée au moyen de poudre, de noir de fumée ou par effet acoustique et optique. Après cette constatation sur le modèle auxiliaire, cinq mesures étaient effectuées au moyen de la photographie de contact sur le modèle principal pour des valeurs de tension comprises entre 0,9 et 1,10  $U_e$  où la tension  $U_e$  correspond à la tension initiale d'apparition de l'étincelle glissante sur le modèle auxiliaire. Dans presque tous les cas, l'étincelle a été obtenue dans ces limites de tension. Ce principe d'observation a été adopté pour les surfaces des diélectriques solides propres

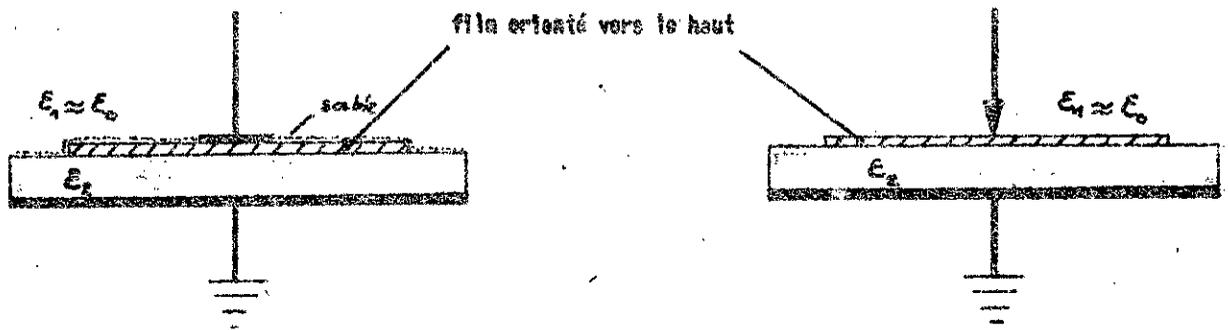


Fig. 4.7

Disposition du filin sur des surfaces polluées par du sable sec; Electrode active sur le filin.

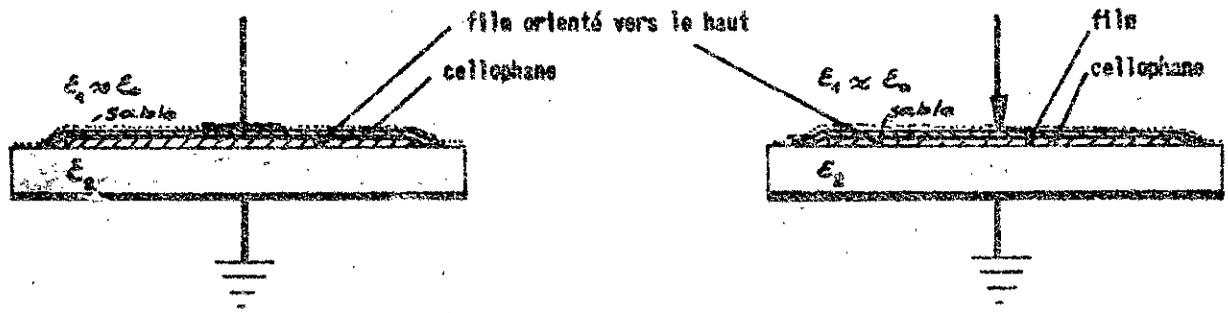


Fig. 4.8

Disposition du filin sur des surfaces polluées par du sable mouillé; Electrode active sur la feuille de cellophane.

et pollués par des couches très minces de sable sec.

Les essais se sont déroulés dans l'obscurité totale. Le modèle étudié était placé dans une chambre noire munie d'une fenêtre d'observation (fig. 4.4). L'électrode active était en contact avec une tige réglable dans le sens vertical et reliée à la haute tension. La fenêtre d'observation permettait la manipulation du modèle (fig. 4.6).

Au moment de l'enlèvement du film du modèle, après les décharges, des étincelles "parasitaires" se produisaient entre le film et la surface avec laquelle il était en contact. Cette difficulté a été résolue, le film n'étant enlevé qu'après neutralisation de la charge électrique retardée sur la surface du diélectrique (environ 15 à 30 minutes après la disparition de la tension). Dans d'autres cas, on a introduit un papier mince opaque entre le film et la surface du diélectrique solide.

#### 4.5. Disposition du film

La méthode photographique de contact employée dans la présente étude est basée sur l'admission que le film utilisé possède une si grande résistivité superficielle et une si faible épaisseur que sa présence ne modifie pas la distribution du champ à la surface du modèle. Au cas où le film est mis directement en contact de la surface expérimentée, et sous l'électrode active, on peut considérer en approximation l'ensemble "diélectrique-film" comme équivalent au diélectrique seul. Cependant, si l'épaisseur du diélectrique est faible, l'influence du film ne peut plus être négligée.

Le principe de mise en place du film a été tel que la face du film sensible à la lumière était dirigée vers la décharge. Dans la plupart des cas, c'est la direction vers l'extérieur de la surface du diélectrique ; l'exception s'est présentée lors d'investigations sur des surfaces

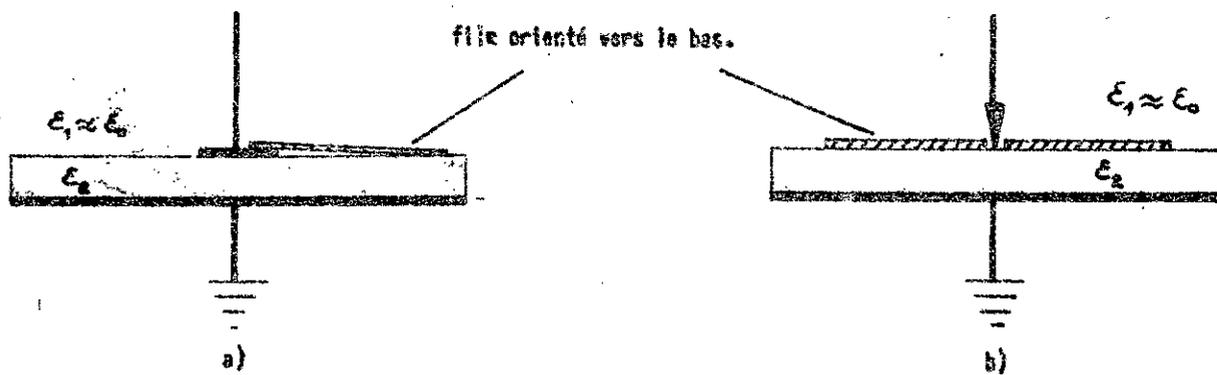


Fig. 4.9

Disposition du film sur des surfaces propres; Electrode active sur la surface étudiée.

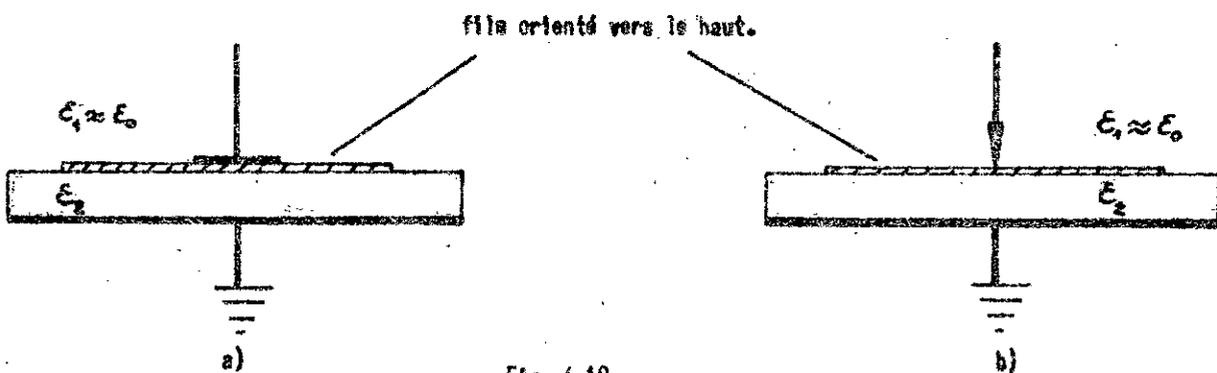


Fig. 4.10

Disposition du film sur des surfaces propres; Electrode active sur le film.

propres ou couvertes d'une couche très mince de sable sec : dans ces cas-là, en accord avec d'autres auteurs, on a orienté le film vers la surface expérimentée, l'électrode active étant en contact direct avec cette surface, ou bien vers l'électrode active, avec l'électrode au-dessus du film (fig. 4.7 et 4.8).

Dans le cas de couches de sable humide, on a employé, pour isoler la couche sensible du film de l'humidité du sable, une pellicule de cellophane transparente (épaisseur inférieure à 0,1 mm). Ici, le film et la cellophane peuvent également être considérés comme parties intégrantes du diélectrique.

Les figures 4.7 à 4.10 présentent schématiquement la disposition du film par rapport à la surface expérimentée, l'électrode active et la couche polluante.

#### 4.6. Mesure de la capacité spécifique superficielle

Pour mesurer la capacité spécifique superficielle, on a employé un modèle plat à trois électrodes : une électrode protégée circulaire, un anneau de garde concentrique et une électrode non protégée de l'autre côté du diélectrique (fig. 4.11). Les électrodes sont là aussi constituées par des feuilles d'aluminium. La préparation des surfaces du diélectrique et la pose des électrodes sur elles étaient faites de la même manière que pour le cas du modèle expérimenté (paragraphe 4.1.).

Comme appareil de mesure, on a employé un pont de schering "Tettex" (type 2801) alimenté par 1000 V, 50 Hz. Les condensateurs normaux utilisés étaient des capacités comprises entre 10 et 100 nF. Ce pont permet de mesurer les capacités avec une précision de 0,04 %.

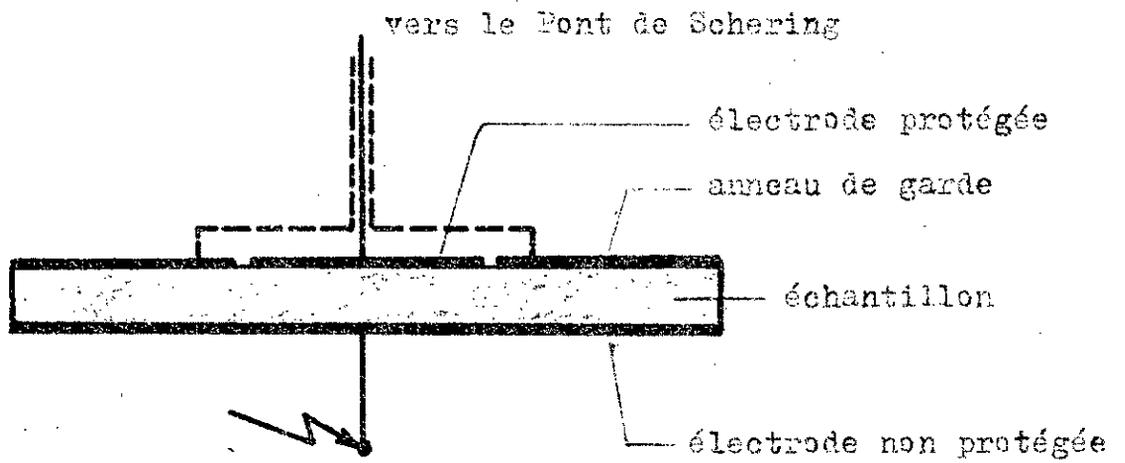


Fig. 4. 11

Condensateur composé d'échantillon plat et trois électrodes, utilisé pour la mesure de capacité superficielle .

Les dimensions des échantillons étaient en général de 40 x 40 cm. Le diamètre de l'électrode protégée était de 199 mm, la distance entre celle-ci et l'anneau de garde de 1 mm. Le diamètre effectif de l'électrode protégée était donc approximativement égal à  $199 + 1 = 200$  mm, et la capacité spécifique superficielle du modèle plat égale à la capacité mesurée divisée par  $100 \times \pi$ .

#### 4.7. Mesure des résistivités

D'après les normes françaises C20-215 la résistivité superficielle est définie comme le quotient du gradient du potentiel mesuré parallèlement au courant par le courant qui traverse l'unité de largeur de la surface comprise entre deux électrodes placées à la surface de l'isolant.

Dans la présente étude, la résistivité superficielle était mesurée sur un modèle (fig. 4.12) ayant des électrodes coaxiales qui sont disposées sur la même face de plaques de verre ou de plexiglas et entre lesquelles est appliquée la tension de mesure.

Une électrode de garde recouvre la totalité de la face opposée du modèle. Les électrodes sont en feuilles d'aluminium mince. Elles sont fixées sur le diélectrique à l'aide d'une couche adhérente du "gas-oil" comme dans le cas des modèles pour l'étude des décharges glissantes (article 4.1).

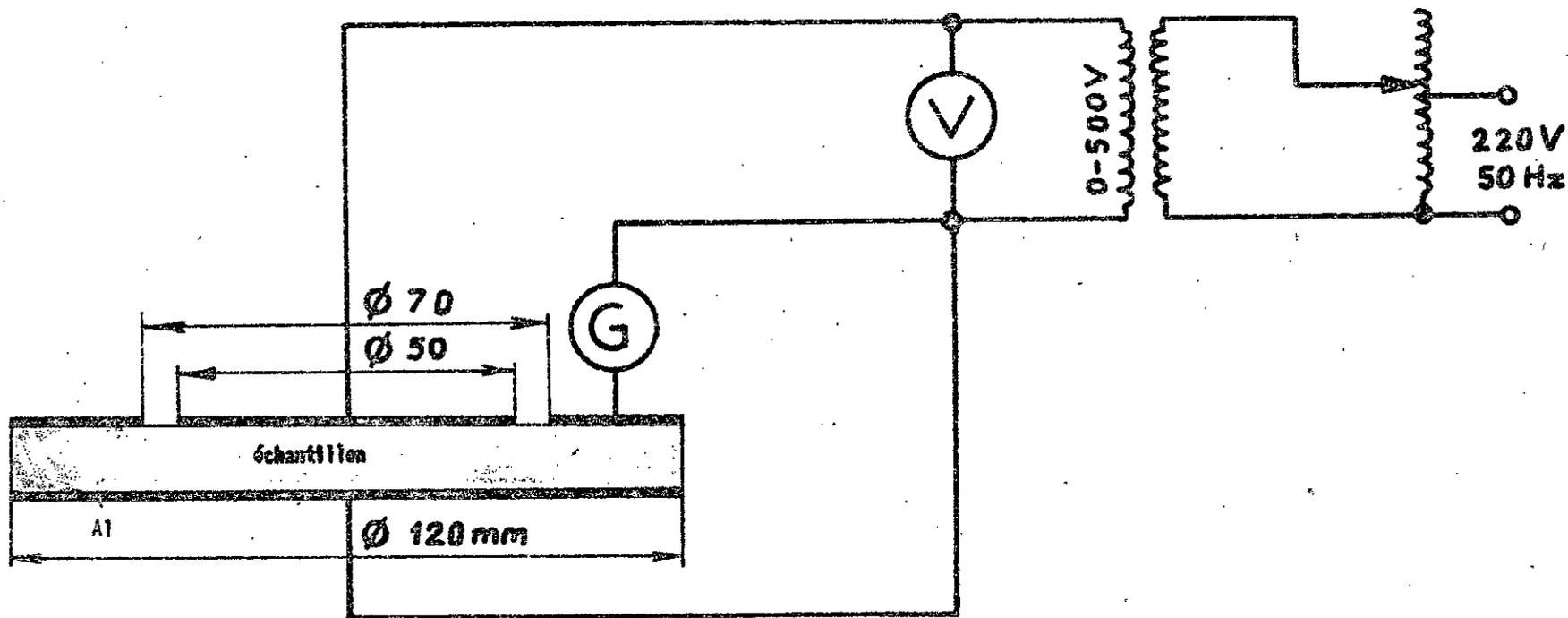


Fig. 4. 12

Mesure de la résistivité superficielle d'échantillon plat.

Pour les petites résistivités superficielles de l'ordre de  $10^6$  à  $10^9 \Omega$  on a utilisé pour la mesure, la tension alternative de 50 Hz qui permet d'éviter la polarisation électrolytique. Pour des plus grandes résistivités on a employé la tension continue, qui n'introduit pas des courants capacitifs pouvant fausser la mesure.

Dans les cas de mesure de la résistivité superficielle des modèles pollués par des couches de sable mouillé la valeur maximale de la tension était 15 V/cm (c'est-à-dire 1,5 kV/m), ce qui est en accord avec les recommandations de la Commission Electrotechnique Internationale CEI 1341. La durée de la mise sous tension correspondait au temps très court, nécessaire pour la lecture rapide de valeurs  $U$  et de  $I$ , ce qui a permis d'éviter l'assèchement de la couche.

Dans les cas de mesure de la résistivité des modèles propres ou couverts par des couches de sable sec, la valeur de tension était de 250 V et la durée de mise sous tension de 60 s environ. Même avec cette valeur de tension (25 kV/m) les courants étaient difficiles à mesurer à l'aide de galvanomètre employé.

## CHAPITRE V

CREATION EN LABORATOIRE  
DE DEPOTS ARTIFICIELS

## 5.1. Généralités

Dans ce chapitre seront exposées les méthodes employées en Laboratoire par l'auteur, destinées à créer sur les surfaces des modèles plats des dépôts polluants reproduisant ceux qui se forment sur les isolateurs haute tension dans les deux régions sahariennes étudiées.

Comme on l'a déjà constaté au chapitre III, les couches de sable formées sur les isolateurs au Sahara peuvent avoir une structure perméable ou non perméable à l'air. Dans le premier cas, entre les grains de sable d'une part, entre la couche de sable et la surface du diélectrique d'autre part existent des inclusions d'air ; qui rendent possible le développement des décharges à proximité de la surface des isolateurs. Dans le second cas, la couche est cimentée en premier lieu par le calcaire et le gypse, et se colle complètement à la surface des isolateurs ; les décharges superficielles éventuelles peuvent seulement se produire dans ce cas au-dessus de la couche. A Hassi Messaoud et In Amenas, seuls se produisent sur les isolateurs des dépôts perméables. Ces dépôts sont les suivants :

- 1) couches de sable continues ( surtout - isolateurs situés à l'intérieur des bâtiments)
- 2) couches de sable discontinues (surtout - isolateurs situés à l'extérieur des bâtiments et loin des

## 5.2.

centres pétroliers)

- 3) couches de sable continues sur une pellicule de noir de fumée (surtout - isolateurs situés à proximité des torchères pétrolières et des centrales thermiques)
- 4) couches de sable continues sur une pellicule (surtout - isolateurs de traversée de transformateurs et de disjoncteurs à huile).

Ces quatre types principaux de couches polluantes, comme on l'a déjà mentionné au paragraphe 3.4, peuvent se trouver soit à l'état sec, soit à l'état mouillé.

