

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN RESSOURCES ET SYSTÈMES

PAR

MYRIAM HAMEL

B.SC.A.

INFLUENCE DE LA VARIATION DE LA TEMPÉRATURE AMBIANTE

SUR LES VIBRATIONS INDUITES PAR EFFET DE COURONNE

AOÛT 1991



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

RÉSUMÉ

L'objet de ce travail était l'étude de l'influence de la température ambiante sur les vibrations induites par effet de couronne d'un conducteur porté à la haute tension sous condition de pluie. L'amplitude de vibrations étant proportionnelle à la valeur crête du courant pulsatoire (I_p) observé lors du détachement de la goutte du conducteur, on a étudié plus précisément la variation du courant de décharge en fonction de la température ambiante sous les tensions continues positives et négatives. La gamme de température utilisée se situait dans l'intervalle 0° à 60° C.

Les résultats obtenus ont démontré que l'élongation maximale de la goutte et par conséquent l'intensité du courant de décharge variait non seulement en fonction de la valeur du champ électrique mais aussi en fonction de la valeur de la température ambiante. Le courant de décharge diminuait lorsque la température augmentait. L'élongation critique était beaucoup plus grande pour les températures près de 0° C que pour les températures avoisinantes de 60° C. Cela a été expliqué principalement par la variation de la viscosité avec la température.

Les études théorique et expérimentale nous ont amené à la conclusion que l'amplitude de vibrations diminue lorsque la température ambiante augmente.

Un modèle physique représentant le comportement d'une goutte d'eau soumise à une vibration sinusoïdale a été développé. On a déterminé la constante K_{eau} d'un système masse-ressort modélisant une goutte d'eau à l'aide de résultats expérimentaux.

REMERCIEMENTS

Je remercie Monsieur Masoud Farzaneh, mon directeur de thèse, pour l'aide apportée et les judicieux conseils prodigués durant toute la durée de ce mémoire.

Ma gratitude va également à Monsieur Mario Hamel pour son aide précieuse dans la conception du montage expérimental et à M. Claude D'Amours pour son aide technique.

Je désire remercier également ma famille, mes amis et le personnel de l'Université du Québec à Chicoutimi, qui ont contribué de quelque façon que ce soit à l'avancement de ce travail de recherche.

Table des matières

Résumé.....	i
Remerciements	iii
Liste des figures	vii
Introduction	1
Chapitre I — Effet de couronne et ses conséquences.....	4
1.1 Définition.....	4
1.2 Processus de la décharge de couronne.....	4
1.3 Seuil critique de l'effet de couronne	5
1.4 Modes de décharge par effet de couronne.....	6
1.4.1 Effet de couronne en tension continue positive (configuration pointe-plan).....	7
a) Impulsions au début du phénomène	7
b) Lueur de Hermstein.....	8
c) Effluves positifs.....	8
1.4.2 Effet de couronne en tension continue négative (configuration pointe-plan).....	8
a) Impulsions de Trichel.....	8
b) Lueurs négatives	9

c) Effluves négatifs	9
1.4.3 Effet de couronne en tension alternative (configuration pointe-plan).....	10
1.4.4 Décharge couronne sur une goutte d'eau sous tension continue.....	13
a) Polarité positive.....	13
b) Polarité négative	14
1.4.5 Décharge couronne sur une goutte d'eau sous tension alternative.....	15
1.5 Conséquences de l'effet de couronne dans l'air à la pression atmosphérique	16
1.5.1 Pertes.....	16
1.5.2 Interférences radio télévision.....	17
1.5.3 Bruit audible.....	17
1.5.4 Vibrations mécaniques	17
 Chapitre II — Comportement des gouttes d'eau dans un champ électrique.....	21
2.1 Constatations d'ordre général.....	21
2.2 Modification du champ électrique due à la présence des gouttes d'eau	23
2.3 Les forces agissant sur une goutte d'eau et l'influence de la température.....	25
2.3.1 Forces d'adhésion	26
2.3.2 Forces de gravité.....	27

2.3.3	Tension de surface.....	28
2.3.4	Forces électrostatiques	29
Chapitre III — Modélisation physique d'une goutte d'eau soumise		
	à une vibration mécanique.....	33
3.1	Déformation de la goutte d'eau dans le temps	33
3.2	Modèle physique: Système masse-ressort.....	37
Chapitre IV — Études expérimentales et discussion.....		
4.1	Problématique.....	44
4.2	Montage expérimental.....	44
4.3	Résultats expérimentaux	49
4.3.1	Influence de la fréquence et de l'amplitude de vibrations	51
4.3.2	Influence de la polarité du champ électrique.....	54
4.3.3	Influence de la température ambiante.....	57
4.3.4	Influence de la température sur les vibrations induites d'un conducteur sous une pluie artificielle.....	72
4.4	Calcul de la constante K_{eau} du modèle physique de la goutte.....	77
4.5	Discussion des résultats	80
Chapitre V — Conclusion.....		
		84
Bibliographie		
		86

Liste des figures

Figure 1:	Mécanisme proposé pour l'amorçage du mouvement	20
Figure 2:	Angle de contact grand.....	26
Figure 3:	Angle de contact petit.....	27
Figure 4:	Position et accélération du conducteur en fonction du temps	35
Figure 5:	Modèle physique d'une goutte d'eau.....	37
Figure 6:	Position de la goutte et modèle physique correspondant	38
Figure 7:	Position du conducteur et de la goutte.....	40
Figure 8:	Graphe linéaire	41
Figure 9:	Différents composants du montage expérimental.....	47
Figure 10:	Montage expérimental.....	48
Figure 11:	Fréquence critique en fonction du volume des gouttes	52
Figure 12:	Fréquence critique en fonction du déplacement.....	53
Figure 13:	Champ électrique (E_d) en fonction du volume d'eau (c.c.+ et c.c.-)	55
Figure 14:	Champ électrique (E_d) en fonction du volume d'eau (fréquence 2,5 et 4 Hz).....	56

Figure 15: Champ électrique (E_d) en fonction du volume d'eau (déplacement 1 et 5 cm)	58
Figure 16: Champ électrique (E_d) en fonction de la température ambiante (c.c.+ et c.c.-).....	60
Figure 17: Courant de décharge en polarité positive et négative.....	61
Figure 18: Courant de décharge (I_p) en fonction de la température ambiante.....	63
Figure 19: Champ électrique (E_d) en fonction de la température ambiante (c.c.+ avec et sans vibrations).....	64
Figure 20: Champ électrique (E_d) en fonction de la température ambiante (c.c.- avec et sans vibrations)	65
Figure 21: Longueur critique en fonction la température ambiante	66
Figure 22: Volume optimum en fonction de la température ambiante.....	68
Figure 23a: Séquence de la déformation d'une goutte d'eau	69
Figure 23b: Séquence de la déformation d'une goutte d'eau	70
Figure 24: Position du conducteur correspondant à la séquence photographique	71
Figure 25: Montage expérimental avec conducteur lisse.....	73
Figure 26: Amplitude de vibrations et courants de décharge du conducteur aux dimensions réelles.....	76
Figure 27: Position du conducteur et d'une goutte de 15 μ L.....	79
Figure 28: Longueur critique et volume optimum sans vibrations.....	82
Figure 29: Longueur critique et volume optimum à 2,5 Hz	83

INTRODUCTION

Les premières publications sur l'effet de couronne datent de 1911 avec les travaux effectués par un des génies de cette époque, M. F. Peek. Depuis ce temps, un nombre impressionnant de travaux de recherche concernant l'effet de couronne sur les lignes aériennes de transport d'énergie électrique ont été effectués et publiés. Ces recherches portaient essentiellement sur les pertes par effet de couronne et l'interférence radiophonique.

Vers les années 1950, les très hautes tensions utilisées pour le transport d'énergie électrique ont amené les concepteurs à considérer un autre phénomène. En effet, en présence de pluie, de brouillard ou de neige mouillée, on observe des vibrations mécaniques induites par effet de couronne sur les conducteurs portés à la haute tension.

L'étude des vibrations induites par effet de couronne, menée depuis quelques années à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), a permis d'identifier et de vérifier expérimentalement les mécanismes de ce type de vibrations. Selon l'auteur, M. M. Farzaneh, professeur-chercheur à l'UQAC, ce phénomène s'explique principalement par la présence intermittente de la charge d'espace et du vent électrique sous les gouttes

d'eau suspendues au conducteur. La variation de la charge d'espace est due à la déformation des gouttes d'eau lorsqu'une tension élevée est appliquée au conducteur.

En fait, la forme des gouttes d'eau adhérant aux conducteurs haute tension, soit hémisphérique ou cylindrique, est le résultat de l'interaction des forces d'origine électrostatique, d'adhésion, de tension de surface et de gravité. Pour déterminer l'effet de chacune de ces forces, on doit tenir compte des propriétés physiques de la goutte d'eau et tout particulièrement de l'influence de la température ambiante sur celles-ci.

Les constatations suivantes nous portent à s'interroger sur les changements apportés par la variation de la température ambiante sur la densité de la charge d'espace et la vitesse du vent électrique. On doit déterminer si l'amplitude des vibrations et l'intensité du champ électrique à laquelle les vibrations apparaissent sont fonction de la température ambiante. À notre connaissance, les conséquences de la variation de la température sur les vibrations induites par effet de couronne, n'ont pas encore fait l'objet d'une étude.

Le but de ce travail est d'étudier l'influence de la température ambiante sur les vibrations induites par effet de couronne. Pour ce faire, à l'aide d'un court rappel théorique et d'une revue des travaux antérieurs sur le sujet, on analysera la déformation de la goutte d'eau en fonction du déplacement vertical du conducteur. Ensuite, un modèle physique sera proposé. On étudiera l'influence de la température ambiante et de l'intensité

du champ électrique sur la déformation d'une goutte d'eau soumise à une vibration mécanique. Enfin, on vérifiera expérimentalement l'approche théorique avancée.

CHAPITRE I

EFFET DE COURONNE ET SES CONSÉQUENCES

1.1 DÉFINITION:

Toutes les décharges prédisruptives apparaissant sous la forme de lueurs diverses et qui prennent naissance au voisinage d'une électrode à faible rayon ou dans un champ non uniforme se qualifient de décharges couronnes.

1.2 PROCESSUS DE LA DÉCHARGE DE COURONNE

Il existe toujours dans l'air un certain nombre d'électrons libres, créés par rayonnements cosmiques ou dus à l'ionisation naturelle par les substances radioactives dans la terre. Lorsque ces électrons sont soumis à un champ électrique élevé, ils sont accélérés, et si le champ est assez intense, l'énergie qu'ils acquièrent devient suffisante pour provoquer l'ionisation des molécules neutres qu'ils heurtent. Il se crée alors de nouveaux électrons libres lesquels soumis au même champ, vont également ioniser des molécules et ainsi de suite; le processus prend une allure d'avalanche dite de Townsend. Pour

qu'une telle avalanche puisse se maintenir, il faut qu'elle atteigne une taille critique, et que le champ ait une valeur suffisante [3].

1.3 SEUIL CRITIQUE DE L'EFFET DE COURONNE

Lorsqu'un conducteur est soumis à une tension croissante, le champ critique d'effet de couronne est défini par l'apparition brusque d'une importante conductivité de l'air dans son voisinage immédiat.

Selon F.W. Peek, pour une configuration cylindrique, l'apparition de l'effet de couronne est fonction du champ superficiel, du rayon du conducteur, et de la densité de l'air [3].

$$E_c = E_p \delta \left(1 + \frac{K}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad (1)$$

où $E_p = 31 \text{ kV/cm}$

$K = 0,308$

$\delta = \text{densité relative de l'air} = 3,92P/(273 + t)$

($\delta = 1$ pour $P = 76 \text{ cm Hg}$ et $t = 25^\circ$)

$t = \text{température en } ^\circ\text{C}$

$r = \text{rayon du conducteur en cm}$

$E_c = \text{champ critique en kV/cm}$

$P = \text{pression de l'air en cm Hg}$

Cette formule reliée à l'effet de couronne montre un effet non-négligeable de la température ambiante sur les vibrations induites par effet de couronne. En effet, à pression constante, pour une température qui varie entre 0° et 60° C on obtient un champ critique différent soit: 44,18 kV/cm pour 0° C et 37,87 kV/cm pour 60° C. Ainsi l'effet de couronne apparaît à une tension plus faible lorsque la température augmente.

Il est à noter que l'état de surface du conducteur est très important dans la détermination du champ électrique. La relation précédente ne se vérifie que pour des surfaces parfaitement polies. La rugosité superficielle diminue le champ critique, et on tient compte de cet effet en attribuant au conducteur un coefficient expérimental $m \leq 1$, appelé coefficient de surface. Le champ critique E_0 d'un conducteur imparfaitement poli s'exprime alors sous la forme $E_0 = mE_c$ [3].