Les diverses méthodes actuellement utilisées pour créer des dépôts artificiels, dûes à différents auteurs (H. VON CRON et G. REVERY, H. JOSSE, L. GION, G. GREGOIRE, H.V. TREUFELS 1331) ou de la CEI, publiées en 1973 [34] ont pour but de reproduire artificiellement les caractéristiques des isolateurs pollués et de simuler aussi exactement que possible les phénomènes et les conditions rencontrés en cours de service. Ces méthodes permettent de créer des couches conductrices uniformes, solides ou liquides. Pour les utiliser, il est donc nécessaire de connaître les caractéristiques des couches se présentant "in situ", dans notre cas : au Sahara. Tenant compte que les caractéristiques des couches de sable perméables à l'air, qui se forment sur des surfaces des isolateurs haute tension en exploitation à Hassi Messaoud et In Amenas n'ont pas été jusqu'à présent étudiées, une des méthodes actuellement utilisées pour la création des dépôts artificiels en Laboratoire n'a pas pu être appliquée par nous.

### 5.3.

Dans la présente étude, les couches du type 1) à 4) sont créées en Laboratoire par des sables (secs, séchés ou mouillés) provenant de Hassi Messaoud ou de In Amenas. On a constaté au chapitre III que dans tous les cas de pollution des isolateurs, quel que soit leur montage et leur état de surface, ce sable constituait la composante prépondérante du dépôt naturel. L'utilisation du même sable qu'au Sahara garantira la reproduction de la plupart des propriétés des dépôts.

### 5.2. Caractéristiques physiques et chimiques des sables de Hassi Messaoud et In Amenas

Avant d'aborder les problèmes de création de dépôts artificiels en laboratoire, nous préciserons quelques caractéristiques physiques et chimiques des sables de Hassi Messaoud et In Amenas.

Les caractéristiques physiques étudiées ici sont la granulométrie et la forme des grains des deux sables, tandis que les caractéristiques chimiques concernent les composants chimiques principaux des deux sables.

En vue de ces analyses, des échantillons des deux sables ont été prélevés à la surface du sol et sur les surfaces d'isolateurs installés à 1,5, 3 et 10 m du sol.

L'analyse granulométrique a été réalisée au moyen d'une série de tamis de différents calibres, allant de 1 mm à 0,05 mm. L'étude de la forme des grains a eu lieu à l'aide d'une loupe binoculaire.

L'analyse granulométrique et l'étude de la forme des grains ont été effectuées après lavage et séchage des échantillons.

#### 5.4.

Les analyses chimiques et minéralogiques quantitatives du sable au sol ont été réalisées par les méthodes classiques, tandis que l'analyse qualitative des sables des différents niveaux l'a été par la méthode spectrale.

Les analyses physiques et chimiques ont été effectuées par le Laboratoire Central des Recherches Scientifiques de la Société Nationale de Recherche Minière (SONAREM) - Alger, et l'analyse spectrale, par le Département des Mines de l'École Nationale Polytechnique - Alger.

Les résultats des analyses granulométriques des deux sables ont montré que les grains se trouvant sur les surfaces des isolateurs montés au-dessus du sol étaient de dimensions beaucoup plus petites que ceux se trouvant à la surface du sol.

Aux niveaux 10 et 3 m, les grains sont très bien calibrés : leur calibre restait dans tous les cas inférieur à 0,7 mm.

Au niveau 1,5 m, les grains étaient encore bien calibrés, bien que leur calibre atteigne jusqu'à 0,07 mm.

Au niveau du sol, par contre, on a trouvé des grains beaucoup plus volumineux. Les résultats d'analyse des sables de ce niveau sont reportés dans le tableau 5.1.

L'analyse montre que la forme des grains de sable des deux régions est à peu près identique. Les grains de 0,5 mm sont des grains de quartz bien arrondis de forme ovoïde et très rarement sphérique. Les grains de 0,4 à 0,14 mm sont presque tous des grains semi-arrondis, tandis que les grains de 0,10 à 0,05 mm sont soit angulaires, soit semi-arrondis.

## 5.5.

TABLEAU 5.1.

Granulométrie des sables de Hassi Messaoud et  
de In Amenas au niveau du sol

calibre de tamis en mm	calibre des grains en mm (d)	Sable de Hassi Messaoud en % de poids	Sable de In Amenas en % de poids
1	$d > 1$	0,30	0
0,56	$d \geq 0,56$	0,17	0
0,40	$d \geq 0,40$	0,50	0,85
0,28	$d \geq 0,28$	3,13	15,35
0,20	$d \geq 0,20$	16,00	21,47
0,14	$d \geq 0,14$	27,77	17,55
0,10	$d \geq 0,10$	31,00	27,33
0,07	$d \geq 0,07$	18,00	12,47
0,05	$d > 0,05$	2,55	0,30
	$d < 0,05$	0,13	2,48
Argile		0,30	2,17
Total		99,85	99,87



Fig. 5.1.  
Sable de Massi Messaoud en échelle 117 : 1,  
d'après cliché du Laboratoire SONAREM.

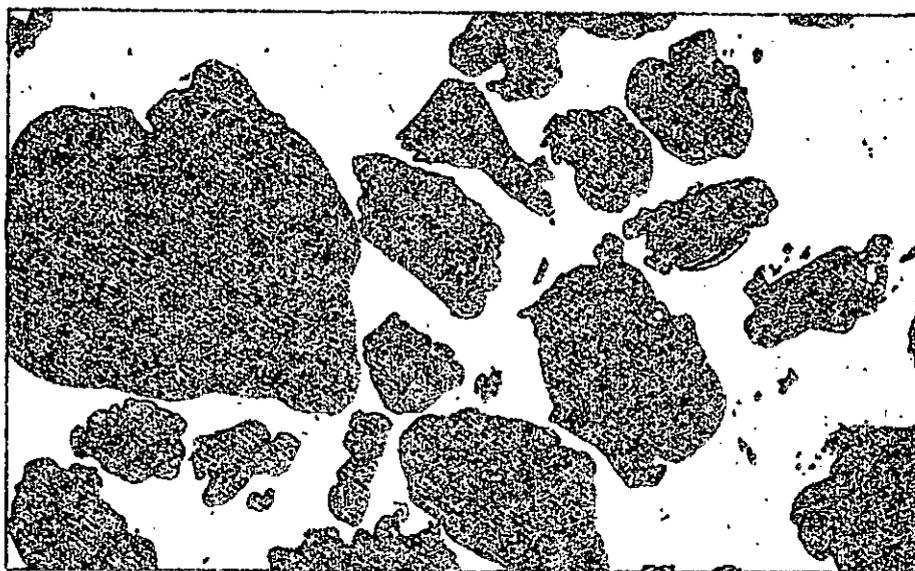


Fig. 5.2.  
Sable de In Amenas en échelle 117 : 1,  
d'après cliché du Laboratoire SONAREM.

## 5.7.

La microphotographie du sable à la surface du sol de Hassi Messaoud est représentée à la figure 5.1 et celle du sable de la surface du sol de In Amenas à la figure 5.2. L'échelle est dans les deux cas de 117 : 1.

Les deux sables sont quartziques. Leur composition chimique est à peu près la même. Le composant dominant est  $\text{SiO}_2$  ; il représente 94 % du sable de Hassi Messaoud et 92 % du sable de In Amenas. Les résultats des analyses chimiques sont représentés au tableau 5.2. On constate à partir de ce tableau qu'il n'existe de composants chimiques tels que NaCl et KCl dans aucun des deux sables au niveau du sol.

Les analyses spectrales d'échantillons de sables, pris à différents niveaux au-dessus du sol, montrent qu'il n'existe pas de différence quantitative entre leurs compositions chimiques. Cette constatation importante est valable tant pour le sable de Hassi Messaoud que pour celui d'In Amenas. Mais elle n'est pas générale pour l'ensemble du Sahara.

En effet, on trouve au Sahara des régions où il existe une très grande différence entre les compositions chimiques du sable au niveau du sol et du sable déposé sur les surfaces des isolateurs au-dessus du sol. Par exemple au Sahara Egyptien 1351 on a trouvé dans le dépôt un pourcentage par rapport au poids de 17,8 % sous forme de sels solubles (composés pour la plupart de sulfates et de chlorures :  $\text{CaSO}_4$  9,92 %, NaCl 2,97 % et KCl 0,53 %), tandis que la proportion globale des sels dans le sol était seulement de 0,4 %. Cela s'explique par le fait que le dépôt était créé soit par des sables de natures différentes, provenant d'autres régions, soit par une accumulation à la surface des isolateurs de sels

## 5.8.

qui y restent collés, tandis que d'autres particules du dépôt étaient enlevées par le vent.

Les analyses des sables de Hassi Messaoud et de In Amenas donnent aussi les fractions lourdes et magnétiques (tableau 5.3). On a en outre constaté que les grains de sable sont recouverts d'une pellicule très fine d'hydroxyde de fer d'une épaisseur de 0,0015 mm. Il est utile de noter ces constatations qui pourront être utiles dans l'avenir, pour une analyse plus approfondie de l'influence des compositions de sables sur les propriétés des dépôts.

TABLEAU 5.2.

Composantes chimiques principales de sables de Hassi Messaoud et In Amenas

Composante chimique	Sable de Hassi Messaoud en %	Sable de In Amenas en %
$\text{SiO}_2$	93,84	92,38
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1,59	2,26
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,59	1,57
$\text{CuO}$	0,73	0,62
$\text{MgO}$	0,27	0,22
$\text{TiO}_2$	0,19	0,30
$\text{Na}_2\text{O}$	0,16	0,13
$\text{K}_2\text{O}$	0,67	0,67
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,01	0,01
$\text{SO}_3$	0,41	0,06
Perte	1,07	1,39

TABLEAU 5.3.

Composition minéralogique des sables de Hassi  
Bessaoud et de In Amenas ; poids initial : 25 g.

A - <u>Fraction lourde,</u> <u>Poids 0,010 g.</u>	<u>Sable H.M.</u> %	<u>Sable I.A</u> %
Zircon	41,5	79,0
Rutile	31,5	13,0
Lencoxène	6,5	-
Anatase	3,7	1,0
Barytine	5,0	2,0
Sphéna	2,5	1,0
Disthène	3,8	1,0
Apatite	2,5	-
Phosphate	-	1,0
Fraction légère	3,8	2,0
B - <u>Fraction "magnétique",</u> <u>Poids : 0,050 g.</u>		
Hydroxydes de Fer et		
Oxydes de Fer	48,0	80,0
Tourmaline	5,0	1,0
Grenats	4,0	-
Ilménite	1,0	-

## 5.10.

Les deux sables absorbent l'eau dans un délai très court. La quantité maximale d'eau qui peut être absorbée par le sable ("saturation du sable par l'eau") représente environ  $1/4$  du volume total eau + sable. Le volume du mélange sable + eau est peu différent du volume du sable avant son mélange avec l'eau.

Les deux sables étudiés ne restent pas en général sur la surface des isolateurs disposés verticalement, si celles-ci sont propres, lisses et sèches. Par contre, ils se collent lorsque les surfaces sont graisseuses ou mouillées. Mais dans ce dernier cas, après séchage, les grains se détachent facilement des surfaces.

### 5.3. Création de dépôts polluants en laboratoire

Les quatre principaux types de couches polluantes indiqués au paragraphe précédent ont été créés en laboratoire en disposant sur les surfaces des modèles expérimentés, le sable de Hassi Messaoud ou de In Amenas à l'état sec, séché ou mouillé.

Ces surfaces avaient été d'abord préparées de telle sorte qu'elles étaient soit propres, soit recouvertes par une pellicule d'huile ou de noir de fumée.

On définira pour la suite des expériences en Laboratoire les terminologies de sable "sec" et "séché": le sable sec correspond à du sable se trouvant dans les conditions ambiantes du laboratoire ; le sable séché correspond aux conditions se présentant au Sahara pendant la période d'ensoleillement (ce sable a été obtenu en laboratoire en utilisant un air chaud, à 80°C environ).

## 5.11.

Les couches polluantes ont été créées en laboratoire de la manière décrite ci-dessous :

1) - Couche de sable continue et sèche. Le sable sec (ou séché) était déposé sur la surface propre au moyen d'un tamis spécial, permettant de sélectionner des grains de sable ayant même calibre que ceux prélevés sur les surfaces des isolateurs au Sahara, c'est-à-dire inférieurs à 0,07 mm. Le sable était tamisé à 2 m environ au-dessus du modèle jusqu'à ce que l'épaisseur voulue soit atteinte. L'épaisseur moyenne de la couche de sable était définie en fonction du volume de sable déposé.

En cas d'emploi de la méthode photographique, le tamisage était effectué dans l'obscurité totale.

2) - Couche de sable discontinue et sèche. Le caractère essentiel de la couche discontinue qui se forme au Sahara est constitué par la concentration de sable au voisinage de l'électrode, c'est-à-dire où le champ électrique est le plus intense. Pour obtenir la couche de ce genre en laboratoire, il a été employé la méthode suivante : le modèle étudié était d'abord soumis à une tension de choc dont la valeur correspond approximativement à celle de l'apparition de l'étincelle glissante. Quelques instants après la disparition de la tension, on déposait le sable par tamisage comme précédemment. Les forces dûes aux charges retardées agissaient de telle sorte que les grains se fixaient sur la surface du modèle et surtout autour de l'électrode active, sous forme de couronne (voir paragraphe 3.4). Le modèle était ensuite laissé en attente pendant trois jours, dans les conditions d'ambiance du laboratoire, puis il était soumis à un courant d'air dont le but était de créer un autonettoyage du modèle, ressemblant à l'autonettoyage par des vents du Sahara. Ces vents étaient reproduits en laboratoire à l'aide d'un souffleur simple, disposé au niveau du modèle et à deux mètres de celui-ci.

Le modèle étudié a été en général soumis à trois cycles consécutifs de tamisage, stabilisation, soufflage. Il a pu ainsi être constaté que l'épaisseur de la couche de sable ne dépendait pratiquement pas du nombre de cycles, ce qui confirme les constatations que nous avons noté dans les deux régions étudiées du Sahara, où l'épaisseur des couches de sable sec sur les isolateurs montés à l'extérieur ne dépend pratiquement pas du temps d'utilisation de ceux-ci.

L'épaisseur moyenne de la couche demeurée sur la surface après le dernier soufflage était en général comprise entre 0,2 et 0,4 mm.

La couche artificielle obtenue par cette méthode ressemblait d'une façon presque parfaite, du point de vue des dimensions et de l'adhérence des grains de sable entre eux d'une part, entre eux et la surface du diélectrique d'autre part, aux couches naturelles discontinues du Sahara. La méthode employée par l'auteur pour obtenir cette couche ne correspondait pas aux conditions de formation des couches au Sahara, mais elle a semblé conduire aux mêmes résultats.

3) - Pellicule continue de noir de fumée. La fumée était produite par combustion de "gas-oil" en laboratoire, dans un seau ordinaire. A une hauteur de 1,5 mètre au-dessus de ce seau était placée la surface étudiée, orientée à 45° par rapport à la colonne de fumée et ainsi exposée pendant 15 minutes environ.

On a réalisé la couche de noir de fumée ou bien directement sur la surface du modèle, ou bien, lorsque l'on désirait effectuer un photogramme, sur une feuille transparente de cellophane (environ 0,1 mm). Cette feuille, avec le film placé au-dessous, était étendue sur

la surface du modèle étudié.

4) - Pellicule continue d'huile. L'huile de transformateur était régulièrement répartie sur la surface propre du modèle étudié, celui-ci étant en position horizontale. Puis le modèle était tourné en position verticale et demeurait dans cette position pendant 30 minutes environ. Au bout de ce laps de temps, l'huile était répartie parfaitement, constituant une très mince couche.

5) - Couche de sable mouillé. Les couches polluantes à l'état mouillé ont été créées en laboratoire à l'aide de sable mouillé par une quantité déterminée d'eau. Ce sable était déposé sur les surfaces étudiées, propres ou recouvertes de noir de fumée ou d'huile de transformateur. La quantité d'eau dans le sable était mesurée en comparant les poids du même sable mouillé et sec.

Dans certains cas, par exemple dans le cas d'une couche de sable discontinue ou lors de l'étude de l'effet des gouttes d'eau solitaires, l'eau était projetée sur les couches polluantes séchées.

Un cas spécial est celui où le dépôt de sable est seulement mouillé par quelques gouttes d'eau, ce qui arrive souvent au Sahara (traces de pluie). Ce cas était reproduit en laboratoire par simple projection de quelques gouttes d'eau, d'un diamètre de 0,5 mm environ, sur la surface étudiée, de telle sorte que l'écartement entre les gouttes reste important. Les gouttes étaient entièrement absorbées par le sable ; la zone mouillée en surface se limitait à environ deux fois le diamètre de la goutte, tandis qu'en profondeur la couche était complètement mouillée.

La Fig.5.2. représente un isolateur de traversée  
pollué en laboratoire par du sable sec et des gouttes  
d'eau.



6.1.

## CHAPITRE VI

### RESULTATS DE L'ETUDE DES DECHARGES GLISSANTES

#### 6.1. Généralités

Les problèmes de pollution des isolateurs HT ont été étudiés par plusieurs auteurs et beaucoup de travaux les concernant sont déjà publiés, surtout dans le cadre des "Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques" - CIGRE. Cette organisation a créé au sein du Comité d'Etudes N° 33 ("Surtensions et coordination de l'isolement") un "Groupe de travail sur la pollution des Isolateurs", dont les rapports constituent une synthèse de l'état actuel du problème. Parmi les travaux publiés dans le cadre de CIGRE, ceux de J. I. SKOWRONSKI, Z. POHL de H. VON CRON, H. DORSCH, de W. FRISCHMANN, de OBENAU (voir 1361 à 1411), sont très remarquables.

A part de CIGRE, ces derniers temps, la Commission Electrotechnique Internationale - CEI 1341 a donné plusieurs précisions sur les problèmes des essais sous pollution artificielle. On trouve aussi dans l'activité de certaines universités, les travaux récents traitant des problèmes de pollution et contournement comme par exemple ceux de R. LAKOSTE, A. RAHAL 1421 et de C. HURAU, A. RAHAL 1431 de l'Université de Toulouse.

## 6.2.

Tous ces travaux en général, se reportent à des études sur les problèmes de contournement des isolateurs dans des conditions de pollution naturelles et artificielles variées et en premier lieu lorsqu'ils sont soumis aux tensions d'essais de 50 Hz. Cependant, les publications concernant les formes de décharges et des tensions initiales d'amorçage d'étincelle glissante sur les surfaces polluées, soumis aux tensions de choc rapidement variables (par exemple 1,2/50  $\mu$ s) sont, à la connaissance de l'auteur, inexistantes.