1.4 MODES DE DÉCHARGE PAR EFFET DE COURONNE

On appelle "décharge partielle" ou "effet de couronne" l'ensemble des phénomènes qui précèdent le claquage. La décharge partielle a lieu surtout à pression élevée dans un champ électrique non-uniforme [3].

Dans le cas qui nous intéresse, soit une goutte d'eau suspendue à la surface d'un conducteur cylindrique, les phénomènes observés sont qualitativement très semblables à ceux qu'on observe en géométrie pointe-plan. Voici donc la description des différents modes de décharge par effet

de couronne pour cette configuration qui illustre bien ce qui se passe pour une goutte d'eau.

Deux types de décharge partielle, l'une en tension continue positive, l'autre en tension continue négative ont été distinguées. La décharge sous tension alternative est une combinaison des deux précédentes.

1.4.1 Effet de couronne en tension continue positive (configuration pointe-plan)

a) Impulsions au début du phénomène

C'est la première manifestation lumineuse visible près de l'électrode. Lorsque la tension appliquée dépasse un certain seuil, une décharge lumineuse constituée de nombreux filaments apparaît au voisinage de la pointe. La durée totale du phénomène est de quelques centaines de nanosecondes, pendant lesquelles les streamers se propagent avec une vitesse de 10 à 100 cm/ μ s [3]. Le temps de montée et la durée totale de chaque impulsion sont plus longs comparativement à une impulsion de Trichel (décharge négative) [1]. Le taux de répétition augmente avec la tension appliquée jusqu'à un maximum où elles cessent d'apparaître. L'intervalle de tension où l'on peut observer ce mode de décharge est très mince et dépend de la géométrie de l'électrode et de la distance entre les électrodes [2].

b) Lueur de Hermstein

Si on augmente davantage la différence de potentiel, l'impulsion au début est remplacée par une lueur stable, lueur de Hermstein, adhérant à la surface de l'électrode [2]. Essentiellement pour obtenir ce mode de décharge, le champ électrique doit être intense à proximité de la pointe et il doit y avoir présence d'une charge d'espace négative non négligeable. L'intervalle de tension dans lequel ce mode de décharge existe varie selon la géométrie de l'électrode. Pour une géométrie donnée, l'intervalle peut être dix fois plus grand que celui des impulsions du début.

c) Effluves positifs

Après la lueur de Hermstein, si la tension appliquée est augmentée, les effluves positifs apparaissent. Ces effluves ne diffèrent pratiquement pas des impulsions du début, mais ils sont beaucoup plus longs et plus puissants. Ce sont des streamers qui précèdent le claquage [3].

1.4.2 Effet de couronne en tension continue négatif (configuration pointe-plan)

a) Impulsions de Trichel

Dès que le champ critique est atteint au sommet de la pointe, on observe l'apparition des impulsions de Trichel [3]. Elles constituent les

premiers phénomènes d'ionisation décelables près de la cathode. Ces impulsions de mêmes amplitudes sont de très courte durée et apparaissent à intervalles réguliers sous la forme d'un cône lumineux [2]. L'intensité lumineuse et la longueur des streamers sont beaucoup plus faibles qu'en polarité positive.

b) Lueurs négatives

En augmentant la différence de potentiel, on a davantage d'accumulation de charges d'espace et les impulsions de Trichel, décharges partielles intermittentes, sont remplacées par une décharge continue [3]. Ainsi on observe un autre mode de décharge: la lueur négative. Selon Giau et Jordan [7], il existe une fréquence critique des impulsions de Trichel qui correspond à la transition entre deux modes de décharge. Cette transition est accompagnée par un saut de l'intensité du courant de l'ordre de quelques dizaines de μA [3].

c) Effluves négatifs

Pour une très très haute tension, le claquage à la cathode peut être précédé par des effluves négatifs. L'apparition de ce mode de décharge implique une distance inter-électrode importante afin d'éviter un court-circuit du dispositif. L'existence de ce mode de décharge est peu probable sur les lignes aériennes [1].

1.4.3 Effet de couronne en tension alternative (configuration pointe-plan)

Lorsqu'une tension alternative est appliquée à des électrodes, on observe quelques différences en comparaison avec l'effet de couronne pour un champ c.c.. Cela est dû principalement à l'oscillation de la tension et au mouvement oscillatoire de la charge d'espace développée par l'effet de couronne [7].

Il est à noter qu'on a choisi une configuration pointe-plan pour expliquer ce phénomène puisqu'elle s'apparente bien à une goutte d'eau, de plus elle peut être considérée comme une simple source de décharge couronne.

La première différence observée en comparaison avec l'excitation c.c. pour cette configuration, est l'absence des impulsions au début pour la demi-alternance positive de la tension. Par contre, dans le cas où l'espace inter-électrode est vraiment petit, la charge d'espace est alors évacuée avant que la polarité du champ soit inversée et on peut ainsi observer les impulsions au début du phénomène [2].

Un calcul simple montre que la distance maximale entre deux électrodes planes et parallèles, d_{\max} , nécessaire pour que la charge d'espace produite pendant une alternance soit évacuée avant que la polarité du champ soit inversée, est donnée par la relation suivante [1].

$$d_{\max} = \frac{\mu E_{\max}}{2\pi f} \quad (2)$$

où f est la fréquence du champ alternatif, μ la mobilité des ions et E_{\max} l'amplitude maximale du champ. Des équations analogues peuvent être développées pour déterminer la distance maximale pour les champs non uniformes [1].

Lorsque la distance entre les électrodes est inférieure à la distance d_{\max} , on observe les mêmes modes de décharge qu'en courant continu. Pour les distances inter-électrodes supérieures à d_{\max} , il y a accumulation de charges d'espace [1]. En effet, pour les grandes distances les ions positifs n'ont pas le temps d'être évacués pendant l'alternance positive. Leur présence autour du conducteur augmente le champ électrique existant. Par conséquent le mode de décharge suivant a lieu à une tension appliquée plus faible.

La lueur de Hermstein est un mode d'émission en polarité positive qui a la propriété d'être continu. Elle a lieu généralement, en tension alternative, immédiatement au-dessus du seuil positif. Sa participation est importante dans la formation de pertes par effet de couronne [6].

Les effluves positifs, mode d'émission impulsionnel, apparaissent au-delà de la zone continue d'Hermstein, pour des champs positifs un peu supérieurs. Le courant d'émission prend la forme d'une série irrégulière d'impulsions de grandes amplitudes (≥ 100 mA). Leur mécanisme de

formation est du type "streamer". Ce sont ces effluves qui sont responsables des perturbations radioélectriques [6].

Les impulsions de Trichel se comportent similairement sous les tensions c.a. et c.c., c'est-à-dire que leur amplitude diminue et que leur taux de répétition augmente selon la valeur instantanée de la tension [2]. Les impulsions sont d'autant plus petites et plus serrées que la pointe est fine; leur amplitude est de l'ordre du milliampère mais elles sont caractérisées par des fronts de montée très raides, de l'ordre de la dizaine de nanosecondes. Le mécanisme de ces impulsions est du type avalanche négative [6].

Le mode lueur négative, mode de décharge sans impulsion, se produit à des tensions plus faibles que celles observées en c.c.. Ceci est dû à l'importante quantité des charges d'espace en c.a.. C'est probablement une des raisons pour laquelle les perturbations radiophoniques sous pluie sont importantes en c.a. [5].

Après la lueur négative, il existe occasionnellement (très peu probable) un autre mode: les effluves négatifs qui se produisent parfois juste avant la disruption. Les impulsions créées par les effluves en c.a. apparaissent donc aux pics (ou proche) des alternances [5]. Donc un autre aspect particulier de la décharge couronne en c.a. dans un champ non symétrique est que souvent aucun effluve négatif n'est généré, leur apparition étant liée près de la tension de claquage dans la demi-alternance positive [2].

1.4.4 Décharge couronne sur une goutte d'eau sous tension continue

a) Polarité positive

Selon les études menées par English [2] sur une goutte d'eau en configuration pointe-plan sous tension continue positive, il existe quatre régimes de tension distincts:

1. Régime d'impulsions de décharge couronne avec pulvérisation de microgouttelettes d'eau.
2. Régime d'effluves sans éjection d'eau.
3. Régime stable de décharge couronne sans pulvérisation d'eau.
4. Régime de délestation des gouttes accompagnées de grandes impulsions électrostatiques dues à la gouttelette quittant la pointe.

Initialement la décharge est caractérisée par des impulsions au début associées à l'éjection de microgouttelettes. En augmentant la tension, une lueur stable de décharge couronne apparaît et l'éjection des gouttelettes cesse. Finalement on atteint le régime de délestation des gouttes [2]. À noter que dans ce travail, on caractérise le régime de délestation des gouttes par la tension appliquée lorsqu'une gouttelette visible à l'oeil se détache de la goutte. On fait référence à cette tension sous le nom de tension de délestage, et au champ électrique correspondant par E_d .

b) Polarité négative

En polarité négative, une confusion existe concernant la nature des décharges qui sont émises à partir de la surface d'eau.

Puisque l'eau est un émetteur secondaire très pauvre, l'émission d'électrons provenant de l'eau dans un champ électrique non-uniforme est très faible. Pour cette raison, Loeb a nié l'existence des ondes de Trichel près de la surface de l'eau en expliquant les oscillations par les aigrettes "streamer" rétrogrades provenant de fines gouttelettes émises par la pointe d'eau [7].

Selon Boulet et Jordan [17], leur étude sur une goutte d'eau distillée a montré qu'après les vibrations initiales et la disparition de l'eau en excès on obtient le régime stable de la goutte pointue sans pulvérisation d'eau. Les décharges sont ordinairement limitées à un point de la goutte mais quelquefois, on a observé aussi un déplacement du point d'émission comme sur l'électrode métallique. Les décharges ressemblent aux ondes de Trichel mais la répétition de celles-ci est beaucoup plus faible. La forme du courant émis paraît également plus complexe.

Les impulsions de Trichel ne peuvent donc pas se développer près des gouttes d'eau portées à un potentiel négatif à cause du manque d'électrons libres dans la région de la forte valeur du champ. Dans ces conditions, la répétition des impulsions est aléatoire et dépend de l'intensité du rayonnement ambiant [7].

1.4.5 Décharge couronne sur une goutte d'eau sous tension alternative

On observe pour un champ alternatif une plus grande instabilité des gouttes suspendues au conducteur que pour un champ continu. Lorsque le champ électrique augmente, on observe successivement des vibrations latérales à la fréquence du réseau, des oscillations verticales et des déplacements horizontaux de la goutte sur le conducteur [26].

La goutte d'eau forme un cône vibrant d'où des gouttelettes miniatures sont éjectées occasionnellement. Au début les périodes d'éjections sont intermittentes ainsi que la décharge couronne qui prend la forme d'impulsions pour la demi-alternance négative et une lueur stable pour la positive. L'amplitude et la durée de la lueur stable augmente avec le potentiel [2].

Pour une excitation à courant alternatif, sur une goutte d'eau en configuration pointe-plan, les impulsions ont une allure très voisine de celle des ondes de Trichel, mais certaines anomalies existent comme la diminution de l'amplitude de décharges en fonction du temps pendant la demi-période négative. Donc à la pression atmosphérique et pour une excitation à tension alternative de 60 Hz, l'effet de la charge d'espace peut être considéré comme suffisant pour rétablir les ondes de Trichel en l'absence d'émission secondaire d'électrons [17].

Durant la demi-alternance positive, la charge d'espace négative produite durant la demi-alternance négative supprime les impulsions au début et favorise la lueur d'Hermstein.

1.5 CONSÉQUENCES DE L'EFFET DE COURONNE DANS L'AIR À LA PRESSION ATMOSPHERIQUE

1.5.1 Pertes

Dans une décharge couronne, une grande partie de l'énergie électrique est perdue dans les collisions entre les molécules neutres du gaz. Ainsi les pertes dépendent principalement de la quantité de charge produite. De plus elles sont fortement influencées par l'état de surface du conducteur et par les conditions climatiques. En effet, la valeur moyenne annuelle des pertes par effet de couronne est relativement faible soit de l'ordre de quelques kW/cm. Mais par mauvais temps on peut atteindre une valeur maximum de pertes par effet de couronne plus de vingt fois plus grande que la valeur moyenne. Ces augmentations ont une influence sur la livraison d'énergie surtout pendant les périodes de pointe. Pour ces raisons les concepteurs de ligne déterminent le diamètre et le nombre de conducteurs par phase en considérant le champ critique d'apparition de l'effet de couronne et de l'intensité de précipitation [1].

1.5.2 Interférences radio télévision

La nature impulsionnelle de la décharge couronne est à l'origine des parasites ou interférences radio télévision qui peuvent être captées par les antennes des récepteurs qui se trouvent proches des lignes de transport d'énergie (moins de 100 m). Outre l'effet de couronne, les étincelles ou les petits arcs électriques sont également responsables de perturbations [1].

1.5.3 Bruit audible

L'effet de couronne est à l'origine d'une onde sonore produite par une variation locale de la pression qui se propage dans l'air environnant. La principale source de bruit audible provient des gouttes suspendues ou des gouttes passant à proximité des conducteurs. Il a été observé aussi que le givre est un générateur de bruit audible. De plus, en présence de la vibration induite par effet de couronne sous pluie, les bruits irréguliers sont parfois modulés à la fréquence de vibration mécanique des conducteurs [1].

1.5.4 Vibrations mécaniques

Lors de la pluie et en présence d'un champ électrique, les conducteurs des lignes de transport d'énergie électrique se mettent à vibrer à la fréquence naturelle de la portée. Ce type de vibration est associé à la décharge par effet de couronne des gouttes d'eau suspendues en-dessous des conducteurs.

L'amplitude des vibrations est de l'ordre de 10 cm avec une fréquence de 1 à 10 Hz [1].

Le mécanisme d'amorçage des vibrations qui joue un rôle capital dans ce problème s'explique comme suit:

Dû à l'intensification du champ à la pointe de la goutte d'eau, l'effet de couronne apparaît, et par conséquent il y a augmentation de la charge d'espace autour des gouttes suspendues. La présence de la charge d'espace cause une diminution du champ électrique à la pointe produisant ainsi la décroissance de la force attractive existant entre chaque goutte et son image. Ainsi des forces de répulsion d'origine électrostatique dirigées verticalement vers le haut, seront appliquées et le conducteur est alors poussé vers le haut (figure 1) [1].

À cette position du conducteur, si la forme des gouttes d'eau suspendues demeurait inchangée, c'est-à-dire si l'intensité de décharge demeurait constante, le conducteur resterait à cette position (en haut). Cependant, il est évident que les gouttes d'eau changent de forme; quand les gouttes suspendues atteignent une grandeur critique, elles deviennent instables et des gouttelettes d'eau sont éjectées du conducteur. Le courant de fuite décroît et les gouttes restant sur le conducteur perdent leur forme conique [1].

Conséquemment, l'activité de décharge devient faible et la charge d'espace diminue. Il en résulte que la force d'attraction entre le conducteur et la terre devient importante et le conducteur se déplace vers le bas. Sous la

pluie les gouttes d'eau suspendues s'effilent à nouveau et la charge d'espace augmente. L'élongation des gouttes d'eau devient synchronisée avec le mouvement du conducteur et le phénomène se répète [1].

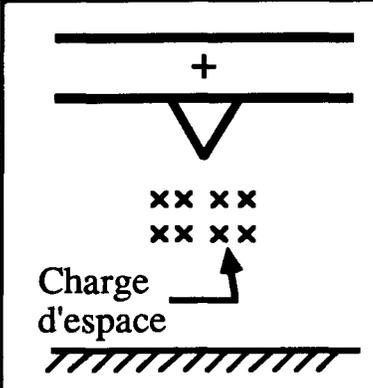
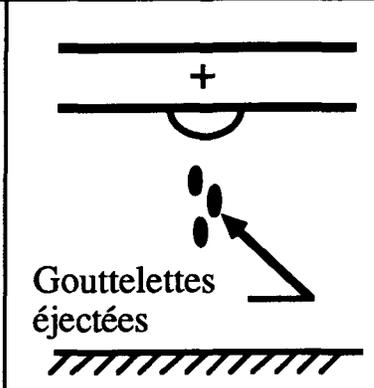
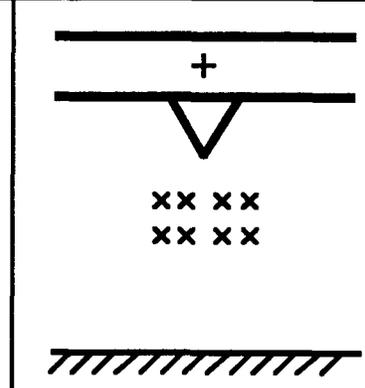
		
FORME CONIQUE	FORME HÉMISPHERIQUE	FORME CONIQUE
Charge d'espace considérable	Absence de la charge d'espace	
Force image partiellement annulée par la charge d'espace	Force image existe	Semblable à (a)
Conducteur se déplace vers le haut	Conducteur se déplace vers le bas	
(a)	(b)	(c)

Figure 1: Mécanisme proposé pour l'amorçage du mouvement [1].

CHAPITRE II

COMPORTEMENT DES GOUTTES D'EAU DANS UN CHAMP ÉLECTRIQUE

2.1 CONSTATATIONS D'ORDRE GÉNÉRAL

Plusieurs chercheurs se sont intéressés au phénomène de décharge couronne sur les gouttes d'eau suspendues sous un conducteur porté à la haute tension. En voici les grandes lignes:

Lorsque les gouttes d'eau tombent sur le conducteur, on observe deux types de décharge couronne. La plus fréquente provient d'une goutte d'eau suspendue à un conducteur, déformée en une pointe conique par le champ électrique. Le second type est la décharge entre la goutte et le conducteur avant que la goutte ne le touche [31].

De plus, l'effet de couronne pendant et après la pluie donne des impressions acoustiques de craquement "crackling" et de sifflement "hissing". La décharge émettant un son de sifflement provient d'une petite goutte d'eau stable tandis que la décharge émettant un craquement provient des gouttes d'eau longues et effilées se brisant rapidement [13].

Les formes des impulsions individuelles de décharge couronne provenant d'une goutte d'eau suspendue à un conducteur sont les mêmes que celles provenant des pointes de métal [13].

Selon English, Arai, Tsunuda et Dawson [32], il existe deux modes qui caractérisent le seuil de décharge couronne:

1. Le mode de disruption à la surface: le seuil de la décharge couronne pour une goutte d'eau à la pression atmosphérique est déterminé par l'instabilité électrostatique de la surface de la goutte.
2. Le mode de décharge couronne pure: à pression réduite le seuil de décharge couronne positif peut apparaître à la surface d'une goutte stable.

Les conditions frontières entre les deux mécanismes de seuil de décharge couronne dépendent principalement de la pression atmosphérique et de la grosseur de la goutte.

2.2 MODIFICATION DU CHAMP ÉLECTRIQUE DUE À LA PRÉSENCE DES GOUTTES D'EAU

Lorsque les conducteurs de ligne sont recouverts d'aspérités, le calcul du champ superficiel devient très complexe. Par exemple, sous condition de pluie, lorsque des gouttes d'eau sont suspendues au conducteur haute tension, l'intensité du champ superficiel est modifiée dû à l'influence de différents paramètres.

Ce sont la forme de la goutte et les propriétés diélectriques de l'eau qui influencent le plus l'intensité du champ électrique [2].

Une goutte d'eau plongée dans un champ électrique se déforme progressivement. Lorsque l'intensité du champ électrique augmente la goutte perd sa forme d'équilibre naturelle (calotte sphérique); elle s'étire de plus en plus [14]. La goutte devient instable et éjecte des gouttelettes microscopiques avant d'atteindre sa forme stable qui est celle d'un cône inversé. Il existe donc un volume optimum pour lequel la goutte reste stable, l'éjection de gouttelettes n'étant plus visible [26].

Pendant la phase de l'allongement on a une augmentation du champ à l'extrémité de la goutte et par conséquent un accroissement de l'activité de décharge couronne. On peut vérifier mathématiquement que la forme de la goutte, hémisphérique ou ellipsoïde pointue, donne une expression analytique du champ électrique complètement différente [2].

De plus, une particule de permittivité plus grande que celle de l'air près d'un conducteur haute tension comme des gouttes d'eau par exemple, cause une distorsion au champ électrique existant.

Un autre facteur qui rend encore plus difficile le calcul du champ résultant c'est la variation de la constante diélectrique de l'eau avec la température ambiante. En effet, la constante diélectrique de l'eau, ϵ , diminue lorsque la température augmente selon la formule suivante [2]:

$$\epsilon = 81,5 [1 - 4,696 (t - 17) 10^{-3} + 10,28 (t - 17)^2 10^{-6}] \quad (3)$$

où ϵ = constante diélectrique et t = température en °C

Le champ électrique, étant directement proportionnel à la constante diélectrique [6], diminue pour une tension donnée lorsque la température augmente. On doit également considérer la variation de la viscosité de l'eau avec la température. Elle varie de 1,787 à 0,4668 cp pour une température allant de 0° à 60° C. Plus la goutte est visqueuse moins elle se détache facilement. Ainsi la longueur critique de la goutte d'eau et le volume optimum devrait diminuer lorsque la température augmente puisque la goutte s'étire moins avant le délestage (éjection d'une gouttelette).

Il y a également la tension de surface qui diminue avec l'augmentation de la température. On atteint donc le régime de délestage accompagné de grandes impulsions électrostatiques à une tension moindre lorsque la température est élevée.

Le champ électrique est affecté non seulement par les paramètres mentionnés ci-haut mais aussi par la conductivité de l'eau. En effet, le mécanisme de décharge couronne et la charge spécifique sur les gouttes peuvent être remarquablement changés par la conductivité de la pluie [9]. La conductivité de l'eau augmente avec la température donc favorise la décharge couronne.

2.3 LES FORCES AGISSANT SUR UNE GOUTTE D'EAU ET L'INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE

Le comportement des gouttes d'eau dans un champ électrique est différent de celui d'une particule solide, car la géométrie de la goutte peut changer facilement sous l'influence des forces suivantes [1]:

- forces d'adhésion
- forces de gravité
- tension de surface
- forces électrostatiques.

2.3.1 Forces d'adhésion

Les forces d'adhésion dépendent de la mouillabilité de la surface du conducteur. Elles atteignent le maximum pour une surface mouillable et tombent à zéro pour une surface hydrophobe [1]. L'activité de décharge couronne sur un conducteur sous condition de pluie dépend grandement de l'adhésion de l'eau à sa surface.

L'angle de contact entre l'air, l'eau et les surfaces solides dépend non seulement de la tension de surface du liquide, mais aussi de l'adhésion du liquide au solide [2].

Si l'angle de contact (α) de l'eau avec la surface est grand, les gouttes de masse suffisante peuvent simplement tomber, et ainsi diminuer l'effet de couronne (figure 2) [31].

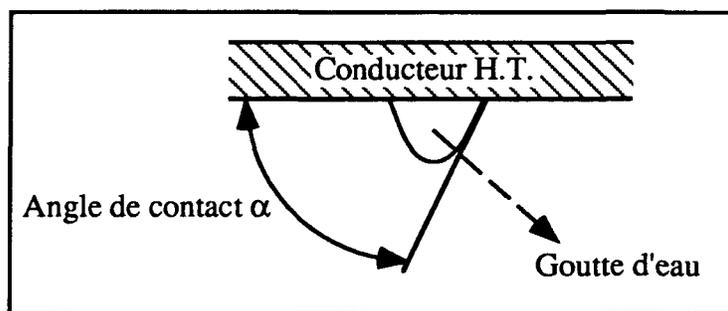


Figure 2: Angle de contact grand

Si l'angle de contact est vraiment petit, l'eau s'étendra en une mince couche selon les surfaces, réduisant drastiquement la densité linéaire des protubérances de l'eau (figure 3) [31].

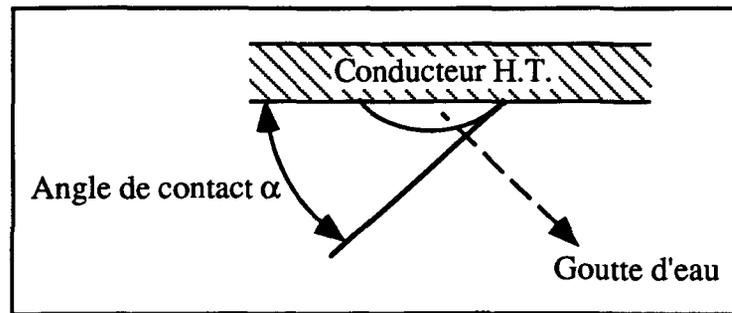


Figure 3: Angle de contact petit

Donc les situations favorables à la réduction de la décharge couronne sont celles où l'angle de contact de l'eau avec le conducteur est vraiment petit ou vraiment grand.

Un liquide et un solide peuvent avoir un angle de contact entre 0° et 180° , la valeur dépend de l'attraction relative entre les molécules solides et liquides. L'agitation cinétique des molécules s'accroît avec l'augmentation de la température, donc l'angle de contact devrait varier en fonction de la température de l'eau.

2.3.2 Forces de gravité

Les forces de gravité agissent toujours vers le centre de la terre. La température de la goutte d'eau n'influence pas directement les forces de gravité, mais a pour conséquence de diminuer le volume optimal de la goutte stable et ainsi entraîne une diminution de la masse donc de la force gravitationnelle.