En nous référant aux définitions des types de pollution et aux méthodes de mesure et observations exposées dans ce qui précède, nous donnerons dans ce chapitre les résultats de l'étude des décharges glissantes qui se sont produites sur les modèles expérimentés, soumis à des tensions de choc de valeurs de crête croissantes, dans des conditions de pollution variées.

En accord avec d'autres auteurs, nous avons choisi la capacité spécifique superficielle  $C$  et la conductivité superficielle  $\sigma_s$  comme paramètres principaux caractérisant les modèles et les dépôts. Ces deux paramètres ont une influence prépondérante sur le mécanisme de la décharge. Dans le cas des sables de Hassi Messaoud et In Amenas, l'épaisseur de la couche de sable, lors de l'application de tensions de choc 1,2/50  $\mu$ s, n'a d'effet que sur la conductivité superficielle. Lors de l'utilisation de la tension à 50 Hz - qui ne fait pas l'objet de la présente étude - la capacité thermique de la couche, dépendant de l'épaisseur, peut fortement influencer sur le mécanisme de la décharge sous forme d'arc partiel.

Les décharges (forme, tension d'amorçage de l'étincelle glissante  $U_g$  et complète  $U_c$ ), ont surtout été étudiées sur des modèles plats. Sur des modèles cylindriques ou sur des

### 6.3.

isolateurs réels, seule la tension  $U_c$  a été mesurée.

On a utilisé dix modèles plats (figure 4.1.a) : cinq en verre et cinq en plexiglas ; leurs capacités spécifiques  $C$  se situaient entre des limites de 0,1 à 2,4 pF/cm<sup>2</sup>. On a utilisé comme modèle cylindrique (figure 4.1.b) trois modèles simulés en plexiglas et comme isolateurs réels (figure 4.2) plusieurs isolateurs de traversée de 45 kV (en araldite) et de 10 et 30 kV (en porcelaine et en verre). Ces isolateurs ont été essayés, enduits de la couche polluante obtenue artificiellement en laboratoire pour les isolateurs en araldite, ou de la couche polluante naturelle du Sahara pour les isolateurs en porcelaine ou en verre. Ils ont également été testés à l'état propre.

Tous les essais de décharges ont été effectués par application de tensions de choc positives ou négatives normalisées, dans les conditions ambiantes du Laboratoire, dont la température, le degré hygrométrique et la pression atmosphérique se situaient respectivement entre 18 et 20°C, 60 et 75 %, 735 et 765 mm Hg.

L'étude a été menée sur des modèles propres et des modèles pollués (Les modèles propres ont été utilisés uniquement dans un but de comparaison des résultats). Les états de surface des modèles sur lesquels se sont effectuées les études de décharges, ont été les suivants :

- a) propre et sec, ou propre et séché
- b) propre et recouvert par du sable à l'état sec, séché ou mouillé, en couche continue ou discontinue.
- c) propre et mouillé,
- d) propre et recouvert par une fine pellicule de noir de fumée ou d'huile, seul ou surchargé de sable à l'état sec, séché ou mouillé.

## 6.4.

Le terme "surface sèche" correspond à la surface sèche dans les conditions ambiantes du laboratoire. Le terme "surface séchée" correspond à la surface dans les conditions réelles au Sahara durant la période d'ensoleillement ; cet état de surface est obtenu en laboratoire par une exposition à de l'air chauffé à 80°C.

Les épaisseurs des couches de sable se situaient entre 0,2 et 2 mm, car les couches de sable relevées au Sahara présentaient les mêmes limites.

Dans ce qui suit sont exposés les résultats des recherches, d'abord sur la résistivité superficielle puis sur les décharges glissantes, sur les surfaces propres et polluées.

### 6.2. Conductivité superficielle des modèles propres et pollués

La conductivité superficielle  $\sigma_s$ , mesurée sur des modèles dont la surface était propre ou polluée, a donné les valeurs suivantes :

- a) Surface propre sèche ou séchée : l'ordre de  $\sigma_s$  inférieur au pS.
- b) Surface propre recouverte d'une couche de sable de Hassi Messaoud ou In Amenas, sec ou séché, d'une épaisseur de 0,5 mm :  $\sigma_s$  est respectivement de l'ordre du pS et de 100 pS. La conductivité  $\sigma_s$  augmente avec l'épaisseur de la couche de sable, mais dans des proportions moindres toutefois. Une fine pellicule de noir de fumée ou d'huile, déposée sous le sable a pratiquement une influence très faible sur la valeur de la conductivité résultante.

## 6.5.

c) Surface propre ou recouverte d'une pellicule de noir de fumée ou d'huile, surchargée d'une couche de sable de 0,5 mm d'épaisseur, mouillé dans la proportion d'une partie d'eau pour 20 parties de sable (1/20) :  $\sigma_s$  est de 25 à 600 nS, tandis que pour le même cas, mais avec du sable mouillé dans la proportion 1/8,  $\sigma_s$  atteint 1,6  $\mu$ S environ. Dans le cas du sable mouillé, la conductivité  $\sigma_s$  devient presque proportionnelle à l'épaisseur de la couche de sable.

Les résultats des mesures montrent que la conductivité  $\sigma_s$  des modèles pollués par du sable est peu influencée par la nature du diélectrique (verre ou plexiglas) et que la conductivité  $\sigma_s$  est pratiquement la même pour du sable mouillé par de l'eau potable ou par de l'eau distillée. Cette dernière constatation peut s'expliquer par le fait que ce sont les éléments de sels contenus dans le sable dissous dans l'eau qui jouent le rôle décisif.

Les valeurs de la conductivité  $\sigma_s$  mesurée sur des modèles recouverts par une couche de sable sec ou mouillé, d'une épaisseur de 0,5 mm, sont présentées au tableau 6.1. Les valeurs limites de  $\sigma_s$  pour des couches de sable de 0,2 à 2 mm, mouillées dans des proportions 1/20 à 1/4 sont présentées au tableau 6.2. D'après ce tableau, on constate que la conductivité  $\sigma_s$  peut prendre de très grandes valeurs, allant presque jusqu'à 26  $\mu$ S. En pratique, ce dernier cas ne se présente que sur des surfaces grasses se trouvant de 1 à 3 m au-dessus du sol et au cours de pluies abondantes.

TABLEAU 6.1.

Conductivité superficielle  $\sigma_s$  du modèle plat recouvert par une couche de sable de 0,5 mm d'épaisseur, à l'état sec et mouillé.

% d'eau dans le sable	Couche de sable In Amenas $\sigma_s$ en S	Couche de sable Hassi Messaoud $\sigma_s$ en S
0	$50.10^{-12}$	$300.10^{-12}$
5	$0,6.10^{-6}$	$0,2.10^{-6}$
12,5	$1,6.10^{-6}$	$1,3.10^{-6}$
25	$5,4.10^{-6}$	$4,4.10^{-6}$

## 6.7.

TABLEAU 6.2.

Valeurs limites de la conductivité superficielle pour des modèles plats recouverts par des couches de sable d'épaisseur 0,2 à 2 mm, mouillé dans la proportion volumique 1/20 à 1/4 (5 à 25 % d'eau dans le sable).

Epaisseur de la couche en mm.	Sable In Amenas $\sigma_s$ en $\mu S$	Sable Hassi Messaoud $\sigma_s$ en $\mu S$
0,2	0,3 à 2,5	0,1 à 2,6
0,5	0,6 à 5,4	0,2 à 4,4
1,0	1,2 à 10,0	0,5 à 12,0
2,0	2,6 à 24,0	1,2 à 26,0

a) -7 kV<sub>max</sub>

b) -10 kV<sub>max</sub>

c) -20 kV<sub>max</sub>

a) -30 kV<sub>max</sub>  
filets lumin.

b) -45 kV<sub>max</sub>  
filets+manches

c) -50 kV<sub>max</sub>  
première étin-  
celle glissante

d) -55 kV<sub>max</sub>  
étincelle  
glissante bit  
développée.

Fig. 6.1.

Photogrammes des décharges en effluves et en filets sous tensions  $-1,2/50 \mu s$  sur des modèles plats propres. Electrode active plate.  $C = 0,80 \text{ pF/cm}^2$ .

Fig. 6.2.

Photogrammes des décharges dans les mêmes conditions que celles de la Fig.6.1. mais pour la valeur de la capacité plus petite.  $C = 0,59 \text{ pF/cm}^2$ .

### 6.3. Décharges sur les surfaces propres

Les décharges sur les surfaces propres ont été réalisées dans le but de servir de base de comparaison pour les décharges sur les surfaces polluées. Ces décharges se manifestent sous les formes suivantes : effluves, filets lumineux, étincelles glissantes et étincelles complètes.

Les décharges en effluves apparaissent lorsque l'intensité du champ au voisinage de l'électrode active dépasse la rigidité diélectrique de l'air ; elles se présentent comme une couronne lumineuse entourant partiellement ou complètement l'électrode active. Cette forme de décharge, sous des tensions de choc rapidement variables, est difficilement visible et uniquement dans l'obscurité totale.

A la figure 6.1 sont présentés trois photogrammes de décharges en effluves. Nous avons donné à l'électrode active la forme d'un disque découpé dans une feuille d'aluminium de 0,1 mm d'épaisseur ; lors du découpage la forme rigoureusement <sup>se</sup> circulaire n'a pu être respectée et par conséquent, en certains points, le champ est devenu plus intense qu'ailleurs : c'est à proximité de ces points que sont apparues les effluves à la tension initiale.

Pour des tensions plus importantes, les décharges prennent la forme de filets lumineux. Leur apparition correspond à la tension initiale d'amorçage  $U_f$ . Dans la présente étude, cette tension fut déterminée seulement pour quelques cas, en utilisant la méthode d'approximation proposée par H. PAPAN [1]. Cette méthode consiste à tracer la courbe  $l = f(U)$ , - longueur des filets en fonction de la tension et de prolonger cette courbe

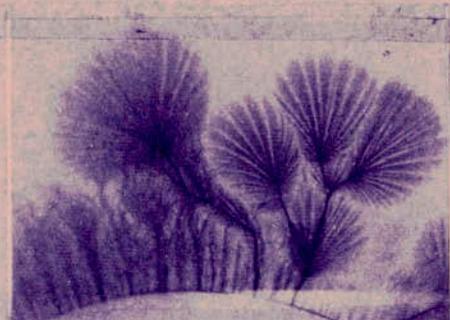
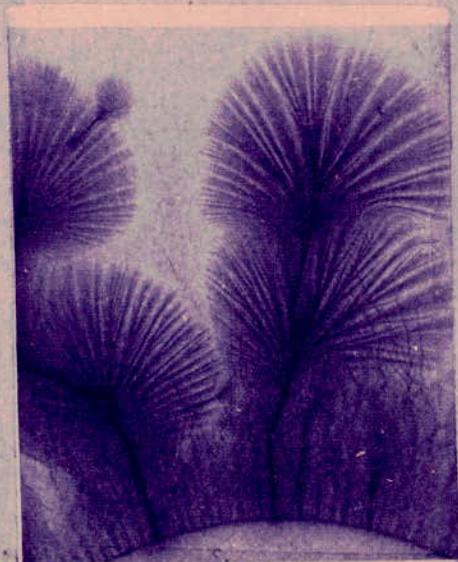
a) - 40 kV<sub>max</sub>b) - 45 kV<sub>max</sub>c) - 50 kV<sub>max</sub>

Fig.6.3.

Photogrammes des étincelles glissantes sur des modèles plats propres, sous tensions  $-1,2/50 \mu\text{s}$  supérieures à la tension initiale.  $C=1,18 \text{ pF/cm}^2$ .

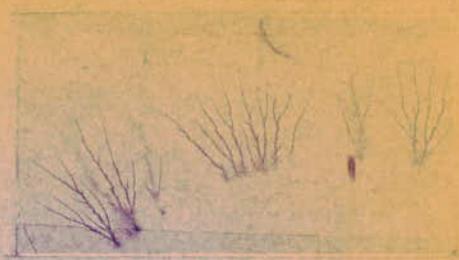
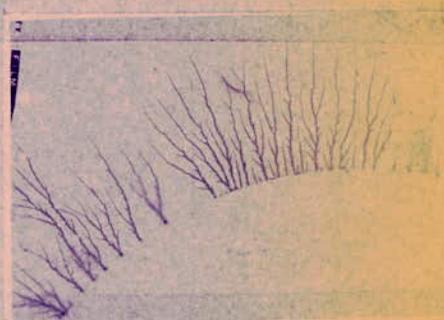
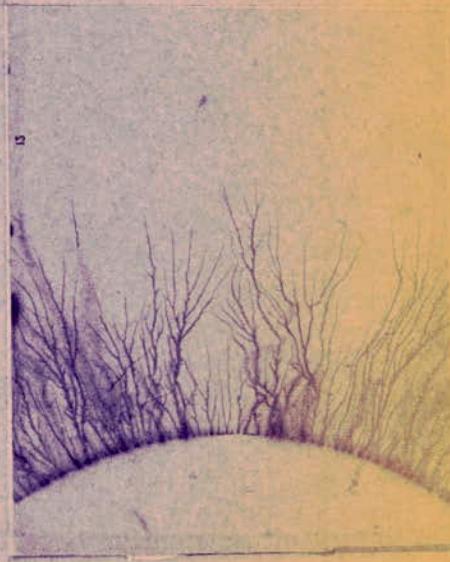
a) + 40 kV<sub>max</sub>b) + 45 kV<sub>max</sub>c) + 50 kV<sub>max</sub>

Fig.6.4.

Photogrammes des étincelles glissantes sur de modèles plats propres sous tensions  $+1,2/50 \mu\text{s}$  supérieures à la tension initiale.  $C = 0,32 \text{ pF/cm}^2$ .

jusqu'à l'axe des tensions, définissant ainsi la tension  $U_f$  pour laquelle la longueur  $l$  est nulle. Les mesures directes de la tension  $U_f$  sont très difficiles à effectuer et demandent un très grand nombre d'essais pour déterminer la limite entre la décharge sous forme d'effluves et celle sous forme de filets la suivant immédiatement. La tension  $U_f$  dépend uniquement de la capacité superficielle  $C$  et elle n'est pas influencée par la polarité de la tension. Cependant, les longueurs des filets dépendent de la polarité de la tension (nous avons relevé que ces longueurs étaient de 1,5 à 2,5 fois plus grandes pour les tensions positives que pour les négatives).

La transformation du filet en étincelle glissante, d'après TOEPLER [21], se produit seulement lorsque la quantité d'électricité traversant le filet atteint une valeur déterminée et passe en un temps très court (environ 1 nC en 0,1  $\mu$ s) ; la tension correspondante (tension initiale d'amorçage de l'étincelle glissante  $U_e$ ) dépend uniquement de la capacité spécifique superficielle  $C$  du modèle.

Les valeurs limites des tensions initiales de l'étincelle glissante  $U_e$ , obtenues par différents auteurs en fonction de la capacité superficielle  $C$ , sont données dans le tableau 6.3. Ces tensions ont été calculées selon les formules de TOEPLER [21], de JAKOBY [101] et de HUETER-PAPEN [191] qui ont étudié les décharges glissantes sur les mêmes modèles (plats et propres) munis d'une électrode active de forme pointue (TOEPLER, JAKOBY), ou plate (HUETER-PAPEN) et les tensions de choc positives et négatives (TOEPLER, HUETER-PAPEN) ou alternatives (JAKOBY). Ces formules sont les suivantes :

6.12.

a) d'après TOEPLER 121

$$\text{chocs positifs : } U_e = 3,67 \cdot 10^{-5} c^{-0,5} \quad \text{kV}_{\text{max}}, \text{ F/cm}^2 \quad (6.1)$$

$$\text{chocs négatifs : } U_e = 3,9 \cdot 10^{-5} c^{-0,5} \quad \text{" " (6.2)}$$

b) d'après JAKOBY 1101

$$\text{tension alternative: } U_e = 3,43 \cdot 10^{-5} c^{-0,5} \quad \text{" " (6.3)}$$

c) d'après HUETER-PAPEN 1191

$$\text{chocs positifs : } U_e \approx 40 c^{-1/3} \quad \text{kV}_{\text{max}}, \text{ pF/cm}^2 \quad (6.4)$$

$$\text{chocs négatifs : } U_e \approx 43,5 c^{-1/3} \quad \text{" " (6.5)}$$

Les valeurs des tensions obtenues par l'auteur de la présente étude sont situées dans les mêmes limites que celles calculées d'après les formules précédentes. Etant donné que l'auteur n'a pas eu la possibilité de mesurer les tensions en question avec une grande précision, les valeurs de tension  $U_e$  mesurées sur des modèles propres seront par la suite considérées comme base comparative (100 % de tension pour la surface propre). Cela permettra d'évaluer les diminutions de la tension, liées à la pollution des modèles.

TABLEAU 6.3.

Les limites de tension initiale  $U_e$  d'étincelle glissante pour des modèles plats propres :  
d'après les formules de TOEPLER 121, JAKOBY 1101, HUETER-PAPEN 1191.

Diélectrique	Epaisseur en cm	Constante $\epsilon_r$	Capacité C en pF/cm <sup>2</sup>	Tensions initiales $U_e$ en kV maximum	
				Polarité : + et ~	Polarité :
verre	0,25	7,40	2,36	22 à 30	26 à 32
verre	0,50	7,40	1,18	32 à 38	36 à 41
verre	1,00	7,40	0,59	45 à 48	51 à 52
verre	2,00	7,39	0,29	60 à 69	66 à 77
verre	4,00	7,38	0,14	77 à 98	84 à 104
plexiglas	0,20	3,94	1,60	27 à 34	31 à 37
plexiglas	0,40	3,94	0,80	38 à 43	44 à 47
plexiglas	1,00	3,94	0,32	56 à 65	61 à 69
plexiglas	1,60	3,93	0,20	68 à 82	74 à 87
plexiglas	3,20	3,93	0,10	86 à 116	94 à 123

Remarque : les valeurs des tensions sont arrondies au nombre entier le plus proche.

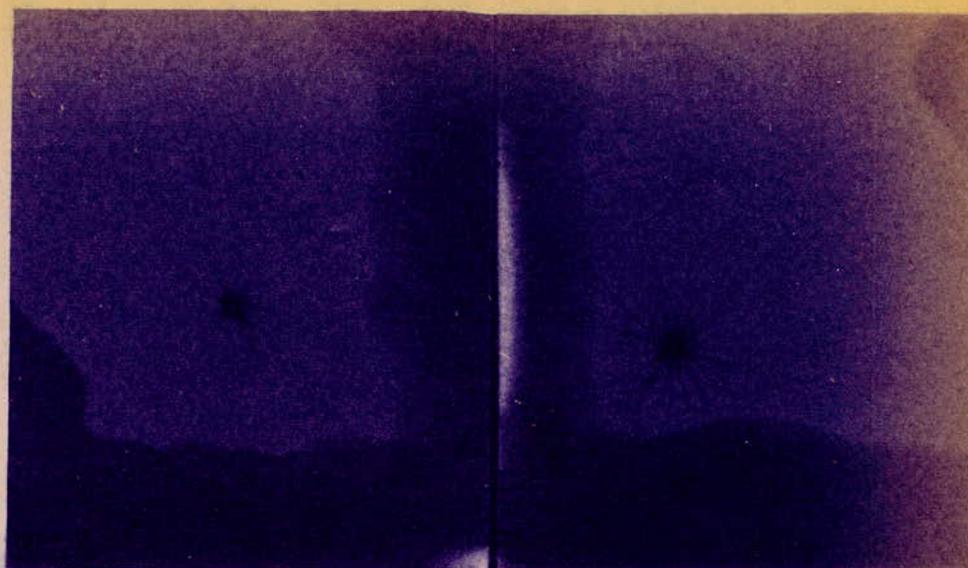
a)  $+37,5kV_{\max}$ b)  $+41,0kV_{\max}$ 

Fig. 6.5.

Photogrammes d'étincelles glissantes sur des modèles plats propres, sous tension  $+1,2/50 \mu s$ . Electrode active de forme pointue.  $C = 0,80 \text{ pF/cm}^2$ .

La Fig. 6.2. représente quelques photogrammes des développements des décharges jusqu'à l'apparition de l'étincelle glissante. Sur les photogrammes 6.2.b on voit quelques canaux de décharges plus longues et plus fortes que les filets: ce sont les manches, sur la tête desquels, pour la tension  $U = U_e$ , apparaîtront les aigrettes formant ainsi l'étincelle glissante (Fig. 6.2.c-d).

Pour des tensions  $U > U_e$ , le nombre et les dimensions des étincelles augmentent. Certains filets des étincelles déjà formées se transforment en de nouveaux manches sur la tête desquels apparaissent en de nouvelles aigrettes (Fig. 6.3.b-c). Les Fig. 6.3. à Fig. 6.6. représentent plusieurs photogrammes concernant le développement spatial des étincelles glissantes.

En augmentant encore la tension, on obtient l'étincelle complète court-circuitant les deux électrodes. Dans ce cas, le développement des étincelles glissantes arrive à son maximum spatial.



Fig.6.6.

Photogramme des étincelle glissante sur le modèle plat propre sous tension  $47,5 \text{ kV}_{\text{max}}$ ,  $-1,2/50 \text{ } \mu\text{s}$  qui dépasse de 25 % la tension initiale  $U$ . Electrode active pointue-au milieu.  $C = 1,18 \text{ } \mu\text{pF}/\text{cm}^2$ .

TABLEAU 6.4.

Tensions initiales d'étincelle glissante  $U_e$  mesurée sur des modèles plats recouverts par des couches de sable sec de Hassi Messaoud et In Amenas ; électrode active plate de diamètre 15 cm  $\sigma_s > 1$  nS. Valeurs moyennes des tensions de crête en % de  $U_e$  des surfaces p

Capacité C (pF/cm <sup>2</sup> )	Surface propre		Surface recouverte par du sable sec de 0,2 à 2 mm							
	+ $U_e$ (%)	- $U_e$ (%)	Couche 0,2 mm		Couche 0,5 mm		Couche 1 mm		Couche 2 mm	
			+ $U_e$	- $U_e$	+ $U_e$	- $U_e$	+ $U_e$	- $U_e$	+ $U_e$	- $U_e$
0,10	100		99	99	99	99	98	98	97	98
0,32	100		99	99	99	99	98	98	97	98
1,60	100		100	99	99	100	99	99	98	98
2,36	100		100	100	100	100	100	100	100	100

Remarque : toutes les valeurs sont arrondies au nombre entier le plus proche.

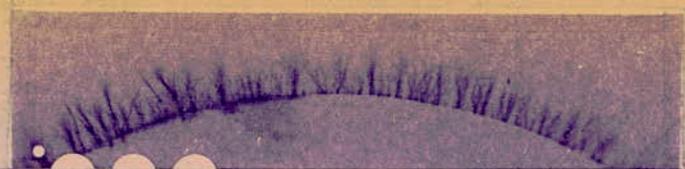
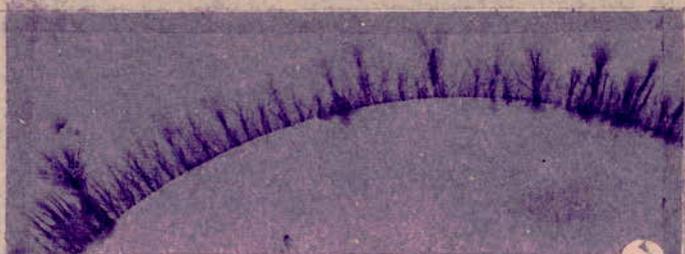
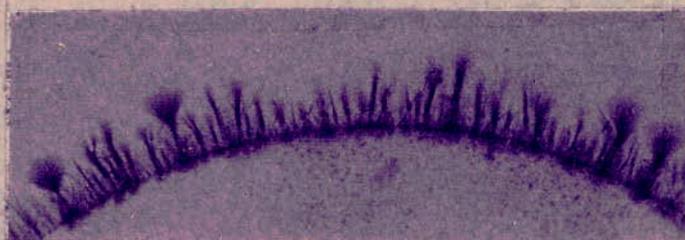
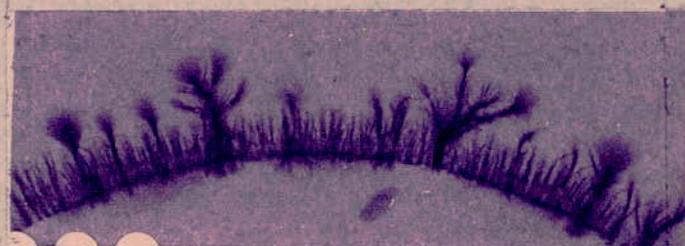
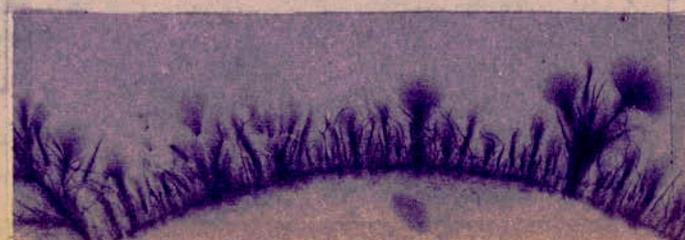
a) - 45 kV<sub>max</sub>b) - 47,5 kV<sub>max</sub>c) - 50 kV<sub>max</sub>d) - 52,5 kV<sub>max</sub>e) - 55 kV<sub>max</sub>

Fig. 6.7.

Photogrammes des étincelles glissantes sur des modèles plats pollués par une couche de sable sec de 0,2 mm, sous tension - 1,2/50  $\mu$ s.  $C = 0,80$  pF/cm<sup>2</sup>.

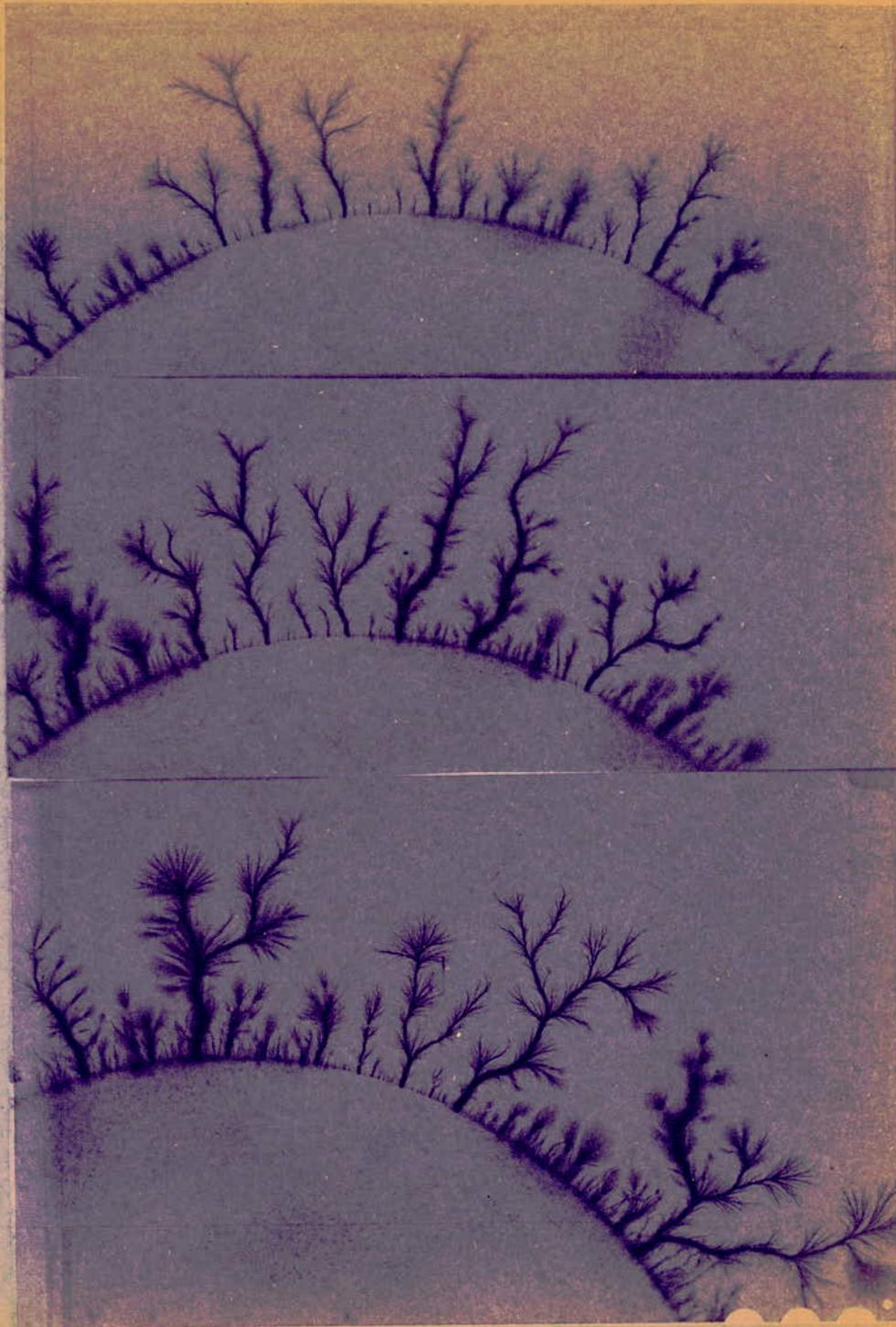
#### 6.4. Décharges sur les surfaces polluées par du sable sec.

Les modèles plats, pollués par des couches de sable sec de Hassi Messaoud et de In Aménas, ont été soumis à des tensions de choc croissantes (c'est-à-dire de valeurs de crête croissantes). Les décharges électriques apparaissant sous ces tensions ont en général la même forme que dans le cas des modèles propres : d'abord apparaissent les effluves et les filets lumineux, puis les étincelles glissantes et complètes.

Les décharges en effluve sur le modèle pollué par du sable sec se présentent différemment selon qu'il s'agisse de couche de sable sec continue ou discontinue.

Dans le cas d'une couche de sable discontinue, où les grains se trouvent parfois isolés les uns des autres, la distribution du champ n'est plus la même que sur la surface propre : les grains isolés ou groupés par petites quantités qui se trouvent à l'extérieur de la couche entourant l'électrode active, constituent des pointes du modèle où l'intensité du champ devient très importante et où les décharges en effluves apparaissent pour des tensions relativement basses.

Les décharges sous forme de filets lumineux qui apparaissent sur les modèles pollués par des couches de sable sec continues ou discontinues ont une forme à peu près analogue à celles obtenues sur des modèles propres, mais les canaux des décharges apparaissent un peu plus larges. La tension d'amorçage initiale des filets  $U_f$  est approximativement la même que celle mesurée sur le modèle propre. De même, les longueurs des filets pour des tensions appliquées équivalentes sont très proches pour les modèles pollués par du sable sec et pour les modèles propres.



a)  
-57,5kV<sub>max</sub>

b)  
-60,0kV<sub>max</sub>

c)  
-62,5kV<sub>max</sub>

Fig. 6.8.

Photogrammes des étincelles glissantes sur des modèles pollués par du sable sec de 0,2 mm sous tension  $-1,2/50 \mu\text{s}$  ( $C = 0,8 \text{ pF/cm}$ ). Cette figure conduit la suite de la Fig. 6.7. pour les tensions encore plus hautes.

Les formes des décharges en étincelles (glissantes ou complètes) sont aussi les mêmes, mais les détails des décharges sur les photographies montrent que celle-ci sont légèrement déformées par le sable (Fig. 6.7 et 6.8). La tension correspondant à leur apparition ne présente pas de différence sensible par rapport à celle relevée sur des modèles propres (tableau 6.4).

On peut donc constater que le mécanisme de la décharge n'est influencé que par la capacité spécifique superficielle  $C$  du modèle.

Les traces de décharges sur la surface du sable sont visibles jusqu'à une épaisseur de 0,2 mm environ de la couche ; les canaux de décharge arrachent les grains de sable et laissent des sillons visibles. Cela peut être constaté soit visuellement, soit par photographie. Pour des couches de sable sec plus épaisses, les traces ne sont visibles que lorsque les décharges sont très fortes. Pour des couches de 0,5 mm, les traces d'effluves ou de filets ne sont pas du tout visibles, et seuls les canaux principaux des étincelles glissantes peuvent être observés. Pour les couches de sable de 1 mm, les traces des canaux sont visibles seulement pour les étincelles complètes. Pour les couches de sable sec de 2 mm vues de l'extérieur, même les décharges en étincelles ne sont plus visibles, mais on peut entendre le bruit caractéristique qui les accompagne ; il faut néanmoins avoir acquis une certaine expérience et prêter une grande attention pour percevoir ce bruit. Il est donc compréhensible qu'à Hassi Messaoud et In Amenas, des décharges glissantes se produisent sur des isolateurs haute tension recouverts de couches de sable sec épaisses sans laisser de traces apparentes.

Les résultats d'enregistrement photographiques montrent que les décharges se développent dans la couche limite, entre le sable et la surface du modèle. Cette couche est formée d'air emprisonné ; donc le champ qui décide de l'apparition des décharges glissantes est celui qui se forme à proximité de la surface du modèle, aux abords immédiats de l'électrode active ou de la tête du canal de décharge, et non celui à l'intérieur du sable.

Le développement spatial des décharges glissantes sur des modèles pollués par du sable sec est représenté sur quelques photographies de la Fig. 6.7 et de la Fig. 6.8.

#### 6.5. Décharges sur les surfaces polluées par du sable mouillé

Les couches de sable continues ont été soit mouillées régulièrement dans toute leur masse, soit mouillées irrégulièrement par aspersion (pour simuler l'effet de faibles pluies ou traces de pluie).

Dans le premier cas, nous avons utilisé des couches de sable de différentes épaisseurs (0,2 à 2 mm), mouillées par une quantité d'eau variant dans les limites approximatives de 5 à 25 % (saturation), c'est-à-dire dans les proportions 1/20 à 1/4.

Les modèles plats pollués par des couches de sable mouillé ont été soumis à des tensions de choc croissantes. Les décharges apparaissant sous ces tensions ont en général des formes plus variées que dans le cas des modèles propres ou pollués par du sable sec. Lorsque les couches de sable sont peu mouillées, de façon que leur conductivité  $\sigma_s$  reste suffisamment faible ( $\sigma_s < 0,1 \mu\text{S}$  environ), les décharges ont une forme identique à celles qui ont été constatées sur les modèles étudiés au paragraphe précédent. Cela est un moins

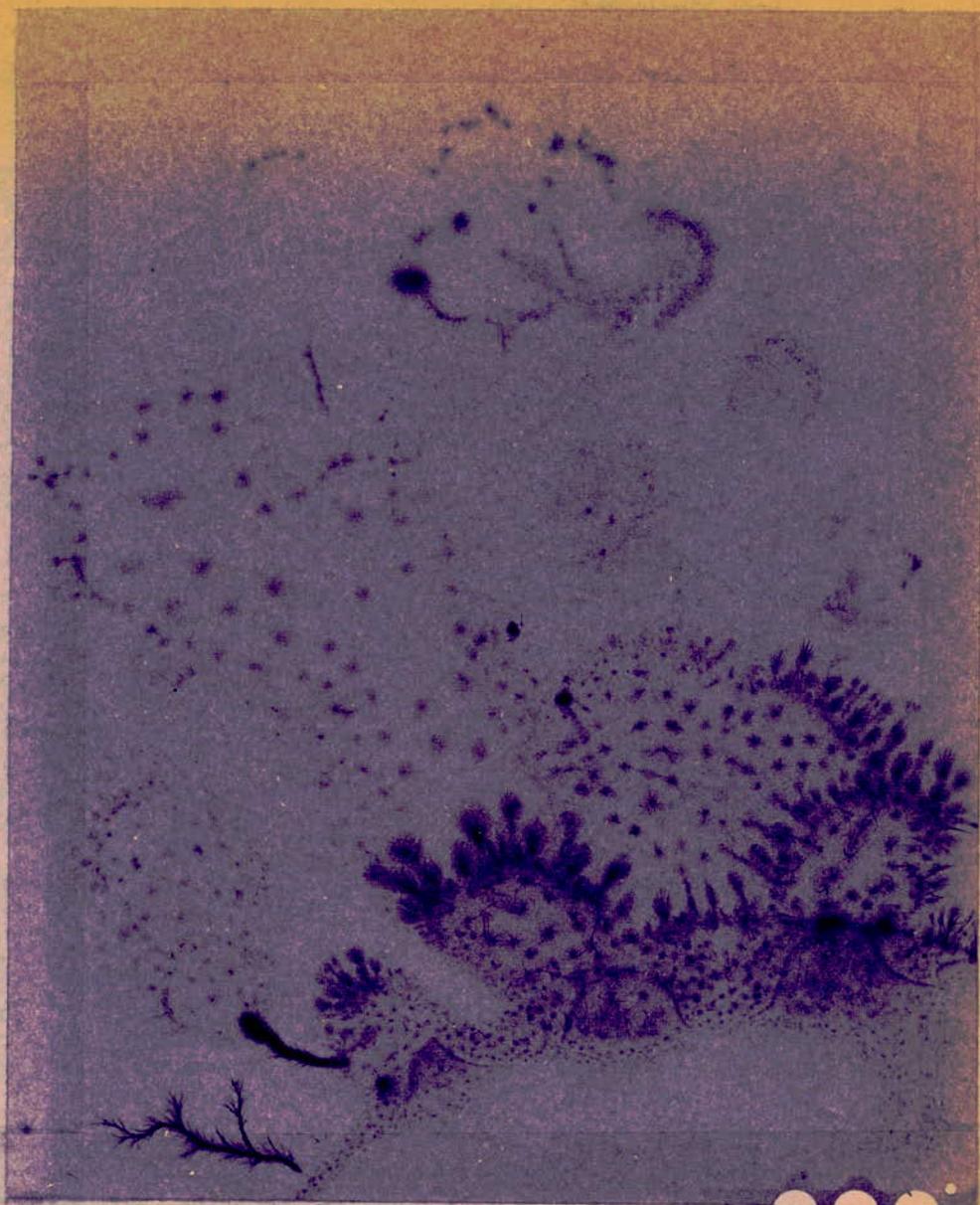


Fig. 6.9.