2.3.3 Tension de surface

La force caractéristique d'une surface liquide, est appelée tension de surface.

La valeur de la tension superficielle de l'eau à la pression atmosphérique décroît faiblement quand la température augmente passant de 75,6 à 58,5 dyne/cm pour des températures variant de 0° à 100° C. Notons qu'elle est largement affectée par une mince couche de contamination sur la surface [1].

Wilson et Taylor ont démontré théoriquement que l'intensité du champ critique pour une goutte d'eau est directement proportionnelle à la racine du rapport de la tension de surface (S) au rayon (a) de la goutte d'eau [2].

$$E_c = k \sqrt{\frac{S}{a}} \quad (4)$$

S: tension de surface en dyne/cm

a: rayon de la goutte en cm

E_c : champ critique en kV/cm

k: $k = 0,447$ (constante)

Selon Phan et Allaire [19], une goutte d'eau dans un champ plus grand que le champ critique devient instable. Elle s'allonge de façon à former un cylindre dont la hauteur équivaut à peu près au diamètre du conducteur; une goutte sphérique se forme à l'extrémité de la goutte et un filament beaucoup plus long se développe à l'extrémité opposée; le décrochage donne lieu à la formation d'une gouttelette sphérique et d'une goutte cylindrique; cette dernière a ensuite une tendance plus ou moins marquée à se déformer [1].

Ainsi pour une température de l'eau plus élevée, la décharge couronne commencera à une plus basse tension (champ critique moins élevé), par contre la goutte d'eau se détachera plus facilement du conducteur (longueur critique plus petite) et la décharge couronne sera moins intense.

2.3.4 Forces électrostatiques

La pression électrostatique à la surface d'équilibre (air-diélectrique quelconque) s'exprime par [2]:

$$\frac{1}{6} (\epsilon - 1)^2 (2 E_n^2 - E_t^2) \quad (5)$$

ϵ : constante diélectrique de l'eau.

E_n : composante normale du champ électrique à la surface de séparation.

E_t : composante tangentielle du champ électrique à la surface de séparation.

Dans le cas particulier de l'eau, on peut admettre en première approximation que le champ électrique est normal à la surface de séparation ($E_t = 0$). On peut donc en conclure que la pression électrostatique à la surface de séparation eau-air est proportionnelle au carré de l'intensité du champ électrique considéré comme normal à la surface [14].

$$\frac{1}{3}(\epsilon - 1)^2 E_n^2 \quad (6)$$

Le problème est de déterminer l'intensité du champ électrique en chaque point de la surface d'équilibre. Si le problème est relativement aisé dans le cas de figures d'équilibre simples (ellipsoïdes par exemple), on ne peut en dire autant si on considère la figure d'équilibre de la goutte pendante soumise à son propre poids. Le calcul de la répartition du champ électrique se fait dans le cas électrostatique ($\nabla V = 0$), alors que les effluves qui prennent naissance au voisinage de la pointe sont à l'origine de charges d'espace qui modifient profondément la répartition du champ [14].

Ainsi la présence de la charge d'espace affecte le champ appliqué et modifie la force de réaction agissant sur la goutte.

La pression augmentera:

- 1) si l'intensité du champ électrique augmente
- 2) si la goutte s'allonge.

Puisque la constante diélectrique de l'eau (ϵ) diminue lorsque la température augmente ($\epsilon = 88$ à $T = 0^\circ \text{C}$ et $\epsilon = 66,6$ à $T = 60^\circ \text{C}$), alors pour une goutte d'un volume donné, on devrait augmenter davantage le champ normal E_n lorsque la température ambiante augmente pour obtenir le régime de délestage de la goutte d'eau à la même pression.

Le vent électrique est un autre facteur qui a une influence sur la déformation de la goutte. Le vent électrique est le mouvement des molécules neutres auxquelles l'énergie cinétique est donnée par les ions sous un champ électrique. Le mouvement des ions dans un champ électrique engendre un déplacement d'air appelé vent électrique.

Dans leur étude sur l'influence de la température et de la polarité de la tension sur la vitesse du vent ionique, M. M. Farzaneh et M. Y. Teisseyre concluent que pour une tension donnée, la vitesse du vent ionique demeure pratiquement constante sans égard à la température ambiante [34].

En résumé, on a démontré dans ce chapitre que:

- Lorsque la température ambiante augmente, le champ critique diminue.
- Pour une même tension appliquée, une augmentation de la température entraîne une diminution de la constante diélectrique de l'eau et conséquemment l'intensité du champ électrique est plus faible à l'extrémité de la goutte.
- La variation de la viscosité avec la température favorise un détachement plus facile de la gouttelette et une longueur critique moindre pour une température élevée amenant ainsi une diminution de l'intensité de décharge couronne.
- La tension de surface diminue lorsque la température augmente ce qui permet d'atteindre le régime de délestage plus rapidement et ainsi d'atténuer l'intensité de décharge couronne.

L'étude des propriétés physiques de l'eau et des forces mises en jeu dans le mécanisme de décharge couronne nous amène à conclure que l'effet de couronne apparaît à un champ appliqué plus faible et que l'intensité de décharge couronne diminue avec l'augmentation de la température ambiante.

CHAPITRE III

MODÉLISATION PHYSIQUE D'UNE GOUTTE D'EAU SOUMISE À UNE VIBRATION MÉCANIQUE

3.1 DÉFORMATION DE LA GOUTTE D'EAU DANS LE TEMPS

L'intérêt porté à la vibration des conducteurs haute tension sous condition de pluie, nous a conduit à l'étude particulière de la goutte d'eau. Pour bien expliquer et visualiser ce phénomène, on rapporte ici l'étude du mouvement du conducteur et de la déformation de la goutte dans le temps faite par M. M. Farzaneh et M. Y. Teisseyre [8].

Sur la figure 4 on a représenté la courbe de la position du conducteur et celle de son accélération en fonction du temps. On peut voir que lorsque le conducteur est à sa position la plus haute (position 1) son accélération est maximum et égale à $-A\omega^2$ où A est l'amplitude et ω la vitesse angulaire. Dû à la force réactive causée par son accélération, la goutte d'eau est aplatie à la surface du conducteur porté à la haute tension et donc l'ionisation de l'air est relativement faible à cette position.

Lorsque le conducteur se déplace vers le bas, l'amplitude de l'accélération décroît et devient égale à zéro lors de son passage à la position d'équilibre. De cette position, l'accélération est dirigée vers le haut et la goutte d'eau commence à s'allonger.

Lorsque le champ critique est atteint (égale au champ disruptif de l'air), l'ionisation commence et le courant de décharge augmente pendant que le conducteur se déplace vers une position limite inférieure.

À cette position inférieure du conducteur, une force réactive maximum due à l'accélération est appliquée à la goutte d'eau. La goutte d'eau est très allongée. De cette position, le conducteur change de direction, et l'élongation de la goutte se continue.

À la position 6, la goutte d'eau atteint une "longueur critique", elle devient instable. Des gouttelettes sont éjectées, et le courant de décharge décroît rapidement. Le conducteur continue son ascension vers sa position limite supérieure (position 10) et le processus se répète.

On a noté, lors de l'observation de plusieurs gouttes, que la longueur critique atteinte par les gouttes (l_c) est constante lorsque l'on respecte les mêmes conditions.

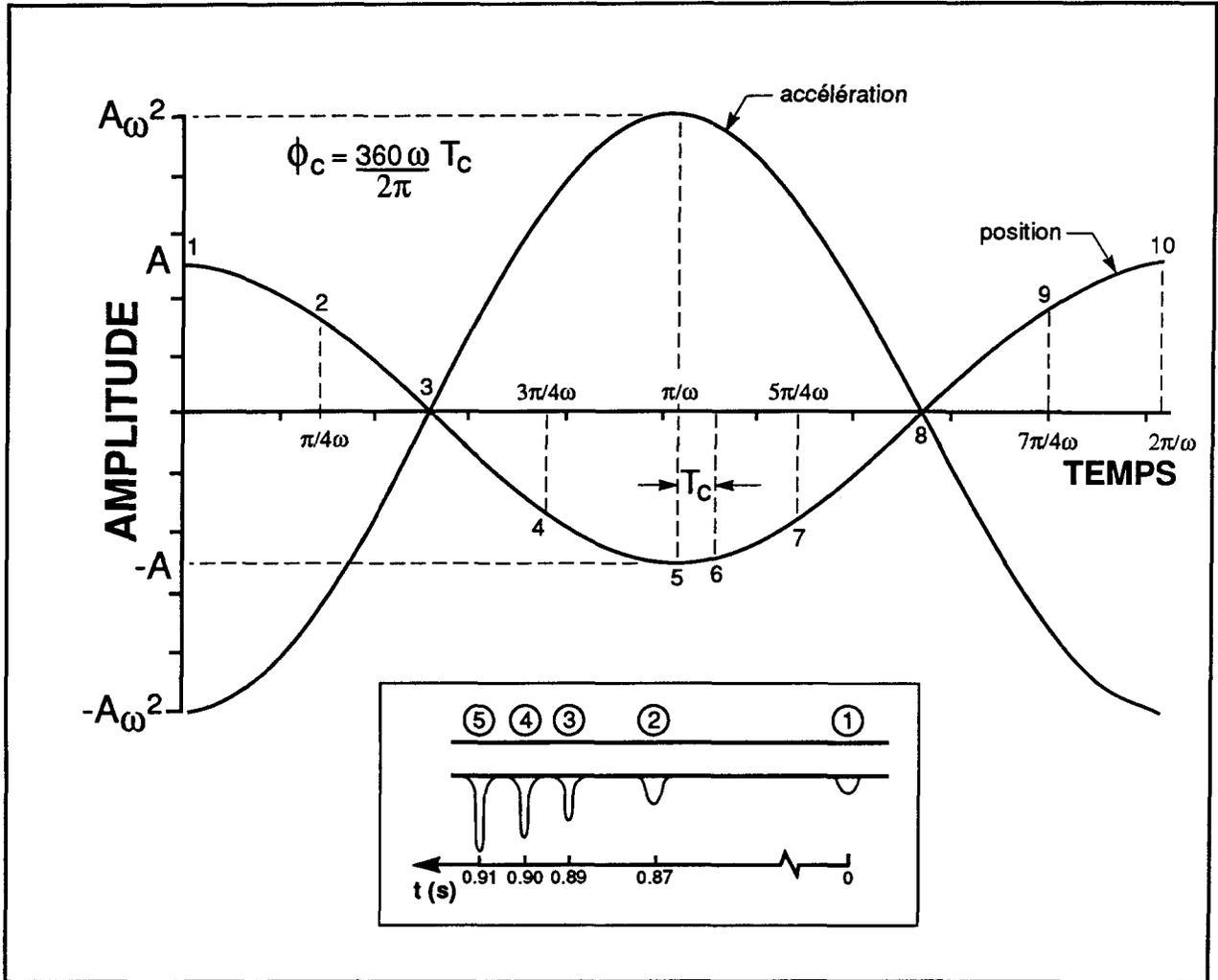


Figure 4: Position et accélération du conducteur en fonction du temps (cf. [8])

On a constaté précédemment que la forme des vibrations du conducteur est sinusoïdale. Que pour un champ électrique donné, l'amplitude de vibrations est constante et que la fréquence de vibrations est égale à la fréquence naturelle de la portée expérimentale [1]. On peut donc écrire que:

$$Y(t) = Y_0 \cos \omega_n(t) \quad (7)$$

$$\omega_n = 2\pi f_n$$

où Y_0 et f_n sont respectivement l'amplitude maximum et la fréquence naturelle des vibrations.

À noter que pour un conducteur de longueur L , la fréquence naturelle f_n est proportionnelle à la racine carrée de la force appliquée à chaque extrémité.

La goutte d'eau suspendue au conducteur est donc soumise à une force d'accélération, $\ddot{Y}(t) = -\omega_n^2 Y_0 \cos \omega_n(t)$. Selon la direction de cette force, la forme de la goutte d'eau sera modifiée. Elle atteint une taille critique et une forme conique pour une accélération maximum dirigée vers le haut, et une forme hémisphérique aplatie lorsque la force d'accélération sera maximum et dirigée vers le bas.

Ces descriptions du comportement de la goutte d'eau s'apparente bien à celle d'un système masse-ressort soumis à une force sinusoïdale.