Photogramme de décharge superficielle sur le modèle plat pollué par une couche continue de sable de In Amenas, mouillé par l'eau dans la proportion 1 : 8, sous tension de 52,5 kV<sub>max</sub>, -1,2/50 µs ( $\sigma_s = 1,6 \mu\text{S}$  ;  $C = 0,59 \text{ pF/cm}^2$ ). Electrode active Ø15cm.

valable entre les limites  $0,1 < \sigma_s < 1 \mu\text{S}$ . Dès que la conductivité  $\sigma_s$  dépasse une certaine valeur ( $\sigma_s = 1 \mu\text{S}$  environ), alors les décharges perdent complètement leur forme classique et il devient très difficile sinon impossible de définir la limite entre les différentes étapes de la décharge (effluves, filets, étincelles glissantes).

Pour les couches de sable mouillé ayant une conductivité telle que  $0,1 < \sigma_s < 1 \mu\text{S}$ , les décharges se produisant près de l'électrode active ont une forme, plus ou moins semblable aux décharges se produisant dans les mêmes conditions sur les modèles propres. Cependant, les détails des décharges sont moins visibles sur les photographies ; en particulier, les filets sortant soit de l'électrode, soit de la tête d'un canal de l'étincelle glissante, sont flous et ressemblent aux effluves. Cela n'empêche pas pour autant de mesurer la longueur des effluves sur les clichés. Les longueurs de l'étincelle glissante en fonction de la tension de choc appliquée, sont supérieures quand la conductivité  $\sigma_s$  est plus élevée (jusqu'à environ  $0,5 \mu\text{S}$ ). Pour  $0,1 \leq \sigma_s \leq 0,6 \mu\text{S}$ , nous avons obtenu des tensions initiales d'étincelles glissantes  $U_e$  de 5 % environ inférieures à celles mesurées sur des modèles analogues et propres. Cela signifie que la tension  $U_e$  dépend encore essentiellement de la capacité superficielle  $C_s$ .

Les limites de conductivité  $0,1 \leq \sigma_s \leq 0,6 \mu\text{S}$  correspondent par exemple aux couches de sable de Hassi Messaoud et In Amenas, d'épaisseur 0,2 à 0,5 mm, mouillées par de l'eau dans la proportion 1/20.

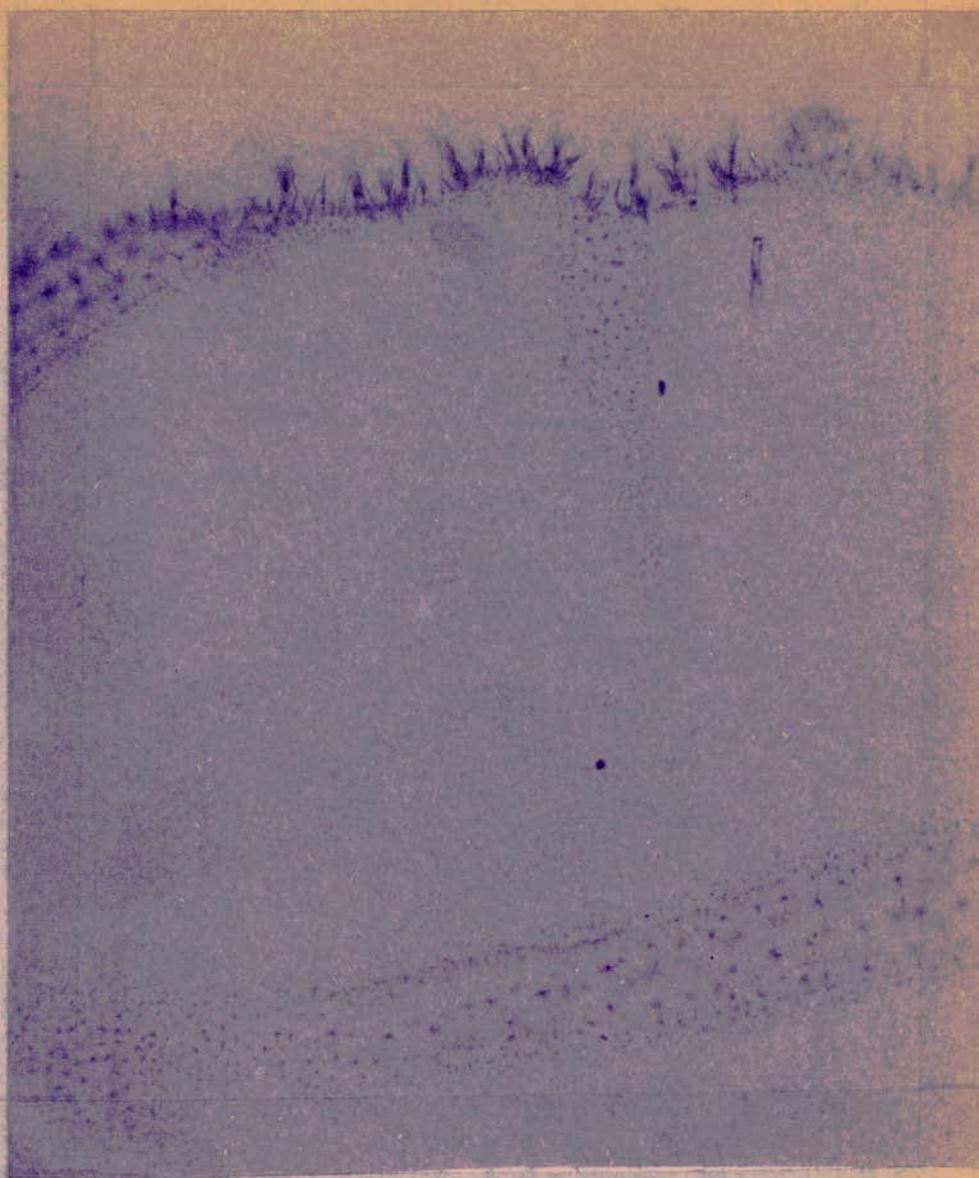


Fig. 6.10.

Photogramme des décharges superficielles sur le modèle plat polué par une couche continue de sable mouillé sous tension de 52,5 kV<sub>max</sub>, - 1,2/50 µs ( $\sigma_s = 2,6 \mu\text{S}$  ;  $C = 0,80 \text{ pF/cm}^2$ ). Electrode active pointue au milieu.

Pour des couches de sable mouillé de conductivité  $\sigma_s > 1 \mu\text{S}$ , les décharges glissantes se produisant près de l'électrode active ont une forme différente de l'habituelle ; par exemple, pour  $\sigma_s = 1,3 \mu\text{S}$ , elles deviennent diffuses sur la presque totalité de la surface du modèle, et pour  $\sigma_s = 1,6 \mu\text{S}$ , on ne décèle que quelques traces de décharges glissantes habituelles. A la Fig. 6.9 est représenté un photogramme de décharges glissantes sur modèle plat recouvert par une couche continue de sable mouillé ( $\sigma_s = 1,6 \mu\text{S}$ ). Dans la partie de la surface du modèle laissée spécialement sèche apparaît une étincelle glissante bien formée (côté gauche, au bas, du photogramme, Fig. 6.9), tandis que dans la partie mouillée, les décharges sont diffuses. Pour des conductivités  $1,0 \leq \sigma_s < 1,6 \mu\text{S}$ , les tensions  $U_e$  sont jusqu'à 10 % environ inférieures à celles relevées sur les modèles propres. Les conductivités telles que  $\sigma_s = 1,3 \mu\text{S}$  et  $\sigma_s = 1,6 \mu\text{S}$  correspondent par exemple aux couches de sable de 0,5 mm, respectivement de Hassi Messaoud et de In Amenas, mouillées dans la proportion 1/8 (c'est-à-dire 12,5 % d'eau dans la couche).

Comme exemple de disparition totale des formes de décharges, caractéristiques pour les étincelles glissantes, on peut citer la Fig. 10, correspondant à une conductivité  $\sigma_s = 2,0 \mu\text{S}$  (couche de sable de In Amenas, d'épaisseur 2 mm, mouillée dans la proportion 1/20).

Pour des conductivités  $\sigma_s \geq 3 \mu\text{S}$ , aucune décharge n'est visible sur les photogrammes : les couches si intensément mouillées semblent court-circuiter complètement le champ électrique le long de la surface.

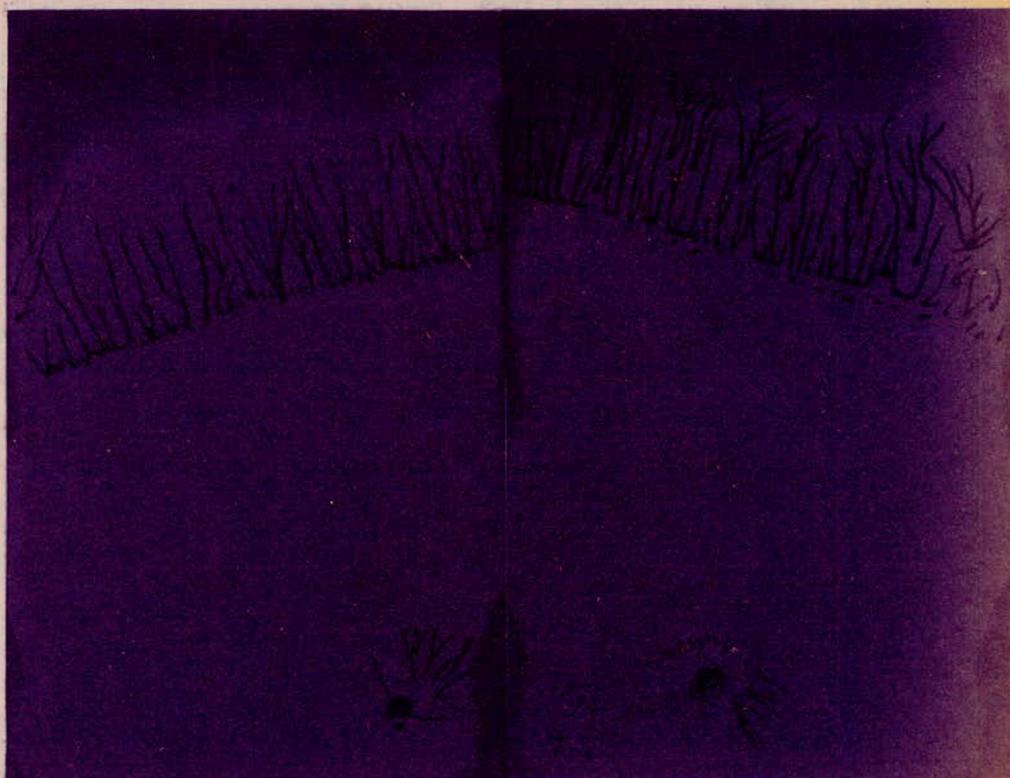
a) + 40 kV<sub>max</sub>b) + 42,5 kV<sub>max</sub>

Fig. 6.II.

Photogrammes de décharges sur des modèles plats en présence d'une couche de sable non continue, moullé, sous tension + 1,2/50  $\mu$ s ( $\sigma = 4,4 \mu$ S ;  $C = 0,8 \text{ pF/cm}^2$ ). Electrode active de forme pointue. Les décharges sortent de l'extrémité de la couche vers la partie propre du modèle.

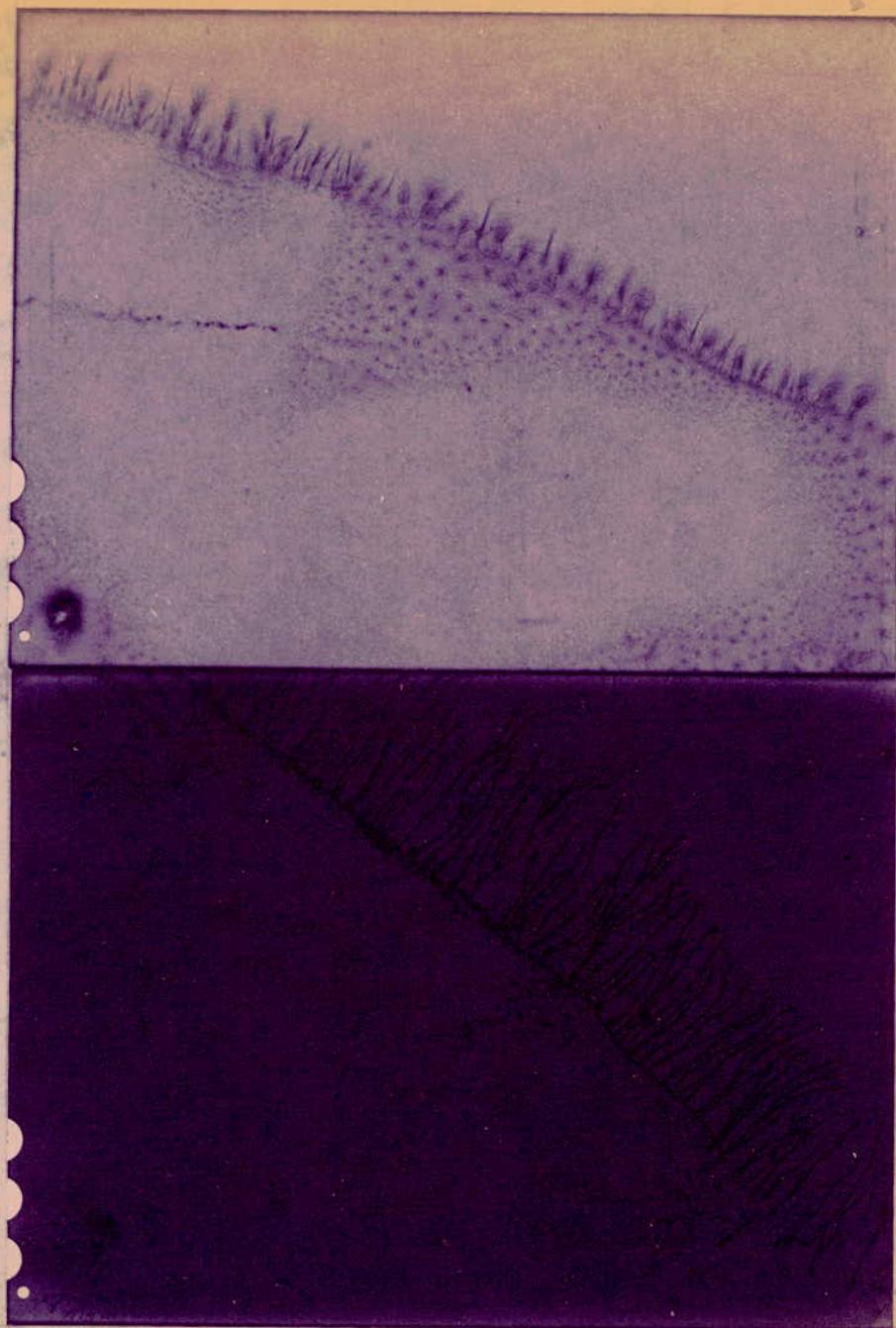
a) - 45 kV<sub>max</sub>b) + 45 kV<sub>max</sub>

Fig.6.I2

Photogrammes de décharges négative (a) et positive (b) sur des modèles plats en présence d'une couche non continue de sable mouillé ( $\sigma_s = 4,4 \mu\text{S}$ ,  $C = 0,80 \text{ pF/cm}^2$ ), sous tension 1,2/50  $\mu\text{s}$ .  
Même disposition que sur la Fig.6.II.

Outre l'étude des formes de décharges sur des modèles plats en présence de couches de sable mouillées continues, nous avons également étudié les formes de décharges sur les mêmes modèles en présence de couches de sable mouillées non continues. Ces couches entourent l'électrode active, mais disparaissent à une certaine distance de cette électrode où la surface continue est plus ou moins propre. Les formes de décharges apparaissant dans ce cas en général ne sont pas les mêmes sur la partie propre de cette surface. Sur la partie polluée, la forme de la décharge dépend de la conductivité superficielle de la couche et cela de la même manière que dans le cas de pollution par des couches continues analogues : pour les faibles conductivités  $\sigma_s$  (par exemple  $\sigma_s < 0,1 \mu\text{S}$ ), les décharges sont de même forme que sur des modèles propres; pour de grandes conductivités (par exemple  $\sigma_s > 1,6 \mu\text{S}$ ), elles sont entièrement floues sur la totalité de la surface recouverte par le sable. Sur la partie propre de la surface, les décharges superficielles gardent toujours la forme de décharges glissantes.

Les couches non continues bien mouillées jouent un rôle d'électrode. La Fig. 6.11 représente quatre photographies de décharges se produisant sur des modèles plats en présence de couches non continues mouillées ( $\sigma_s = 4,4 \mu\text{S}$ ) sous tension  $+ 1,2/50 \mu\text{S}$ , avec électrode active de forme pointue qui est visible seulement sur le photogramme 6.11.b.

La Fig. 6.11.b montre les étincelles glissantes sortant non seulement du bord de la couche de sable mouillée, mais aussi des agglomérats de sable à l'extérieur de cette couche.

Les dimensions des décharges sur la partie propre de la surface dépendent ici aussi de la polarité de la tension : pour les chocs positifs, les décharges sont plus longues que pour les chocs négatifs. Sur la partie polluée, cette influence ne peut pas être constatée car les décharges deviennent floues. La Fig. 6.12 donne, à titre de comparaison, deux photogrammes représentant les décharges positives et négatives qui se sont produites sur les mêmes modèles plats, pollués par la couche non continue mouillée ( $\sigma_s = 4,4 \mu S$ ). L'électrode active de forme pointue est visible sur les deux photogrammes sous l'aspect d'une tache blanche située au coin gauche au bas des photogrammes. Ces deux photogrammes donnent des renseignements sur l'influence des polarités.

#### 6.6. Essai d'explication des résultats concernant les couches de sable mouillées.

Pour expliquer quantitativement l'influence de la conductivité superficielle  $\sigma_s$  des couches de sable, nous devons revenir à la Fig. 1.4 du chapitre I, mais complétée par la résistance superficielle  $R_1$  (Fig. 6.13).

Les formules (par exemple la formule de M. TOEPLER), donnant la tension initiale de l'étincelle glissante  $U_e$ , correspondent au cas où la résistance  $R_1$  est infinie ; ces formules seront valables également quand est  $R_1 < \infty$ , mais quand elle est suffisamment grande.