3.2 MODÈLE PHYSIQUE: SYSTÈME MASSE-RESSORT

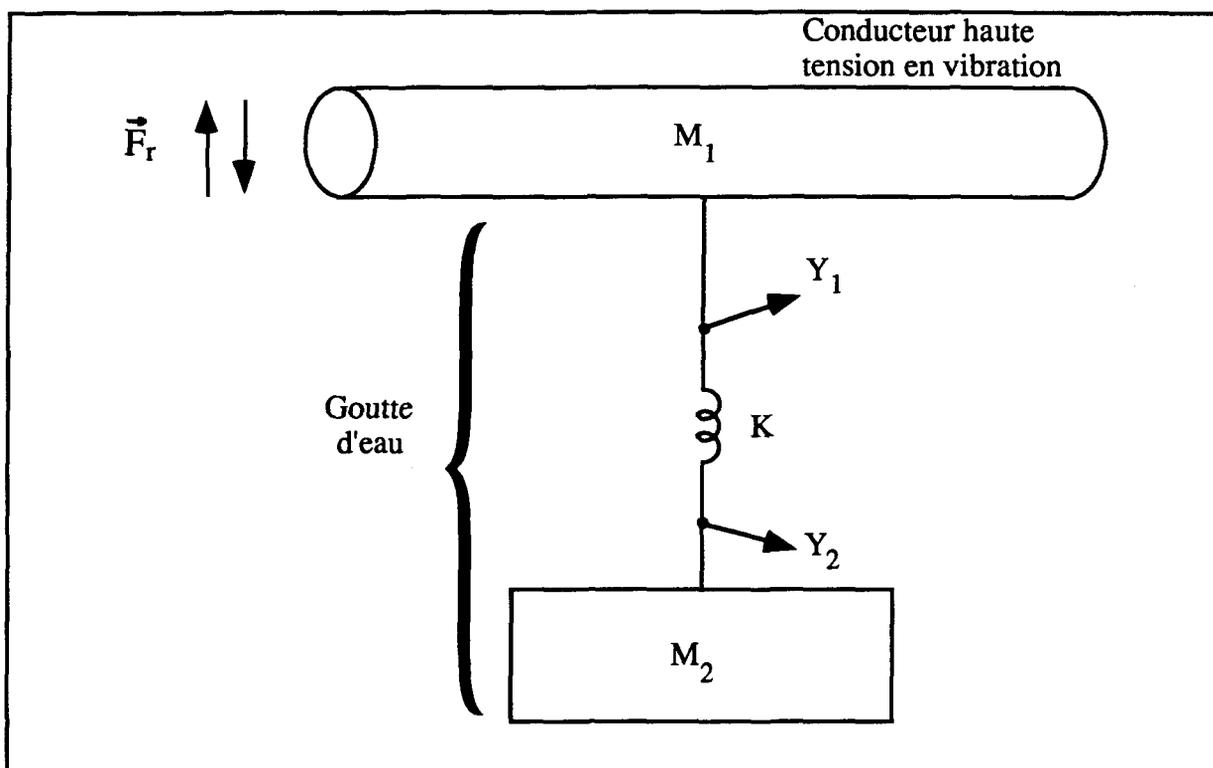


Figure 5: Modèle physique d'une goutte d'eau

Examinons le problème sous un autre aspect. Désignons par \vec{F}_r la force résultante de l'interaction de toutes les forces agissant sur une goutte

d'eau et le conducteur. Supposons que cette force soit appliquée seulement au conducteur.

Dans ces conditions, sous l'action de cette force (\vec{F}_r), le conducteur de masse M_1 se déplace d'une distance Y_1 par rapport à l'origine (position initiale). La goutte d'eau de masse M_2 , étant attachée au conducteur, subit également un déplacement Y_2 qui est différent de Y_1 dû à l'élasticité de la goutte (figure 6).

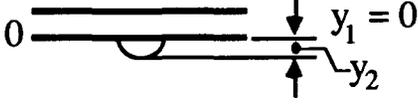
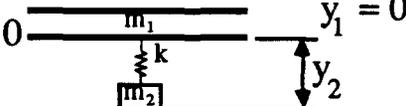
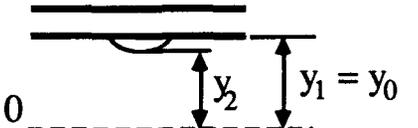
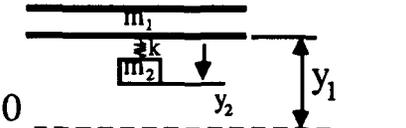
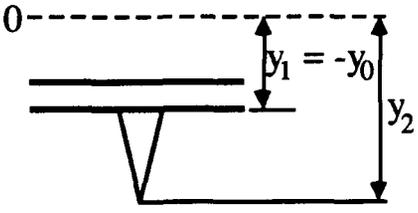
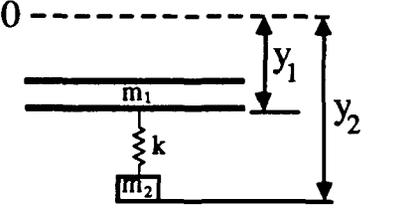
Position du conducteur	Position goutte et conducteur	Modèle physique correspondant
Centre (origine)		
Supérieur (en haut)		
Inférieur (en bas)		

Figure 6: Position de la goutte et modèle physique correspondant

Le déplacement du conducteur en fonction du temps a une forme sinusoïdale soit $Y_1(t) = Y_0 \cos \omega_n(t)$. Y_0 étant l'amplitude de vibrations et ω_n la vitesse angulaire (figure 7).

En première approximation on peut considérer que le déplacement de la goutte en fonction du temps, $Y_2(t)$, a également une forme sinusoïdale mais décentré par rapport à l'origine et déphasé légèrement par rapport à Y_1 (figure 7). On a choisi arbitrairement comme origine la position du conducteur lorsqu'il est au centre de sa course ($Y_1 = 0$).

$$Y_2(t) = -Y_3 + Y_4 \cos (\omega_n(t) - \varnothing_c). \quad (8)$$

où Y_3 : distance entre la position de la goutte à mi-chemin de sa course et l'origine ($Y_3 < Y_4$)

Y_4 : amplitude de vibrations de la goutte.

ω_n : vitesse angulaire.

\varnothing_c : déphasage entre le déplacement de la goutte et celui du conducteur.

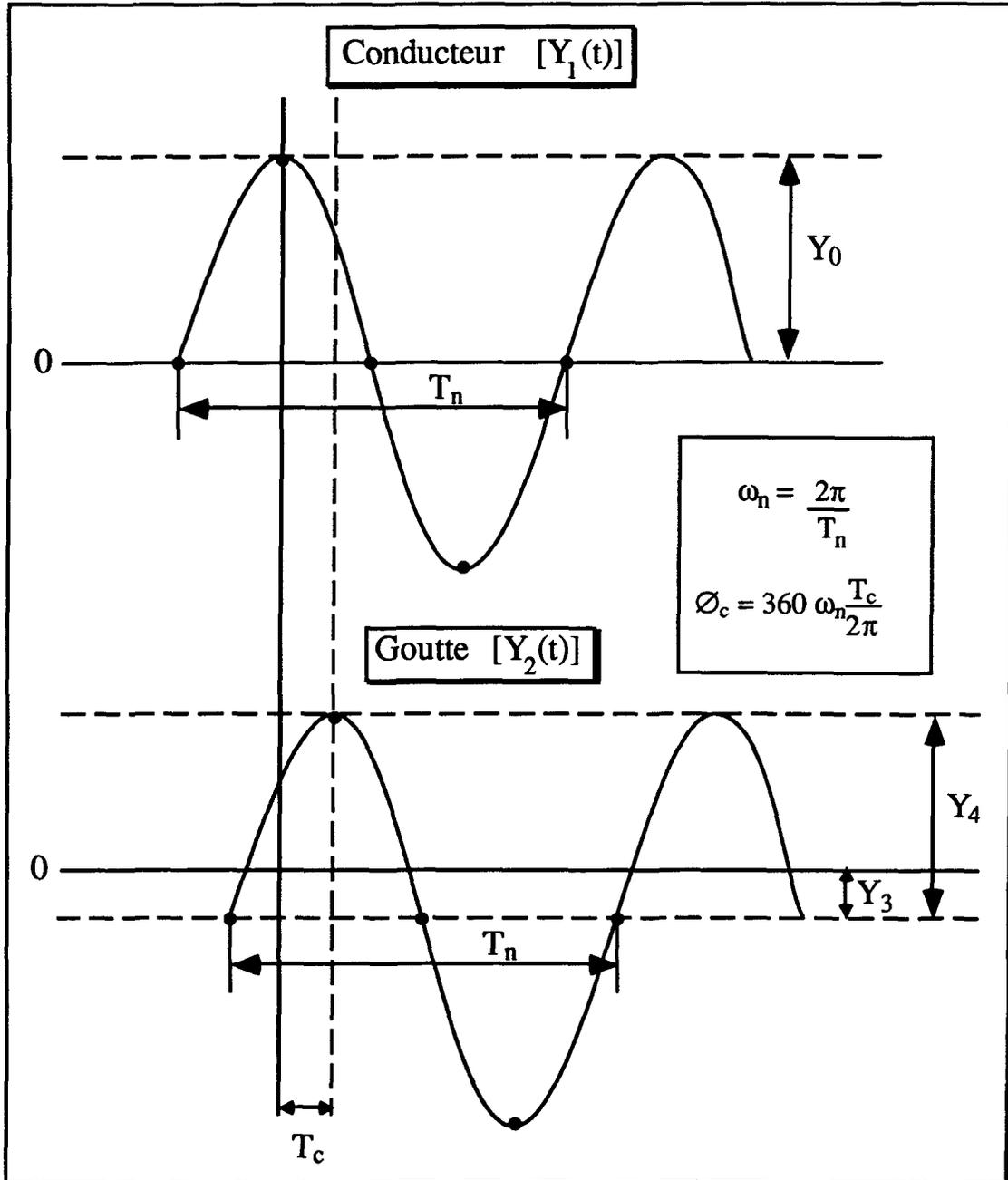


Figure 7: Position du conducteur et de la goutte

L'angle de déphasage \varnothing_c correspond à l'intervalle de temps avant que la goutte atteigne sa longueur critique après que le conducteur ait atteint sa position inférieure. À noter qu'en deuxième approximation, pour conserver la linéarité du modèle physique, on néglige ce déphasage.

D'où le système d'équations suivant en considérant la goutte comme un système masse-ressort:

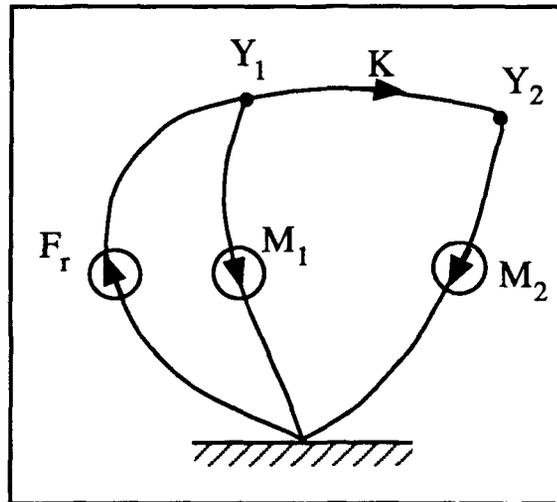


Figure 8: Graphe linéaire

$$F_r = M_1 \ddot{Y}_1 - K(Y_2 - Y_1) + M_1 g \quad (9)$$

$$0 = M_2 \ddot{Y}_2 - K(Y_1 - Y_2) + M_2 g \quad (10)$$

où F_r : force résultante de tout le système de vibrations.

M_1 : masse du conducteur H.T.

M_2 : masse d'une goutte d'eau.

K : constante du ressort (goutte d'eau).

g : accélération gravitationnelle.

Y_1 : déplacement du conducteur.

Y_2 : déplacement d'une goutte d'eau.

\ddot{Y}_1 : accélération du conducteur.

\ddot{Y}_2 : accélération d'une goutte d'eau.

On obtient ainsi un système de deux équations et trois inconnues soit: F_r , K et Y_2 . Pour pallier à ce problème on a besoin de connaître les conditions frontières telles que la longueur initiale et l'élongation maximum d'une goutte d'eau ainsi que son déplacement (Y_2) en fonction du temps. Expérimentalement, il est possible d'évaluer les différents déplacements en fonction du temps soit Y_1 et Y_2 à l'aide d'une caméra haute vitesse. La masse du conducteur M_1 et celle de la goutte M_2 sont connues. Pour un déplacement et une fréquence donnés, sans tension appliquée, on peut trouver à l'aide des équations ci-haut la valeur de la constante du ressort K .

On peut également déterminer la force résultante F_r , pour une tension donnée, toujours à l'aide du système d'équations ci-haut. Ainsi on aura pour chaque valeur de tension appliquée, la valeur de la force résultante et celle de la constante du ressort. Ces paramètres seront déterminés à partir des expériences réalisées dans le cadre de cette étude (chapitre 4).

CHAPITRE IV

ÉTUDES EXPÉRIMENTALES ET DISCUSSION

4.1 PROBLÉMATIQUE

On doit reproduire à petite échelle le phénomène de vibrations induites par effet de couronne sur les conducteurs portés à la haute tension et sous condition de pluie. Afin d'évaluer l'influence de la température ambiante sur les différents paramètres régissant ce phénomène, on doit réaliser un système mécanique permettant de faire osciller un conducteur aux dimensions réduites à des amplitudes de vibrations variant entre 1 et 5 cm et pour différentes fréquences entre 0 et 20 Hz.

4.2 MONTAGE EXPÉRIMENTAL

Le montage expérimental (figures 9 et 10) est constitué d'un conducteur en aluminium ⑤ de 1,6 cm de diamètre placé au centre d'une cage cylindrique ① dont les dimensions sont de 12 cm de long et de 11 cm

de diamètre. La cage métallique utilisée pour cette expérience est toute en aluminium et comprend une fenêtre ⑪ afin de pouvoir visualiser et photographier les gouttes d'eau ⑩.

La cage est composée de trois parties: la partie centrale est reliée à la masse en passant par une résistance. C'est par l'intermédiaire de cette résistance que l'on mesure l'intensité de décharge couronne en utilisant un enregistreur magnétique. Les données recueillies par l'enregistreur sont par la suite transférées sur un oscilloscope numérique afin de compiler les différents résultats. Les deux autres parties de la cage sont des anneaux de garde ⑥ directement reliés à la masse et permettant d'éliminer les effets de bords. L'ensemble est placé dans une enceinte fermée hermétiquement afin de garder constante la température ambiante, environnant le conducteur (figure 9).

On a utilisé des supports ⑦ en téflon afin de maintenir le conducteur au centre de la cage métallique et d'isoler les anneaux de garde de la partie centrale. Les supports en téflon sont percés au centre pour le maintien du conducteur et des trous ont également été percés partout où il était possible de le faire pour diminuer au minimum le poids des supports. Ils sont de forme cylindrique avec un accotement supérieur de façon à éviter tout contact entre les anneaux de garde et la partie centrale de la cage métallique.

Le système de chauffage et de refroidissement de l'enceinte sont très importants. Un compresseur permet d'abaisser la température jusqu'au point de congélation soit 0° C et un élément chauffant permet d'augmenter la

température jusqu'à 60° C. On obtient ainsi une gamme de température située entre 0° et 60° C. La température est mesurée avec une précision de 0,5 degré par un senseur thermique.

Le conducteur cylindrique est relié à une source haute tension à courant continu, Glassman High Voltage, Inc. La tension appliquée sur le conducteur est mesurée par une sonde haute tension Fluke modèle 80K-40. La lecture affichée sur un multimètre (série Fluke 70) a une précision de 2%.

Le conducteur est soumis à une vibration verticale sinusoïdale à l'aide d'un système mécanique dont la fréquence et l'amplitude de vibrations sont variables. Voici le mécanisme que nous avons conçu et réalisé pour cette étude:

L'ensemble cage-conducteur est reliée par l'intermédiaire d'un support métallique ② à une poulie. Sur la poulie ③ il y a cinq trous d'ajustement où l'on peut attacher le support. Ces trous sont situés à 0,5 - 1 - 1,5 - 2 - 2,5 cm du centre de la poulie et permettent ainsi de régler le déplacement du conducteur de 1, 2, 3, 4 et 5 cm (figure 10).

La poulie d'oscillations ajustable est actionnée à l'aide d'un moteur pas à pas de 3V, 4A et 200 pas par révolution (1,8° par pas). Un oscillateur externe permet de varier la vitesse de rotation du moteur et ainsi fixe la fréquence de vibrations à la valeur désirée. Le moteur pas à pas est commandé à l'aide d'une carte commerciale (drive), qui requiert une alimentation de 24 V et 6 A.

Vue d'ensemble du montage

- ① Cage cylindrique
- ② Support métallique
- ③ Poulie d'oscillations
(25 mm de dist. entre chaque trou d'ajustement)
- ④ Plaque métallique de soutien

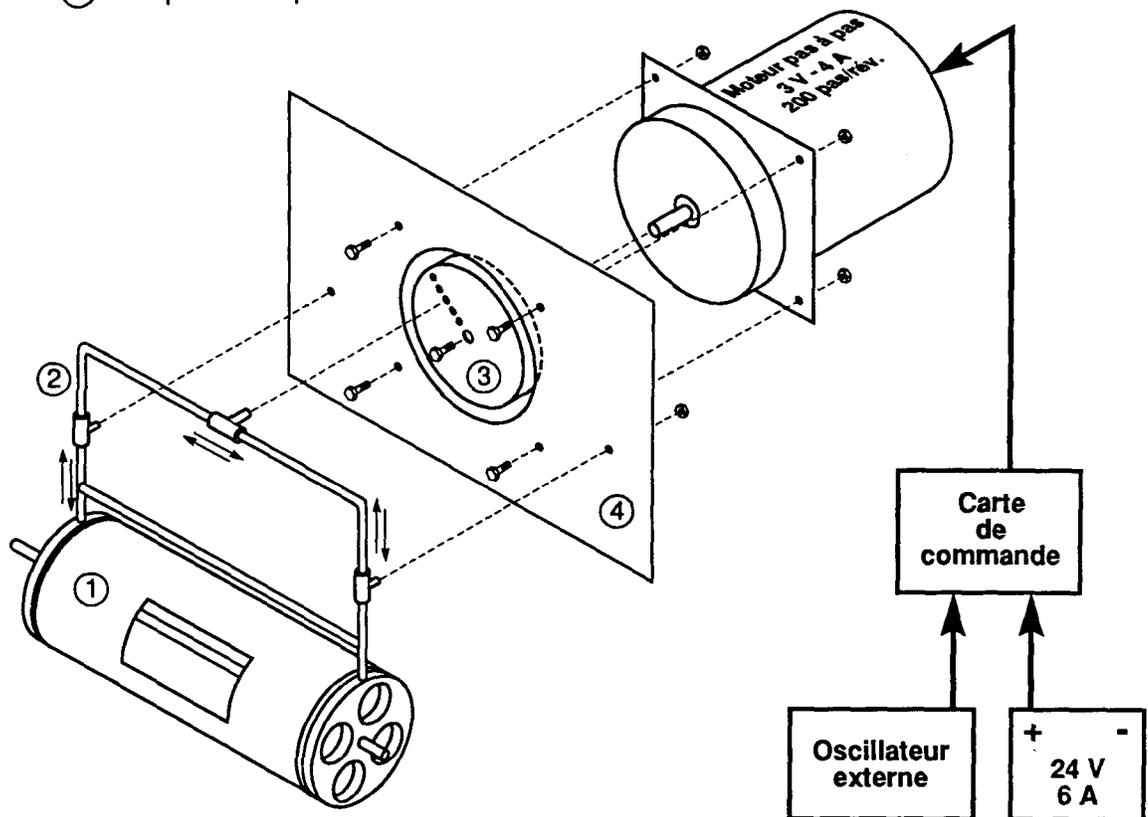
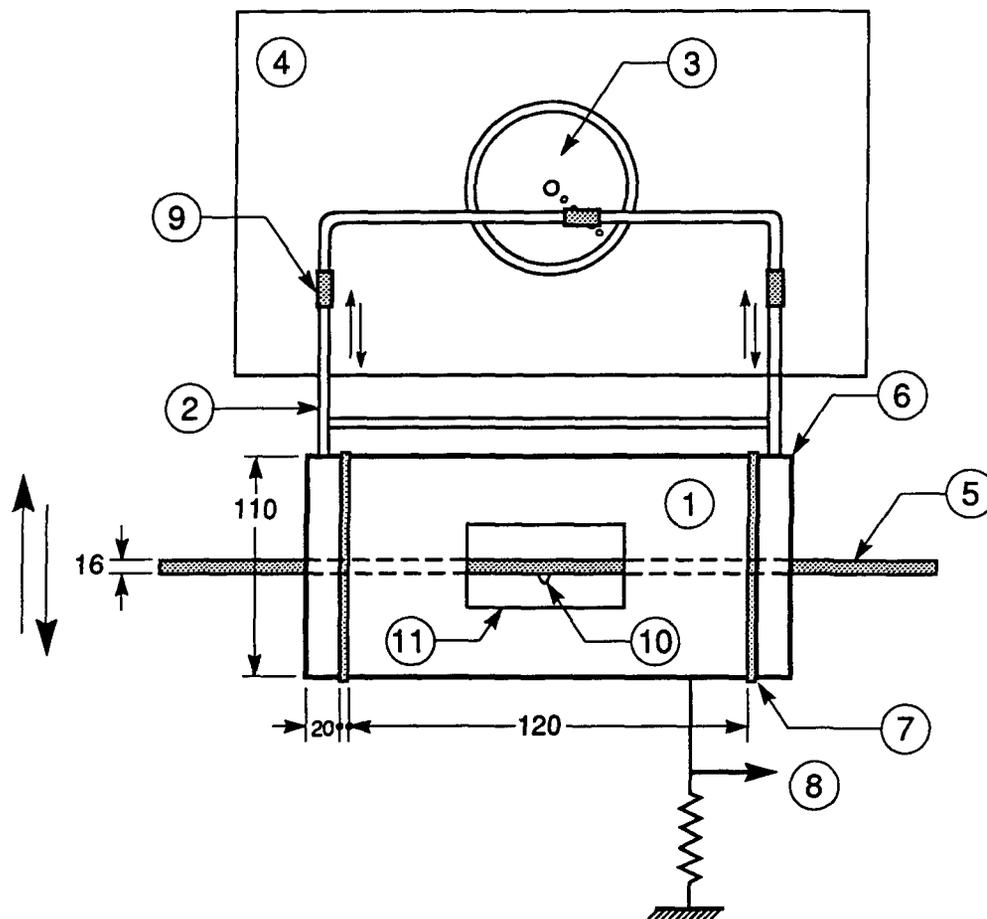


Figure 9: Différents composants du montage expérimental

Montage vue de face



- | | |
|---|--|
| ① Cage cylindrique | ⑦ Supports de téflon avec accotement supérieur |
| ② Support métallique | ⑧ Vers enregistreur magnétique |
| ③ Poulie d'oscillations ajustable (5 positions) | ⑨ Guides fixes |
| ④ Plaque métallique de soutien | ⑩ Goutte d'eau |
| ⑤ Conducteur H.T. 16 mm | ⑪ Fenêtre |
| ⑥ Anneaux de garde | |

Figure 10: Montage expérimental

Une goutte d'eau est déposée sur un conducteur à l'aide d'une pipette dont le volume est spécifié. Une caméra vidéo VHS permet de visualiser le déplacement de la goutte ainsi que sa déformation dans le temps.

4.3 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

En préambule à cette partie, il convient de mentionner qu'une étude détaillée des vibrations induites par effet de couronne sur les conducteurs portés à la haute tension sous condition de pluie a déjà été réalisée pour une température constante soit la température ambiante [1]. Dans le but de bien diriger notre travail et de déterminer les différents facteurs autres que la température influençant l'amplitude de vibrations induites par effet de couronne, nous rappelons les grandes lignes de cette étude [1]:

Les vibrations induites par effet de couronne des conducteurs haute tension, sous condition de pluie, sont essentiellement produites par la présence intermittente de la charge d'espace sous les gouttes d'eau suspendues au conducteur [1].

Le vent ionique, une des conséquences de la décharge couronne, peut également influencer le mécanisme de vibrations induites par effet de couronne. Par contre, M. M. Farzaneh et M. Y. Teisseyre dans leur étude sur l'influence de la température sur la vitesse du vent ionique sont venus à la conclusion que pour une tension appliquée constante, la vitesse du vent

ionique demeure pratiquement la même sans égard à la température ambiante [34]. Donc on n'aura pas à considérer ce facteur au cours de cette étude.

L'amplitude de vibrations augmente de façon linéaire en fonction de l'intensité de la pluie pour des intensités inférieures à 24 mm/h et demeure constante par la suite [1]. Cette étude a été réalisée pour un volume de goutte d'eau constant.

La fréquence de vibrations est égale à la fréquence naturelle du système, et due à l'accélération du conducteur, les gouttes suspendues sont soumises à une force de réaction sinusoïdale, amenant leur déformation périodique [1].

Le courant de décharge est généralement constitué d'une composante directe I_d , et d'une composante pulsative I_p , laquelle a un taux de répétition égal à la fréquence de vibrations du conducteur. L'amplitude de vibrations était proportionnelle au rapport I_p / I_d [1].