Dans le domaine étudié dans la présente thèse, on ne peut qu'apprécier la limite de la résistance  $R_1$  en la comparant aux impédances capacitives des capacités  $K_1$  parallèles à la surface. En effet, cela n'est pas facilement possible directement, étant donné que la tension appliquée au modèle a la forme d'une impulsion (d'une onde de choc). Ce choc est caractérisé par la durée du front très courte ( $1,2 \mu s$ ) et en conséquence par une dérivée de la tension par rapport au temps  $\frac{du}{dt}$  très élevée dans le domaine du front. Cette dérivée définit les valeurs maximales du courant capacitif  $i = C \frac{du}{dt}$ .

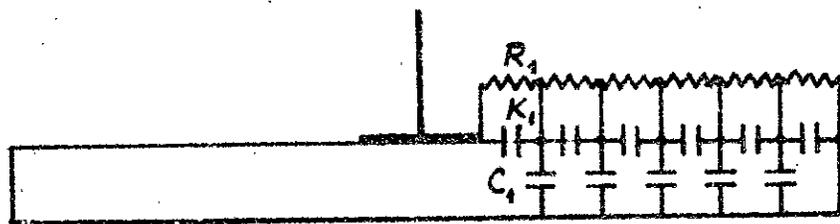


Fig. 6.13

Schéma équivalent simplifié pour le champ du modèle plat, avec la résistance superficielle.

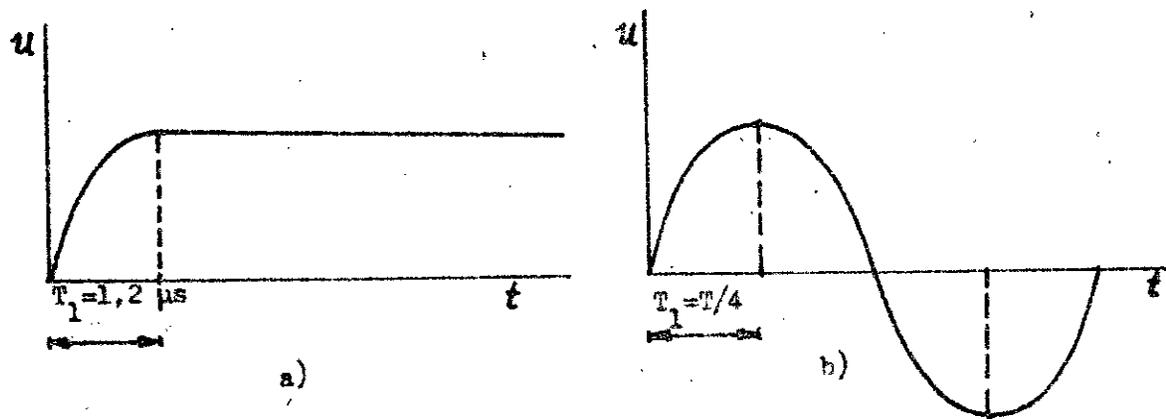


Fig. 6.14

Tension de choc (a) ayant un front de durée  $T_1$  et sinusoïde équivalente (b).

Par analogie avec certains problèmes concernant les phénomènes transitoires, on peut remplacer l'impulsion par une onde sinusoïdale ayant à peu près la même dérivée  $(\frac{du}{dt})_{\max}$ , c'est-à-dire conduisant au même courant capacitif maximal et possédant la même valeur de crête que l'impulsion, c'est-à-dire conduisant aux mêmes valeurs maximales des courants actifs. Ce sera une sinusoïde dont le quart de période  $T/4$  sera égal à la durée du front de l'impulsion (Fig. 6.14), donc la sinusoïde caractérisée par la période  $T = 4T_1 = 4 \cdot 1,2 \mu\text{s}$ , et la fréquence  $f = 1/T = 1/4,8 \cdot 10^{-6} \text{ Hz} \approx 210.000 \text{ Hz}$ .

Pour une tension appliquée sinusoïdale, le problème de l'appréciation de l'influence de  $R_1$  devient plus simple. Si nous admettons que la résistivité  $\rho_s = 1/\sigma_s$  constitue la mesure de l'ordre de grandeur de la résistance distribuée  $R_1$  et la capacité longitudinale  $K$  (correspondant à la capacité spécifique  $C$ ) la mesure de l'ordre de grandeur des capacités distribuées  $K_1$ , il suffit de comparer la résistivité superficielle  $\rho_s$  à l'impédance que présente  $K$ . Dans la présente étude, la capacité spécifique  $C$  est connue et située entre 0,1 et 2,5 pF/cm<sup>2</sup>, mais la capacité  $K$  n'est pas connue.

Pour apprécier la valeur de la capacité  $K$ , on peut se baser, par exemple, sur l'analyse donnée par LORENZ-HINZE-KÜHN 1441, avec les capacités liéniques axiales (Fig. 6.15) et les travaux de G. NEUMARKER 131 ; la capacité  $K$ , dans ces cas, résulte d'une répartition de tension calculée ou mesurée le long de la surface du modèle considéré.

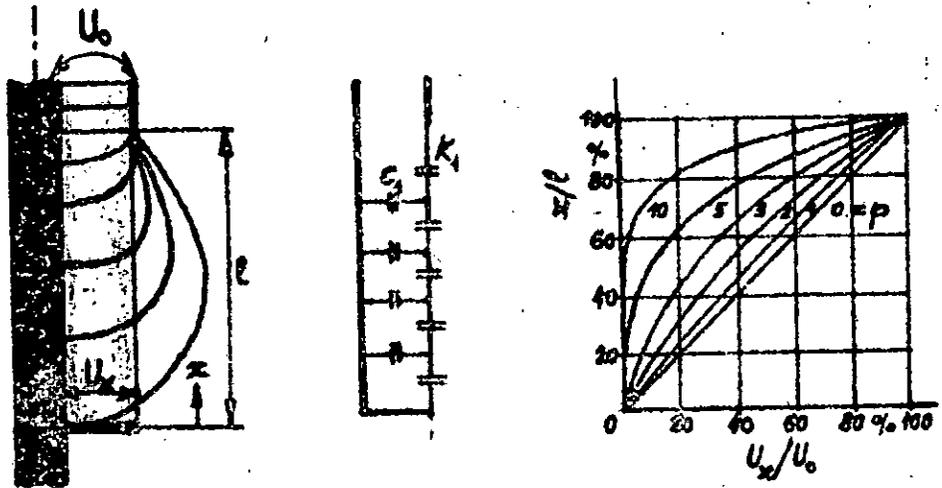


Fig. 6.15

Répartition de la tension le long d'un modèle cylindrique, d'après I44I.

La division de tension sur une chaîne de capacités est un problème rencontré dans d'autres domaines d'électrotechnique, par exemple lors de la répartition de la tension sur les chaînes d'isolateurs ou lors de répartition des tensions initiales dans des enroulements des transformateurs. La solution de ce problème, adaptée à une distribution uniforme des capacités, est donnée par l'équation :

$$U_x = A \cdot e^{p_1 \cdot x} + B \cdot e^{p_2 \cdot x} \quad (6.6)$$

$$\text{avec } p_1 = + \left(\frac{C}{K}\right)^{0,5} = p ; \quad (6.7)$$

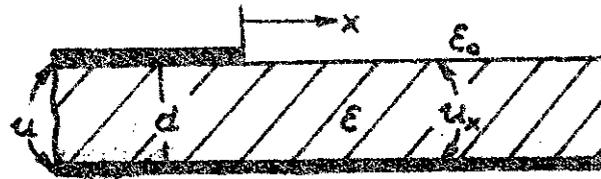
$$p_2 = - \left(\frac{C}{K}\right)^{0,5} = -p ;$$

où les constantes A et B peuvent être déterminées d'après les conditions à la limite :  $U_x = 0$  pour  $x = 0$  et  $U_x = U_0$  pour  $x = l$ , d'où :

$$A = B = \frac{U_0}{e^{pl} - e^{-pl}} = \frac{2 U_0}{\text{sh}(pl)} \quad (6.8)$$

Entre un point quelconque de la surface du diélectrique et la contre-électrode, la tension  $U_x$  est donc :

$$U_x = U_0 \frac{\text{sh}(px)}{\text{sh}(pl)} \quad (6.9)$$



$$u_x = u \cdot B \cdot e^{-p \cdot x}$$

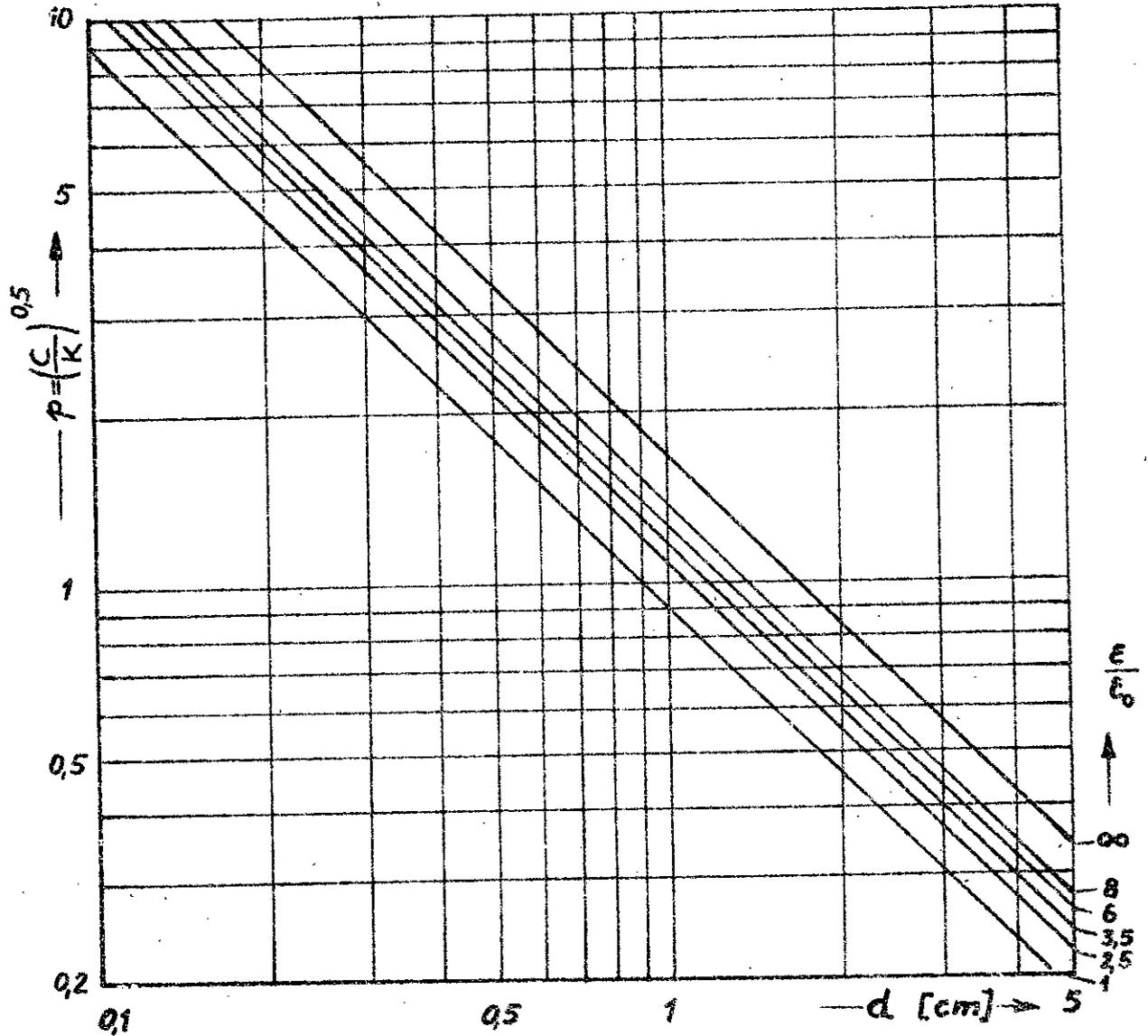


Fig. 6.16

Facteur d'amortissement  $p$  pour des modèles plats en fonction de l'épaisseur de leurs diélectriques  $d$  et des constantes  $\epsilon_p$ , d'après G. NEUMÄRKER 131.

Dans les formules (6.7) à (6.9) sont :

$U_0$  = tension entre l'électrode active et la contre-électrode ;  $C, K$  = capacités linéiques ;  $l$  = longueur totale de la surface entre les deux électrodes ;  $x$  = distance entre le point considéré et la contre-électrode.

Le facteur d'amortissement  $p$  peut prendre des valeurs différentes en fonction des caractéristiques diélectriques et géométriques des modèles. Comme une valeur de  $p.l$  possible en pratique, pour le modèle cylindrique idéal LORENZ-HUNZE-KUHN ont pris celle de  $p.l = 5$ .

L'appréciation des valeurs de la capacité  $K$  pour les modèles plats d'après NEUMARKER est plus sûre, car cet auteur propose une famille de courbes  $p = f(d, \epsilon_r)$  englobant tous les cas pouvant se présenter en pratique (Fig. 6.16). Ces courbes sont calculées d'après la formule suivante, constituant l'approximation de la formule hyperbolique (6.9) :

$$U_x = U_0 \cdot B \cdot e^{-px}, \quad (6.10)$$

où la constante  $B$  dépend de la nature du diélectrique ; elle est entre 0,805 et 0,773, pour la constante du diélectrique relatif  $\epsilon_r$  entre 3,5 et 8.

Les caractéristiques des modèles plats, utilisés dans la présente étude sont données dans le tableau 6.3. D'après la Fig. 6.16, le facteur d'amortissement  $p$  pour ces modèles est situé entre 0,32 et 6  $\text{cm}^{-1}$ , où  $p = 0,32 \text{ cm}^{-1}$  correspond au modèle ayant comme diélectrique le verre ( $\epsilon_r = 7,5$ ) d'une épaisseur  $d = 4 \text{ cm}$  ; ce modèle a la capacité spécifique superficielle  $C = 0,14 \text{ pF/cm}^2$  et la capacité  $K = \frac{C}{p^2} = \frac{0,14}{0,32^2} = 1,38 \text{ pF}$ . A la valeur  $p = 6 \text{ cm}^{-1}$ .

correspond le modèle ayant comme diélectrique le plexiglas ( $\epsilon_r = 4$ ) et l'épaisseur  $d = 0,2$  cm. Ce modèle se caractérise par  $C = 1,6$  pF/cm<sup>2</sup> et  $K = \frac{C}{p^2} = \frac{1,6}{36} = 0,045$  pF.

L'impédance  $\frac{1}{\omega \cdot K}$ , qui présente  $K = 1,38$  pF et  $K = 0,045$  pF à la fréquence supposée de 210.000 Hz, a des valeurs comprises entre 0,55 M $\Omega$  et 17 M $\Omega$ .

La conductivité superficielle des modèles utilisés varie en fonction de la quantité d'eau absorbée ; elle est de 1 pS environ (sable séché) à 26  $\mu$ S environ (couche de sable de 2 mm saturée d'eau) ; la résistivité superficielle correspondant à ces conductivités est  $\rho_s = 10^6$  M $\Omega$  et 0,04 M $\Omega$ .

Dans tous les cas où l'ordre de grandeur de  $\rho_s$  est plus grand que  $\frac{1}{\omega \cdot K}$  on peut s'attendre à ce que  $\rho_s$  n'exerce pas d'influence sur les phénomènes et qu'en particulier, les formules donnant  $U_e$  pour les surfaces propres soient valables. Les résultats du paragraphe précédent sont en accord avec cette constatation. Pour la conductivité, par exemple, de  $\sigma_s = 300$  pS ( $\rho_s = 3300$  M $\Omega$ ) qui correspond à la couche de sable sec il n'y a pas de différence par rapport aux phénomènes observés sur la surface propre. Dans ce cas, la résistivité superficielle est beaucoup plus grande que l'impédance que présente K,  $3300$  M $\Omega \gg (0,55 \text{ à } 17)$  M $\Omega$ .

Dans le cas des surfaces polluées par du sable mouillé on ne trouve pas de différence essentielle par rapport au cas de la surface propre, tant que la conductivité de la couche polluante est  $\sigma_s < 0,1$   $\mu$ S ( $\rho_s > 10$  M $\Omega$ ). Par contre, la différence entre les formes de décharges est bien remarquable lorsque la conductivité est de l'ordre de 1  $\mu$ S. Par exemple, pour  $\sigma_s = 1,6$   $\mu$ S ( $\rho_s = 0,63$  M $\Omega$ ) pour le modèle de la Fig. 6.9 ( $\epsilon_r = 7,5$  ;  $d = 1$  cm ;  $C = 0,59$   $\frac{\text{pF}}{\text{cm}^2}$  ;

$\rho = 1,3 \text{ cm}^{-1}$  ;  $K = 3,5 \text{ pF}$  ;  $\frac{1}{\omega K} \approx 2,2 \text{ M}\Omega$ , la résistivité de la couche est plus petite que l'impédance  $\frac{1}{\omega K}$  ( $0,63 \text{ M}\Omega < 2,2 \text{ M}\Omega$ ) et les décharges superficielles n'ont presque aucune ressemblance avec les décharges glissantes se produisant dans les mêmes conditions sur la surface propre.

Pour un autre modèle, avec  $\sigma_s = 2,6 \text{ }\mu\text{S}$  ( $\rho_s = 0,4 \text{ M}\Omega$  ;  $\epsilon_r = 4$  ;  $C = 0,8 \frac{\text{pF}}{2}$  ;  $d = 0,4 \text{ cm}$  ;  $\rho = 3 \text{ cm}^{-1}$  ;  $K = \frac{0,8}{3^2} = 0,09 \frac{\text{cm}^2}{\text{pF}}$  ;  $\frac{1}{\omega K} = 8,5 \text{ M}\Omega$ ) pollué par une couche de sable mouillé dont est  $\rho_s = 0,4 \text{ M}\Omega$ , Fig. 6.10, la résistivité superficielle  $\rho_s$  est encore plus petite par rapport à l'impédance  $\frac{1}{\omega K}$  ( $0,4 \text{ M}\Omega < 8,5 \text{ M}\Omega$ ) et les décharges superficielles sont entièrement floues sur la totalité de la surface.

#### 6.7. Décharges sur des isolateurs réels et modèles cylindriques

En complément à la recherche principale qui a été effectuée sur des modèles plats, une série de mesures a été réalisée sur des isolateurs provenant du Sahara et sur des isolateurs pollués en laboratoire. Nous avons limité nos investigations à la constatation de l'influence de la couche de sable sur la tension initiale d'amorçage de l'étincelle complète (tension de contournement)  $U_c$ . Nous pouvons résumer comme suit les résultats de cette étude :

- 1) Lorsque les modèles cylindriques ou les isolateurs réels, en position horizontale étaient recouverts par un dépôt artificiel de sable sec ou séché de 0,2 à 2 mm d'épaisseur, la tension de contournement  $U_c$  100% prenait des valeurs approximativement identiques à celles mesurées sur ces mêmes modèles plats à l'état propre. La même constatation a été

faite sur ces modèles lorsque leurs surfaces ont été enduites, avant le dépôt de sable sec en couche de 0,2 à 2 mm, d'une pellicule de noir de fumée ou d'huile de transformateur. Ceci était valable tant pour les chocs positifs que pour les chocs négatifs.

2) Lorsque les modèles cylindriques et isolateurs réels étaient recouverts par des couches de sable mouillées (de même épaisseur que précédemment) dans la proportion 1/20, la tension  $U_c$  était alors de 5 % environ plus basse que pour l'état sec. Avec du sable mouillé dans la proportion 1/8, cette diminution s'élève à environ 5 % pour les couches de 0,2 mm et à environ 10 % pour les couches de 2 mm, les 10 % n'étant jamais dépassés. En cas de saturation de la couche, la diminution de tension était de 10 à 20 % environ, les 20 % constituant un maximum de diminution.

La présence de pellicule de noir de fumée et d'huile de transformateur sous les couches de sable mouillé ne modifie pas les constatations relevées lorsque ces pellicules n'existent pas.

En présentant ces constatations, nous voulons seulement souligner l'importance de la pollution dans le cas des isolateurs haute tension. Le problème de la valeur de la tension de contournement (tension d'amorçage de l'étincelle complète, constituant la phase finale de la décharge glissante) n'est pas le but de notre étude.

On peut constater que la couche de sable mouillée pouvant se présenter sur les isolateurs de traversée en service au Sahara dans le cas le plus défavorable (couche de sable de 2 mm, saturé par l'eau), est susceptible de diminuer la tension de contournement jusqu'à une valeur 20 % plus faible que dans le cas de sable à l'état sec,

Fig. 121.  
Infectious agent of the  
disease on the model  
pres. in presence of water (1  
micron gouttes d'eau, etc.)  
- 1,2/50 ps. C = 1,18 ps.



ce qu'il faudra prendre en considération lors d'un projet d'installation au Sahara.

#### 6.8. Décharges sur des modèles pollués par des traces de pluie

A l'occasion des recherches concernant les couches de sable mouillées qui présentent un danger essentiel pour la tenue des isolateurs au Sahara, nous avons aussi consacré certaines études aux couches partiellement mouillées par des traces de pluie. C'est un cas peu important du point de vue pratique, mais intéressant s'il s'agit des formes des décharges.

Comme on l'a mentionné au chapitre II, les traces de pluie, c'est-à-dire une pluie réduite à quelques gouttes, sont assez courantes au Sahara. Ces gouttes tombent sur les isolateurs recouverts par des couches de sable sec, laissant sur leurs surfaces des traces isolées. Ce cas a été reproduit en laboratoire.

Dans la suite, nous représentons quelques photogrammes de décharges produites en présence d'une ou plusieurs gouttes d'eau projetées sur la surface du modèle, d'abord propre (bien que ce cas ne se présente jamais au Sahara du fait qu'il n'est pas possible que les surfaces restent propres dans cette région), puis sur la surface recouverte par du sable de Hassi Messaoud et In Amenas.

La Fig. 6.15 représente deux photogrammes : l'un montre la décharge glissante en présence d'une goutte d'eau au voisinage de l'électrode active et l'autre, la décharge glissante en présence de plusieurs gouttes réparties sur toute la surface du modèle. Dans les deux cas, la surface du modèle était bien propre.

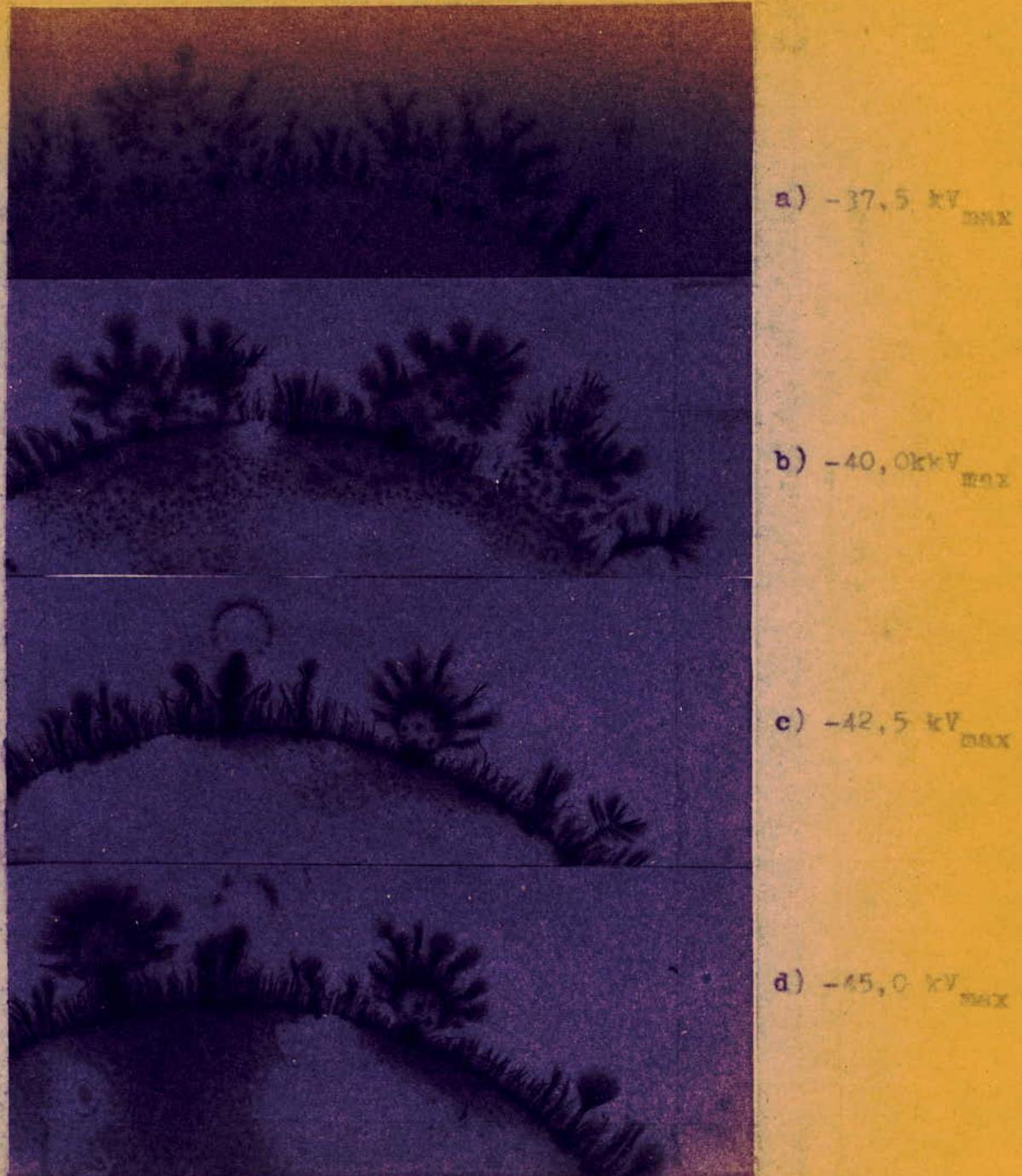


Fig. 6.18.

Effet de quelques gouttes d'eau au voisinage de l'électrode active plate ( $\varnothing$  15 cm) des modèles pollués par des couches continues de sable sec, sous tensions  $-1,2/50 \mu\text{s}$ .

$$C = 1,6 \text{ pF/cm}^2.$$

Le photogramme de la Fig. 6.17. a. montre qu'une goutte d'eau se comporte comme une petite électrode métallique autour de laquelle se forment des filets régulièrement répartis. Il faut noter ici une forme de décharges particulière, encore pas rencontrée ailleurs. Sur les têtes de certains filets se forment des aigrettes qui, dans d'autres cas, ne prennent naissance que sur la tête des manches des étincelles glissantes. L'explication de l'existence de cette forme de décharges (filets avec aigrettes) peut être fournie par la chute de tension entre l'électrode et la tête du filet sortant de la goutte (la goutte est reliée à l'électrode active par un canal de décharge superficielle). La chute de tension devient importante à cause de la distance entre l'électrode et le filet.

Le photogramme 6.17.b montre que plusieurs gouttes d'eau dispersées sur toute la surface propre ne changent pratiquement ni la forme, ni les dimensions des décharges à condition de n'être pas trop proches de l'électrode active. Ce photogramme est à rapprocher de celui de la Fig. 6.6, où les décharges correspondent aux mêmes conditions d'essais, à l'exception des gouttes d'eau.

La Fig. 6.18 représente les photogrammes de décharges glissantes apparaissant sur des modèles pollués par du sable sec et quelques gouttes d'eau près de l'électrode active de forme plate (diamètre 15 cm). Dans le cas du photogramme 6.18.a, la tension appliquée correspond à la tension initiale  $U_e$ , tandis que dans le cas des autres photogrammes, elle était supérieure à  $U_e$ . Dans tous les cas, la présence de gouttes d'eau a pour conséquence l'augmentation des dimensions des décharges glissantes.

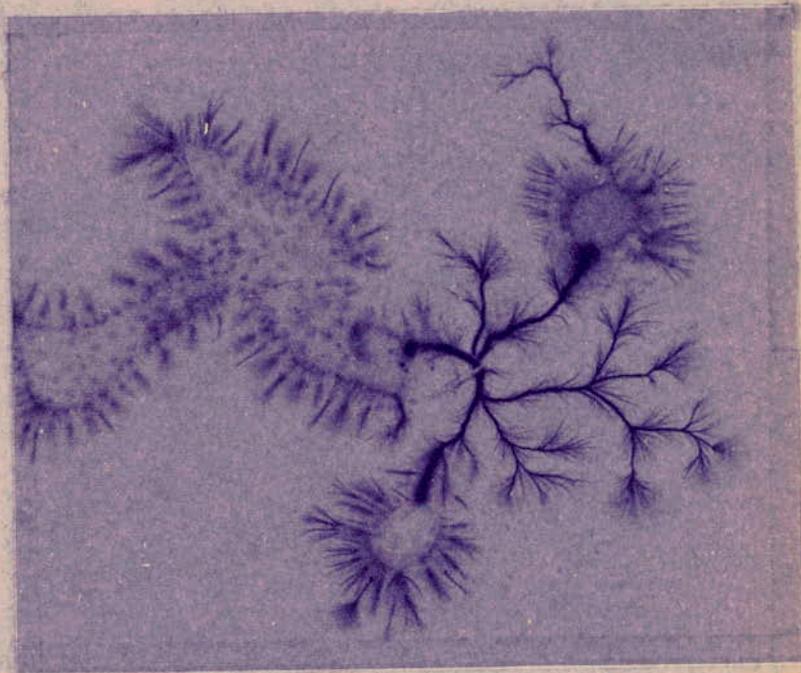
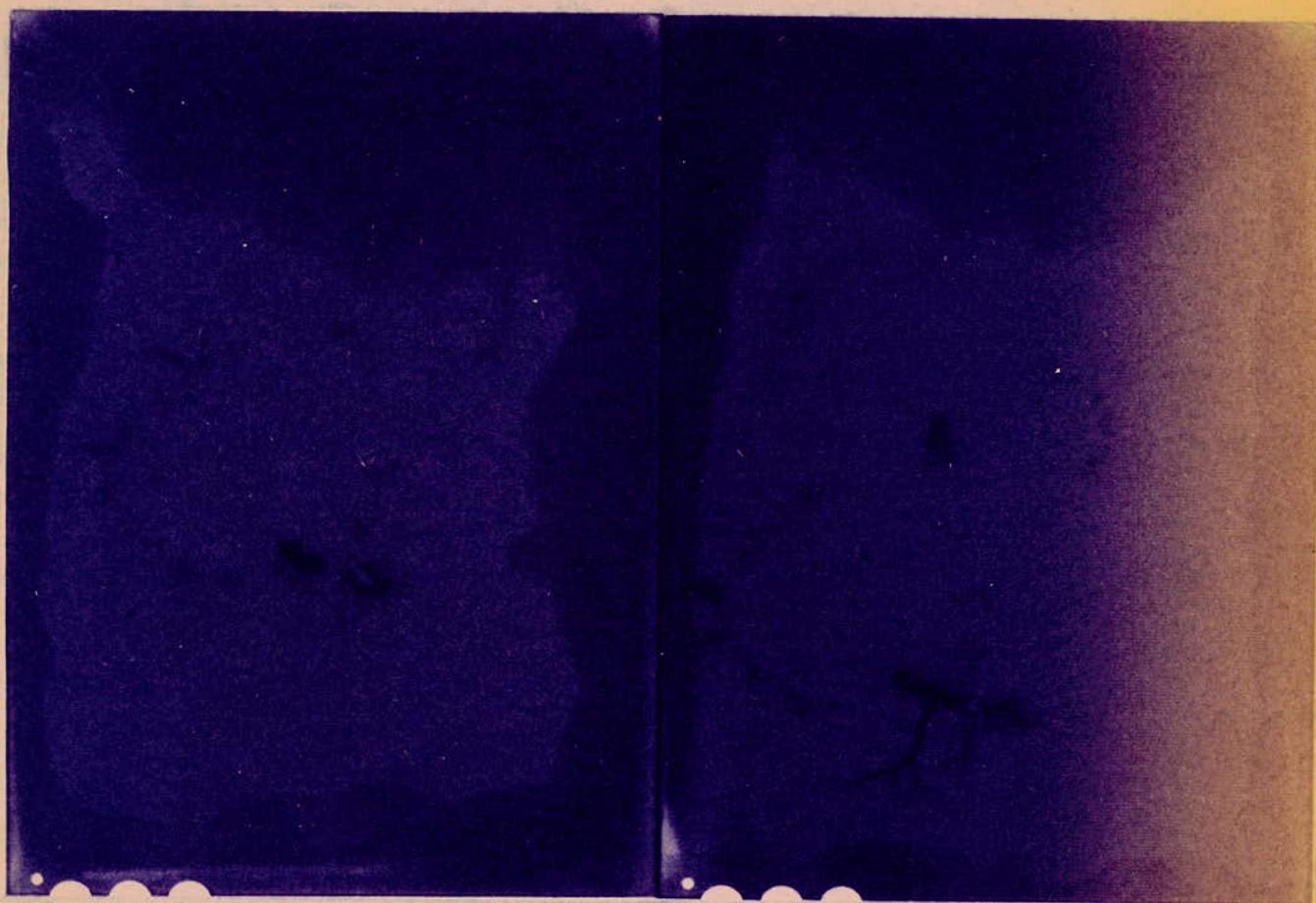


Fig. 6.19.

Photogramme de décharges superficielle sur le modèle plat, pollué par une couche continue de sable comportant plusieurs taches mouillées, sous tension  $+1,2/50\mu\text{s}$ . Electrode active de forme pointue au bas du photogramme.  $C = 0,80 \text{ pF/cm}^2$ .

Le photogramme de la Fig. 6.19 représente les formes des décharges glissantes dans un cas particulier : lorsque la surface du modèle recouvert par une couche continue de sable est sèche -à droite, et partiellement mouillée -à gauche. Sur le sable sec (à droite), on a projeté deux gouttes d'eau. La couche de sable partiellement mouillée (à gauche) est créée par la projection de plusieurs gouttes d'eau l'une près de l'autre. Ce cas peut arriver au Sahara pour des isolateurs dont la surface est partiellement protégée. Sur la partie mouillée (Fig. 6.19, à gauche), les décharges sont diffuses ; on les voit autour de la couche de sable mouillée (cette couche a une forme irrégulière). Sur la partie sèche les décharges ont une forme d'étincelles glissantes habituelle. Sur la partie du modèle où est située la plus petite goutte (en haut) les décharges sont semblables à celles de la Fig. 6.17.a, tandis que sur la partie où est située la goutte la plus volumineuse (en bas), un canal de décharge de 2 cm de long environ se forme à partir de cette goutte.

A la fig. 6.20 sont présentés deux photogrammes de décharges en présence de plusieurs taches mouillées sur les mêmes modèles que ceux de la Fig. 6.17 mais sous tension + 1,2/50  $\mu$ s.



a) + 40 kV<sub>max</sub>

b) + 45 kV<sub>max</sub>

Fig. 6.20.

Photogrammes de décharges sur des modèles pollués par une couche continue de sable comportant plusieurs taches mouillées, sous tension +1,2  $\mu$ s. Electrode active de forme pointue au bas du photogramme.  $C = 0,80 \text{ pF/cm}^2$ .

## CHAPITRE VII

## CONCLUSIONS ET SUGGESTIONS POUR LES RECHERCHES ULTERIEURES

Les recherches effectuées ont été consacrées à l'étude expérimentale des décharges superficielles se produisant sous les tensions de choc rapidement variables ( $1,2/50 \mu s$ ), sur les systèmes isolants haute tension les plus exposés au danger d'apparition de l'étincelle glissante. La surface de ces systèmes était propre puis polluée par le sable du Sahara.

L'objectif principal des recherches était celui de trouver les formes des décharges en fonction du type des couches de sable et la conductivité superficielle spécifique et de définir la valeur limite de cette conductivité au-dessus de laquelle les décharges superficielles glissantes cessent de se produire sous la forme habituelle.

Par la suite, seront récapitulées les conclusions principales sur lesquelles ont porté ces recherches et quelques suggestions pour la poursuite de recherches ultérieures seront données.

1°) Ont d'abord été étudiées : les couches de sable sur les isolateurs haute tension, en exploitation dans les deux Centres sahariens producteurs d'hydrocarbures : Hassi Messaoud et In Amenas, en prenant en considération les conditions climatiques qui les régissent. L'étude de ces couches a conduit aux constatations suivantes :

Le Sable saharien se dépose sur les surfaces des isolateurs par un processus de sédimentation permanent. Les grains de sable déposés ont dans tous les cas un calibre inférieur à 0,1 mm et une granulométrie très régulière. Ils ont pour origine le sol se trouvant au-dessous des isolateurs et une nature quartzeuse (la composante dominante du sable est  $SiO_2$ , représentant plus de 90 % du poids).

Les dépôts de sable se présentent généralement sous la forme continue (surface entre les électrodes entièrement couverte), ou discontinue (le sable se rassemble aux environs immédiats des électrodes, formant à cet endroit une couche complète, tandis que les parties de la surface plus distantes de l'électrode sont recouvertes par des agglomérats isolés de sable).