Les constatations suivantes montrent l'importance fondamentale du moment où les gouttes d'eau sont allongées, suivi par l'augmentation de l'intensité de la décharge couronne causant la composante I_p . Conséquemment, la forme et l'élongation maximale des gouttes d'eau jouent un rôle important dans le mécanisme de vibrations induites par effet de couronne. Il est donc justifié d'étudier la longueur critique d'une goutte d'eau et le champ électrique requis pour atteindre le régime de délestage en fonction de la température ambiante. (Dans cette étude, on identifie par E_d le champ électrique caractérisant le régime de délestage.)

La forme et l'élongation de la goutte d'eau suspendue au conducteur, dépendent non seulement de la température ambiante, de l'intensité du champ électrique et de sa polarité, mais aussi de la fréquence et de l'amplitude de vibrations du conducteur.

4.3.1 Influence de la fréquence et de l'amplitude de vibrations

Pour différents volumes de gouttes d'eau et pour différentes amplitudes de vibrations, sans tension appliquée, on a trouvé expérimentalement la fréquence critique correspondant au régime de délestage. Ce régime est caractérisé, lorsque le conducteur est porté à la haute tension, par de grandes impulsions de courant (I_p) auxquelles l'amplitude de vibrations est directement proportionnelle.

Sur la figure 11, on a présenté la variation de la fréquence critique (f) en fonction du volume de la goutte d'eau et ce pour différents déplacements du conducteur (amplitude crête-à-crête de vibrations). On constate que la fréquence critique est inversement proportionnelle au volume des gouttes d'eau et au déplacement du conducteur.

On peut vérifier que la force nécessaire pour détacher une gouttelette d'une goutte dont le volume est constant et qui est suspendue à un conducteur, est directement proportionnelle à l'amplitude de vibrations et au carré de sa fréquence. La figure 12 montre qu'effectivement le carré de la

FRÉQUENCE CRITIQUE EN FONCTION DU VOLUME DES GOUTTES

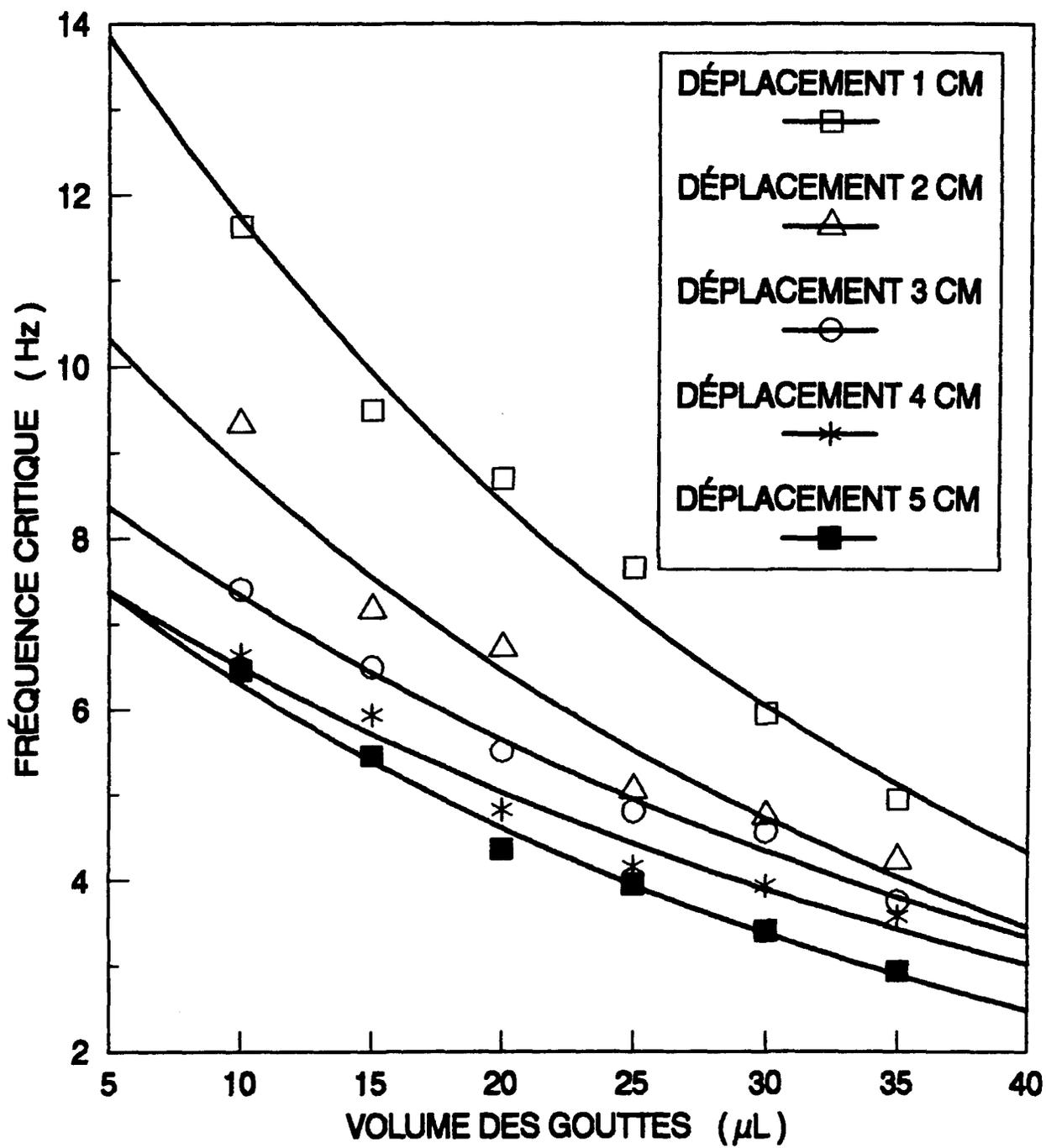


FIGURE 11

INVERSE DE LA FRÉQUENCE
CRITIQUE AU CARRÉ EN
FONCTION DU DÉPLACEMENT

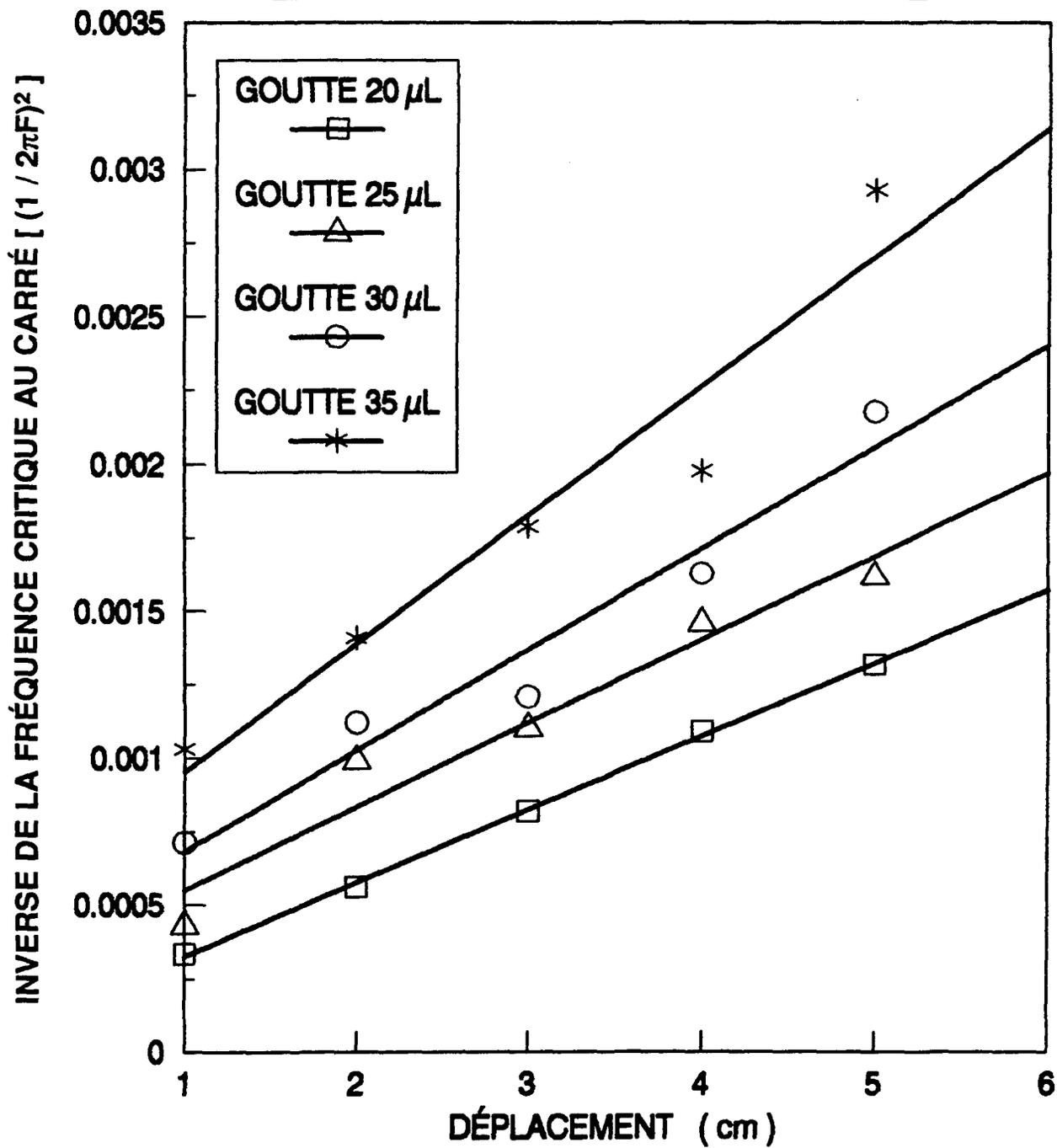


FIGURE 12

fréquence inversée varie linéairement en fonction du déplacement du conducteur lorsque le volume d'eau est maintenu constant.

4.3.2 Influence de la polarité du champ électrique

On a continué notre étude en vérifiant de quelle manière le champ électrique requis pour atteindre le régime de délestage, E_d , variait en fonction du volume de la goutte et pour des polarités différentes. Rappelons que lors du régime de délestage, la décharge couronne est beaucoup plus importante due à l'augmentation du champ électrique à la pointe des gouttes d'eau. Et puisque la composante pulsative (I_p) du courant caractérise l'amplitude de vibrations on a centré notre étude autour de ce paramètre.

La figure 13 présente la variation du champ électrique, E_d , en fonction du volume des gouttes d'eau lorsque l'on applique une tension continue positive (c.c.+) et une tension continue négative (c.c.-). On constate que pour un volume donné, le champ électrique requis pour atteindre le régime de délestage est plus élevé pour une tension positive que pour une tension négative. Pour les deux polarités, le champ électrique, E_d , est inversement proportionnel au volume de la goutte d'eau et il tend vers zéro pour un volume relativement élevé. Sur la figure 14, on vérifie que pour un déplacement (amplitude crête-à-crête) constant, le champ électrique caractérisant le régime de délestage, E_d , diminue lorsque la fréquence augmente. Ces résultats concordent avec ceux obtenus auparavant lors de l'étude de l'influence de la fréquence (voir figure 11, page 52).