Ces formes de dépôts dépendent du type de montage. Sur les isolateurs protégés des vents (montés à l'intérieur des bâtiments) ou ceux couverts par une pellicule de noir de fumée ou d'huile de transformateur, les couches ont toujours la forme continue. Sur les isolateurs non protégés des vents et non couverts par des pellicules graisseuses (endroits situés loin des zones industrielles), les couches de sable ont la forme discontinue. Les couches de sable sont peu adhérentes à la surface : entre les grains, ainsi qu'entre eux et la surface, existent des inclusions d'air. Elles ont été nommées : "couches perméables à l'air". Dans la plupart du temps, les couches sahariennes sont à l'état sec ou séché ; très rarement, elles sont mouillées totalement (au cours des grandes pluies ou de forte humidité) ou partiellement (au cours des précipitations sous la forme de traces de pluie).

L'épaisseur des couches de sable varie entre 0,2 à 2 mm ; elle est la plus grande au voisinage d'électrodes et des parties protégées des vents, par contre, sur les surfaces lisses, non protégées, disposées verticalement, elle est la plus petite.

2°) Sur la base d'étude des couches de sable saharien, on est arrivé à reproduire sur les modèles expérimentés en laboratoire des couches semblables où les dépôts ont été créés à partir de sable provenant de Hassi Messaoud et de In Amenas et possédant la même granulométrie que celui se trouvant sur les isolateurs en exploitation. Les surfaces des modèles avaient été d'abord préparées de telle sorte qu'elles étaient soit propres, soit couvertes d'une pellicule fine de noir de fumée ou d'huile de transformateur.

Les couches continues ont été créées par tamisage du sable fin, le tamis étant disposé au-dessus du modèle expérimenté. La durée de cette opération était définie par l'épaisseur de la couche (épaisseur moyenne de 0,2 à 2 mm). Pour la création des couches continues, les modèles étaient soumis à trois cycles consécutifs, composés chacun des quatre phases suivantes : a) mise sous tension (pour obtenir la concentration du sable au voisinage de l'électrode), b) tamisage, c) stabilisation pendant trois jours, d) soufflage (ressemblant à l'auto-nettoyage par les vents du Sahara).

Les méthodes employées pour la création des couches de sable correspondaient aux conditions d'ambiance du Laboratoire. Cependant, celles-ci semblaient conduire du point de vue de l'adhérence des grains de sable à la surface et de l'épaisseur de la couche, aux mêmes résultats que dans le cas de formation des couches au Sahara.

Les paramètres variables des couches polluantes ont été leur épaisseur et la quantité d'eau absorbée. Ces deux paramètres définissent la conductivité superficielle spécifique du modèle. Cette conductivité était située entre 1 pS et 26  $\mu$ S. La plus petite valeur correspondait à la couche de sable de 0,2 mm à l'état séché, la plus grande à la couche de sable de 2 mm à l'état totalement mouillé (saturée par l'eau : 25 % d'eau dans le sable).

3°) Les recherches des décharges superficielles ont été effectuées en premier lieu sur les modèles plats, caractérisés par leur capacité superficielle spécifique C constante. Le diélectrique de ces modèles était soit le plexiglas ( $\epsilon_r = 4$ ), soit le verre ( $\epsilon_r = 7,5$ ) plat. Le paramètre variable de ces diélectriques était leur épaisseur, située dans les limites de 0,2 à 4 cm. A cette épaisseur correspondait la capacité C entre 0,1 et 2,4 pF/cm<sup>2</sup>. La surface des modèles était d'abord propre puis polluée. Les caractéristiques des décharges

superficielles étudiées sur les modèles plats ont été les suivantes : forme de décharges, tension d'amorçage de l'étincelle glissante  $U_e$ , tension d'amorçage d'étincelle complète  $U_c$ .

Ces caractéristiques ont été d'abord étudiées dans le cas des surfaces propres, puis polluées par des couches de sable définies par différentes valeurs de la conductivité superficielle. Sur les surfaces propres, les recherches ont été effectuées uniquement dans un but de comparaison, car pour ce cas, les caractéristiques des décharges superficielles (étincelle glissante) sont déjà connues. Les paramètres variables des modèles plats ont été : la capacité spécifique superficielle  $C_s$  et la conductivité superficielle spécifique  $\sigma_s$ .

Les recherches ont été effectuées aussi sur quelques modèles cylindriques et isolateurs du type de traversée, de provenance du Sahara. Sur ces deux types de modèles, seulement les tensions de contournement 100 % ont été étudiées.

Dans tous les cas les décharges superficielles ont été étudiées sous les tensions de choc croissantes, dont la forme était  $1,2/50 \mu s$ . La constatation d'apparition de différentes formes de décharges était faite principalement par la méthode photographique, mais aussi selon les traces des décharges restant sur les couches polluantes (ces traces n'ont pu être constatées que pour les couches très minces).

En utilisant la méthode photographique, on est arrivé à constater que les décharges glissantes ont lieu principalement près de la surface du diélectrique ( $\sigma_s < 1 \mu S$ ), soit dans la couche polluante ( $\sigma_s > 2 \mu S$ ) mais jamais au-dessus de cette couche. Cela confirme la constatation "in situ" que les couches de sable de Hassi Messaoud et In Amenas sont peu adhérentes à la surface (couches perméables à l'air).

4°) Les formes de décharges près de la surface du diélectrique pour les tensions 1,2/50  $\mu$ s croissantes, ne dépendent que de la conductivité superficielle spécifique  $\sigma_s$ . En cas de couches de sable continues, nous avons constaté cette influence comme suit :

- Pour  $\sigma_s < 1 \mu$ S, les formes sont celles de décharges glissantes se produisant sur les surfaces propres (effluves et filets lumineux, étincelle glissante, étincelle complète). La conductivité est si faible qu'elle n'a pas influencé d'une manière essentielle la distribution du champ électrique. La capacité superficielle continue à jouer le rôle principal dans le mécanisme de décharges. Le champ qui décide de leur apparition est celui qui se forme à proximité de la surface du modèle au bord immédiat de l'électrode ou de la tête du canal de décharge et non celui à l'intérieur du sable.

- Pour  $\sigma_s \approx 1 \mu$ S, les décharges perdent la forme de décharge glissante. En particulier, les manches n'apparaissent plus, tandis que les filets et les petites aigrettes sont distribués sur la surface sous la forme diffuse.

- Pour  $\sigma_s > 1 \mu$ S (par exemple  $\sigma_s = 2,6 \mu$ S correspondant à la couche de sable d'In Amenas de 2 mm, mouillé par l'eau dans la proportion 1/20), les décharges sont réparties sur la totalité de la surface du modèle sous une forme complètement floue, sans aucune ressemblance avec l'étincelle glissante ; cette conductivité superficielle joue déjà le rôle prépondérant dans la distribution de champ et le mécanisme de décharge.

Dans le cas de couches de sable discontinues, la forme de décharges apparaissant sur la partie polluée de la surface du modèle dépend aussi de la conductivité  $\sigma_s$  de la couche et de la même manière que dans le cas des couches continues analogues. Cependant, sur la partie propre, les décharges ont eu la forme de décharges glissantes. Lorsque les couches discontinues ont été bien mouillées ( $\sigma_s > 2 \mu$ S) elles ont joué le rôle d'électrode.

Dans le cas de traces de pluie sur la surface propre, on a constaté l'existence de décharges sous la forme analogue à la forme d'étincelle glissante, mais avec les effluves sur la tête du filet (et non sur la tête d'un manche lumineux).

Cela était expliqué par la grande distance du filet considéré à l'électrode (grande chute de tension).

5°) La valeur limite de la conductivité superficielle spécifique  $\sigma_s$  au-dessus de laquelle les décharges avaient une forme sans aucune ressemblance avec les décharges glissantes était située entre 2 et 3  $\mu S$ . Déjà pour  $\sigma_s = 2 \mu S$  les décharges étaient difficilement décelables par la méthode photographique, et pour  $\sigma_s = 3 \mu S$ , aucune trace de décharge n'était visible sur les photogrammes : la couche de sable était si intensément mouillée qu'elle semble avoir complètement court-circuité le champ électrique le long de la surface.

La vérification de la valeur limite était effectuée sur un schéma équivalent dans lequel le champ du modèle était représenté par une chaîne de capacité linéique  $C_1$  et  $K_1$ , tandis que la conductivité de la couche polluante par une résistivité linéique  $R_1$ , parallèle à  $K_1$ . L'onde de choc 1,2/50  $\mu s$  était remplacée par une onde sinusoïdale de 210.000 Hz de même valeur de crête et l'impédance correspondant à  $K_1$  pour différentes épaisseurs du diélectrique était calculée et comparée par  $R_1$ .

Ce calcul a montré que pour les modèles expérimentés ayant des capacités superficielles  $C$  situées dans une très grande plage (englobant tous les cas pratiques), la résistivité superficielle  $C$  correspondant aux couches de sable mouillé de  $\sigma_s = 2$  à 3  $\mu S$  est sensiblement plus petite que l'impédance correspondant à la capacité  $K$ .

6°) La tension d'amorçage d'étincelle glissante  $U_e$  a été étudiée seulement sur des modèles expérimentés du type plat, propre et pollué par des couches de sable à l'état sec ou mouillé.

## 7.7.

Pour les surfaces propres ou polluées par les couches sèches, les valeurs de  $U_e$  ont été approximativement identiques et situées dans les mêmes limites que celles qui avaient été trouvées par les auteurs précédents, sur des modèles plats propres.

Pour les surfaces polluées par les couches de sable mouillé, les tensions  $U_e$  étaient peu au-dessous de celles mesurées sur les surfaces propres : pour  $\sigma_s \leq 1 \mu S$ , la diminution maximale ne dépassait pas 5 % ; pour  $1 < \sigma_s \leq 2 \mu S$  elle était plus grande mais au-dessous de 10 %. Pour les couches de sable de 0,1 à 2 mm saturées par l'eau ( $\sigma_s = 2,5$  à  $25 \mu S$ ) les décharges glissantes étaient diffuses et la tension  $U_e$  n'a pas été mesurée.

7°) La tension d'amorçage d'étincelle complète  $U_c$  (100 %) a été étudiée sur tous les modèles expérimentés (plats, cylindriques, isolateurs de traversée). Elle dépendait de la conductivité  $\sigma_s$  de la façon identique. Cependant, pour les couches de sable saturées par l'eau ( $\sigma_s = 2,5$  à  $25 \mu S$ ), la diminution de la tension  $U_c$  (100 %) est de 10 à 20 % (les 20 % constituant un maximum) par rapport aux surfaces propres.

8°) Sur le plan pratique, on constate donc :

Il n'y a pas de raison de procéder à un surdimensionnement des isolateurs destinés à des montages à l'intérieur des bâtiments dans les deux régions étudiées ; pour ce genre d'installation les couches de sable peuvent être considérées comme sèches. Il est justifiable de surdimensionner des isolateurs du type de traversées prévus pour des installations à l'extérieur des bâtiments.

En ce qui concerne les recherches ultérieures, nous proposons les suggestions suivantes :

a) La recherche des dépôts naturels devrait constituer la continuation logique de la présente recherche. Etant donné que ce genre de dépôts ne supporte pas bien le transport, il serait nécessaire d'organiser sur place un laboratoire pour cette recherche, par exemple à Hassi Messaoud ou In Amenas, à proximité d'un bâtiment d'énergie. Ce laboratoire, équipé en sources de haute tension, permettrait d'étudier l'influence des dépôts naturels formés sur de longues périodes (des mois ou des années).

b) Les recherches au Sahara doivent s'élargir sur d'autres régions également, où le sable est d'une autre origine, en englobant des couches adhérentes à la surface (imperméables à l'air). Dans tous les cas, les essais sur des isolateurs doivent s'effectuer dans les conditions sahariennes (vents de sable, fortes pluies, brouillard et orages).

c) Parallèlement aux recherches sahariennes, les recherches ultérieures doivent être consacrées au perfectionnement des méthodes de création des couches artificielles à partir du sable du Sahara et des couches équivalentes, par exemple produites par les brouillards salins.

## BIBLIOGRAPHIE

Publications correspondant aux repères dans le texte.

- 111 KUHLMAN K. Hochspannungsisolatoren. Arch. für Elektrotechnik, 1921, vol. 3, p. 203.
- 121 TOEPLER, M. Über die physikalischen Grundgesetze der in der Isolatorteknik auftretenden elektrischen Gleiterscheinungen. Arch. für Elektrotechnik, 1921, vol. 10, N° 5 et 6, p. 157 - 185.
- 131 NEUMÄRKER, G. Vorentladungen auf der Oberfläche von Isolierungen. Diss. der TU Dresden, 1963.
- 141 PAPEN, H. Über die Streifen- und Gleitbüschelanfangesspannung bei Wechsel- und Stossspannung. Diss. TH Darmstadt, 1951.
- 151 ROTH, A. Hochspannungstechnik, 5ème édition, Springer-Verlag, Wien-New-York, 1965, p. 28 - 294..
- 161 MARX, E. Hochspannungspraktikum, 2ème édition, Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1952, p. 116.
- 171 HAFELY, E. Studien an Durchführungen unter spezieller Berücksichtigung der Luftmanteldurchführung. Diss. TH Darmstadt.
- 191 KAPPELER, H. Hartpapierdurchführung für Höchstspannungen. Bulletin des Schweiz. Elektr. Ver., 1949, N° 21, p. 807 - 815.
- 1101 JAKOBY-TOEPLER Gleitentladungen bei Wechselspannung. Ztschr. Techn. Phys., 1953, N° 14.
- 1111 LIDMANOWSKI, W. Niektóre zagadnienia wyładowań slizgowych. Rozprawy Elektrotechniczne, 1964, vol. 10, N° 3, p. 343 - 358.
- 1121 ELSNER, R. - REBHAN, J. Die Überschlagfestigkeit von Hochspannungsdurchführungen bei Stoss- und Wechselspannung. Arch. für Elektrotechnik, 1937, vol. 35, p. 398 - 411.
- 1131 LICHTENBERG, G.C. Über eine neue Methode, die Natur und die Bewegung der elektrischen Materie zu erforschen. Novi Commentari, 1777, vol. 7. (d'après : Oswalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Leipzig, 1959).
- 1141 GÄNGER, B. Der Elektrische Durchschlag von Gassen. Springer Verlag, Berlin - Göttingen - Heidelberg, 1953.
- 1151 MEEK, J.M. Electrical Breakdown of Gases. Oxford University Press, 1953.

1161 STRIGEL, R. Elektrische Stossfestigkeit, 2ème édition, Springer Verlag, Berlin - Göttingen - Heidelberg, 1955.

1171 MERRILL, F.H. - VON HIPPEL, A. Atomphysical Interpretation of Lichtenberg Figures. J. Appl. Phys., 1939, p. 873.

1181 MASSER, E. Die Zeitliche Entwicklung positiver Entladungskanäle längs der Oberfläche von Isolierfilmen, Archiv für Elektrotechnik, 1959, vol. 44, N° 7.

1191 HUETER, E. - PAPEN, H. Über Gleitentladungen, ETZ - A, 1953, p. 15.

1201 QUENEY, P. Classification aérologique des types de temps du Sahara français. Extrait des travaux de l'Institut de Recherche Saharienne, Alger, Imp. Imbert, 1945, tome 3.

1211 DUBIEF, J. Le climat du Sahara, Alger, 1963, tome 2.

1221 MITTNER, R. Facteurs et situations météorologiques à considérer dans les problèmes de pollution atmosphérique. Paris 7e, 1956.

1231 ENEMA Recueil de données climatologiques, période 1960-69, Alger.

1241 ENEMA Rapports mensuels internes de stations météorologiques de Hassi Messaoud et In Amenas, relatifs à l'année 1972 (mis à la disposition de l'auteur).

1251 DUBIEF, J. Le climat du Sahara, Alger, 1959, tome 1.

1261 MAYENCON, R. Conditions synoptiques donnant lieu à des précipitations torrentielles au Sahara. Paris, 1961.

1271 TSCHIRHART, G. Remarques sur le mécanisme du cumulonimbus et applications diverses en météorologie, Paris, 1961.

1281 FRAILLETAZ, M. Résultats des observations actinométriques effectuées à Tamanrasset. Année Polaire Internationale 1932-33. Participation française, Gauthier-Vilars, P Paris, 1938, tome 2, p. 101-123.

1291 JAKUBOWSKI J.L. Podstawy teorii przepieci wukladach energoelektrycznych. Warszawa, 1968.

1301 DUBIEF, J. Les vents et le déplacement des sables du Sahara. Travaux de l'Institut de Recherche Saharienne. 1952, tome VIII, p. 123 - 164.

1311 ENEMA Résumé mensuel du temps en Algérie : mois de Janvier, Alger. 1971.

1321 GARCON, H. Centrale thermique Haoud-El-Hamra, Extrait de la Revue MODERNISATION, Algérie-Sahara, N° 31-32.

- 1331 KNUDSEN, N. - HERMANSSON, L. Essais à long et à court terme d'isolateurs pollués. CIGRE, Rapport 25-02.
- 1341 Recommandation de la CEI - Technique des essais à haute tension, Publication 60-1, 1973, p. 32.
- 1351 RIZK, F.A.M. - EL SARKY, A.A. - ASSAAD, A.A. - AWAD, M.M. Essais comparatifs sur des isolateurs pollués, concernant les conditions rencontrées dans les déserts. CIGRE 1972, Rapport 33-03.
- 1361 SKOWRONSKI, J.I. Influence du type de pollution sur le choix de la forme des isolateurs extérieurs et leurs essais. CIGRE 1948, Rapport 25-07.
- 1371 VON CRON, H. - DORSCH, H. Détermination de l'isolement des réseaux de transport par rapport aux surtensions, à la fréquence de service et aux surtensions transitoires compte tenu de la diminution du pouvoir isolant due à des couches étrangères superficielles. CIGRE, 1958, Rapport 402.
- 1381 VON CRON, H. Essais d'isolateurs recouverts artificiellement de couches étrangères. CIGRE 1956, Rapport 203.
- 1391 FRISCHMANN, W. Der Einfluss von Höhe und Wirkdauer der Spannung auf den Fremd-Schichtüberschlag. Wissensch. Z. TU Dresden, 1957, tome 6, p. 931 - 935.
- 1401 FORREST, J.S. - VON CRON, H. - GION, M.L. - JOSSE, M.H. - VON TREUFELS, H. Mesure du comportement des isolateurs en atmosphère polluée. CIGRE, 1960, Rapport 234.
- 1411 OBENAUS, F. Fremdschichtüberschlag und Kriechweglänge. Deutsche Elektrot., 1958, N° 4.
- 1421 LACOSTE, R. - RAHAL, A. Recherches sur les isolateurs composites. Problème du contournement. Laboratoire de Génie Electrique - Université de Toulouse, 1974.
- 1431 HURAU, C. - RAHAL, A. Analyse de l'instabilité d'une décharge à la surface d'un isolant à partir du modèle unidimensionnel d'Obenaus. Laboratoire de Génie Electrique de Toulouse, 1974.
- 1441 LORENZ, H. - HINZE, O. - KÜHN, H. Hochspannungstechnik, 2ème édition, VEB-Verlag Technik, Berlin, 1968.