**CHAMP ÉLECTRIQUE (E_d)
EN FONCTION
DU VOLUME D'EAU**

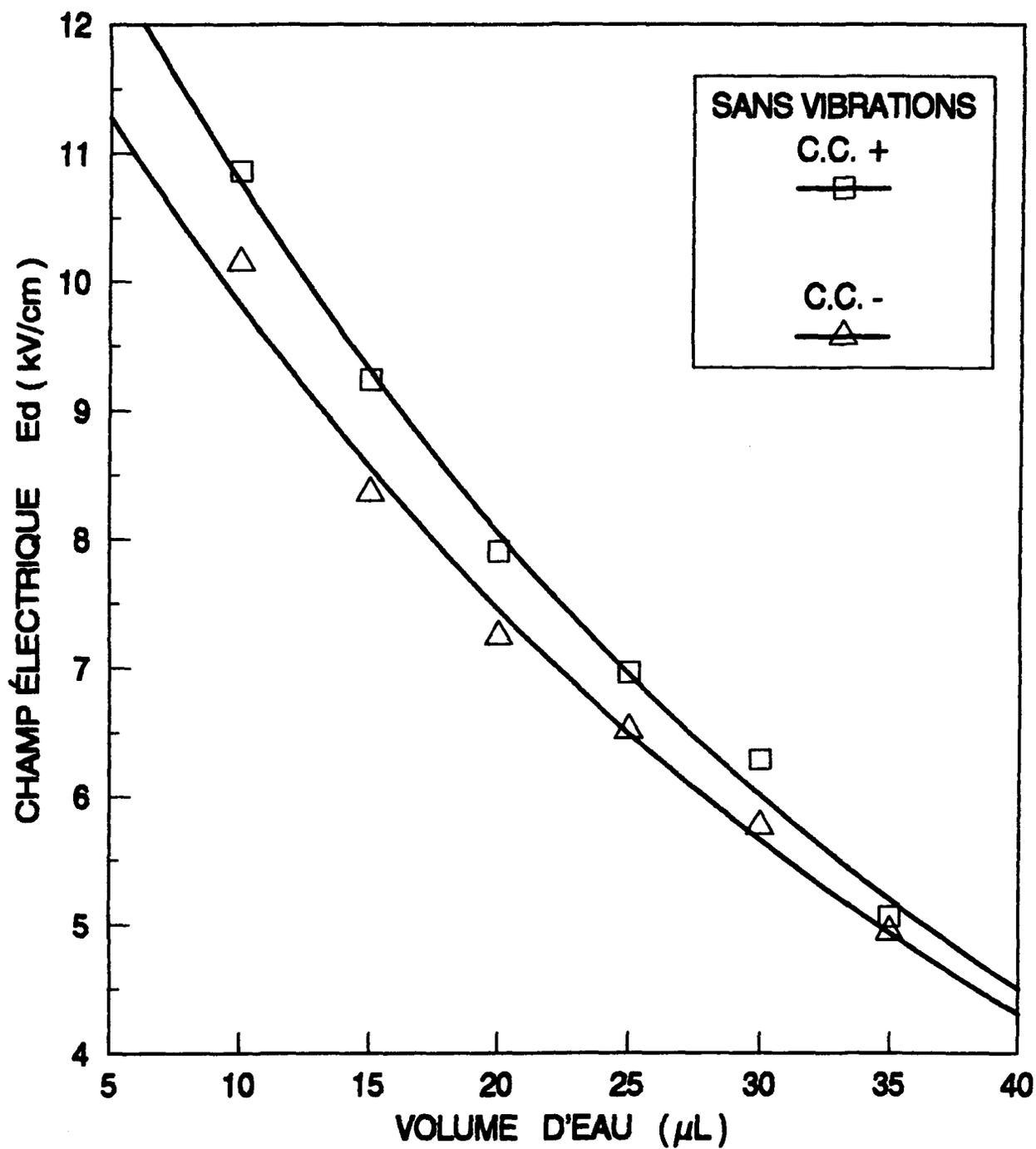


FIGURE 13

**CHAMP ÉLECTRIQUE (E_d)
EN FONCTION
DU VOLUME D'EAU**

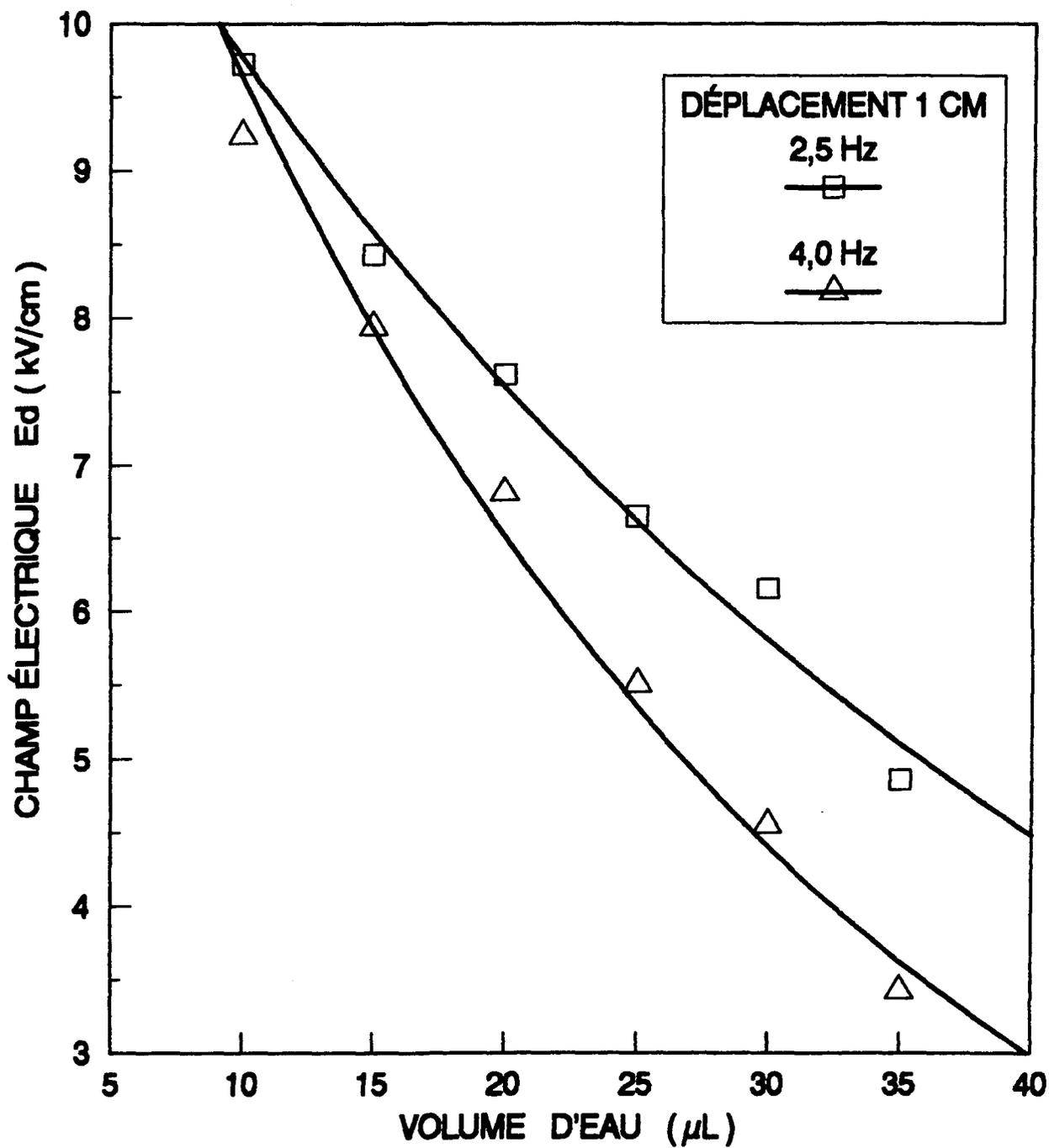


FIGURE 14

Parallèlement, la figure 15 montre les variations du champ électrique, E_d , lorsque la fréquence est constante, mais que le déplacement (amplitude crête-à-crête) varie. Comme on le prévoyait, plus le déplacement est élevé, plus la force exercée sur la goutte d'eau est grande donc moins l'intensité du champ électrique E_d a besoin d'être élevée pour atteindre le régime de délestage.

4.3.3 Influence de la température ambiante

Pour compléter ce travail, on a étudié dans les mêmes conditions expérimentales, le phénomène de vibrations induites par effet de couronne mais cette fois en variant la température de l'enceinte de 0° à 60° C.

La température de l'enceinte a été ajustée à un niveau désiré. Une fois la température atteinte, le système de refroidissement ou de chauffage, selon le cas, a été mis hors service. Cette procédure nous a permis d'étudier le comportement d'une goutte d'eau soumise à un champ électrique en fonction de la température ambiante, tout en évitant l'effet du mouvement d'air dans l'enceinte dû à la convection.

Dans cette partie de notre étude, on s'intéresse tout particulièrement à la variation du champ électrique, E_d , requis pour atteindre le régime de délestage en fonction de la température ambiante. Le champ électrique, E_d , revêt une importance considérable dû au fait que c'est à ce moment précis que la valeur crête du courant pulsatoire, I_p , est atteinte. Comme nous avons

**CHAMP ÉLECTRIQUE (E_d)
EN FONCTION
DU VOLUME D'EAU**

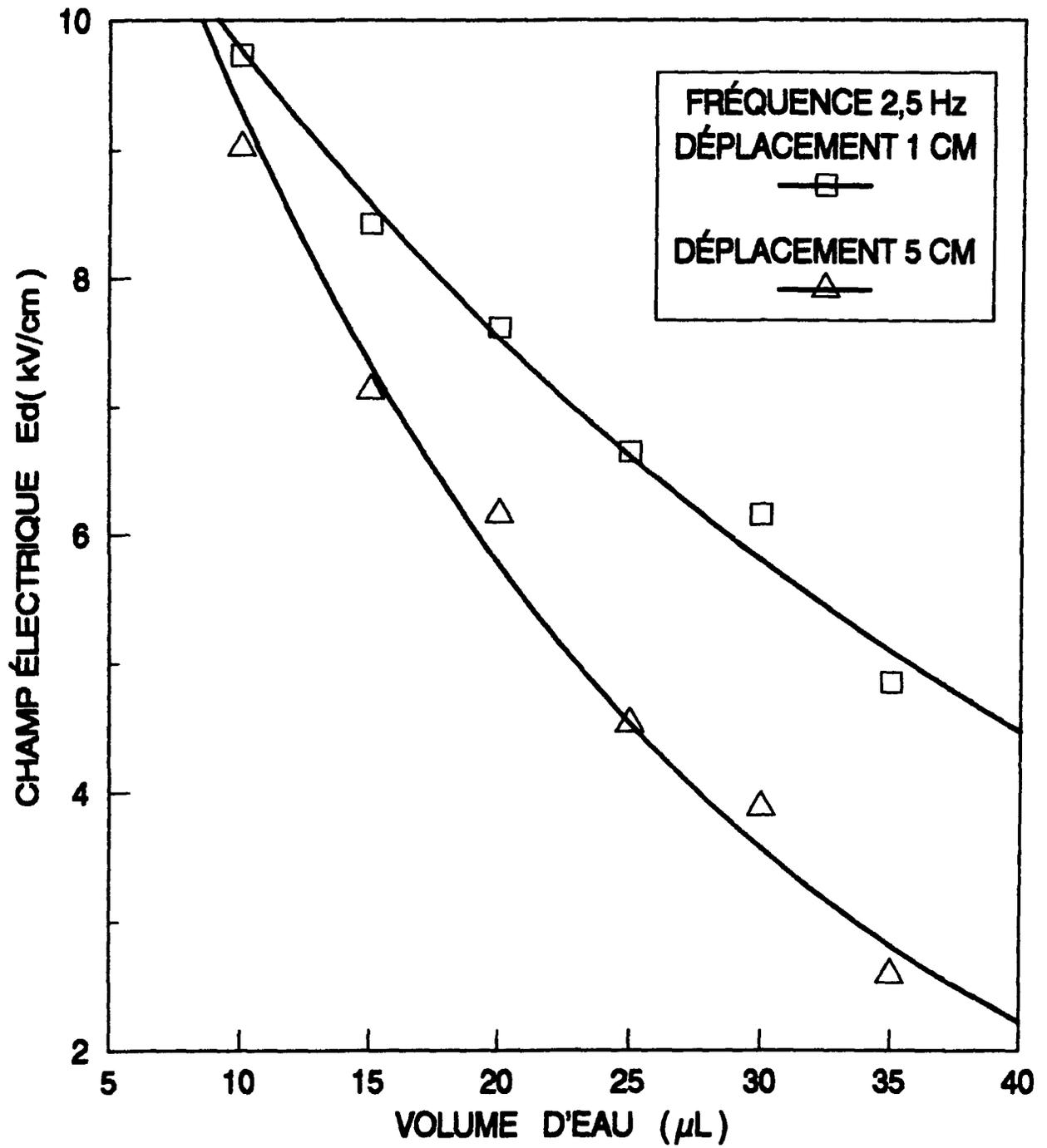


FIGURE 15

déjà mentionné, l'amplitude des vibrations induites par effet de couronne est proportionnelle à cette valeur crête du courant.

À noter que pour la suite de notre travail un volume de 15 μL a été choisi pour les gouttes d'eau. En effet, cette quantité d'eau est le volume le plus faible qui permet d'une part une bonne visualisation de la goutte sur l'écran cathodique à l'aide d'une caméra VHS et d'autre part de travailler dans une gamme de fréquences de vibrations plus large.

La figure 16 montre la variation du champ électrique, E_d , en fonction de la valeur de la température de l'enceinte pour les deux polarités négative et positive.

On a observé que le champ électrique, E_d , pour les deux polarités, décroît rapidement lorsque la température augmente. Le champ électrique, E_d , est sensiblement le même en négatif et en positif lorsque la température est près du point de congélation. Pour les températures près de 60° C, on obtient des résultats qui se différencient faiblement. Le champ électrique est légèrement inférieur pour la polarité positive.

La figure 17 montre la forme du courant de décharge pour une température de 3,8° C et un champ de 10,7 kV/cm pour les deux polarités de la tension appliquée. On peut remarquer sur cette figure que la valeur crête du courant (I_p), correspondant au moment où la goutte est éjectée, est sensiblement plus élevée pour la polarité négative.

**CHAMP ÉLECTRIQUE (E_d)
EN FONCTION DE
LA TEMPÉRATURE AMBIANTE**

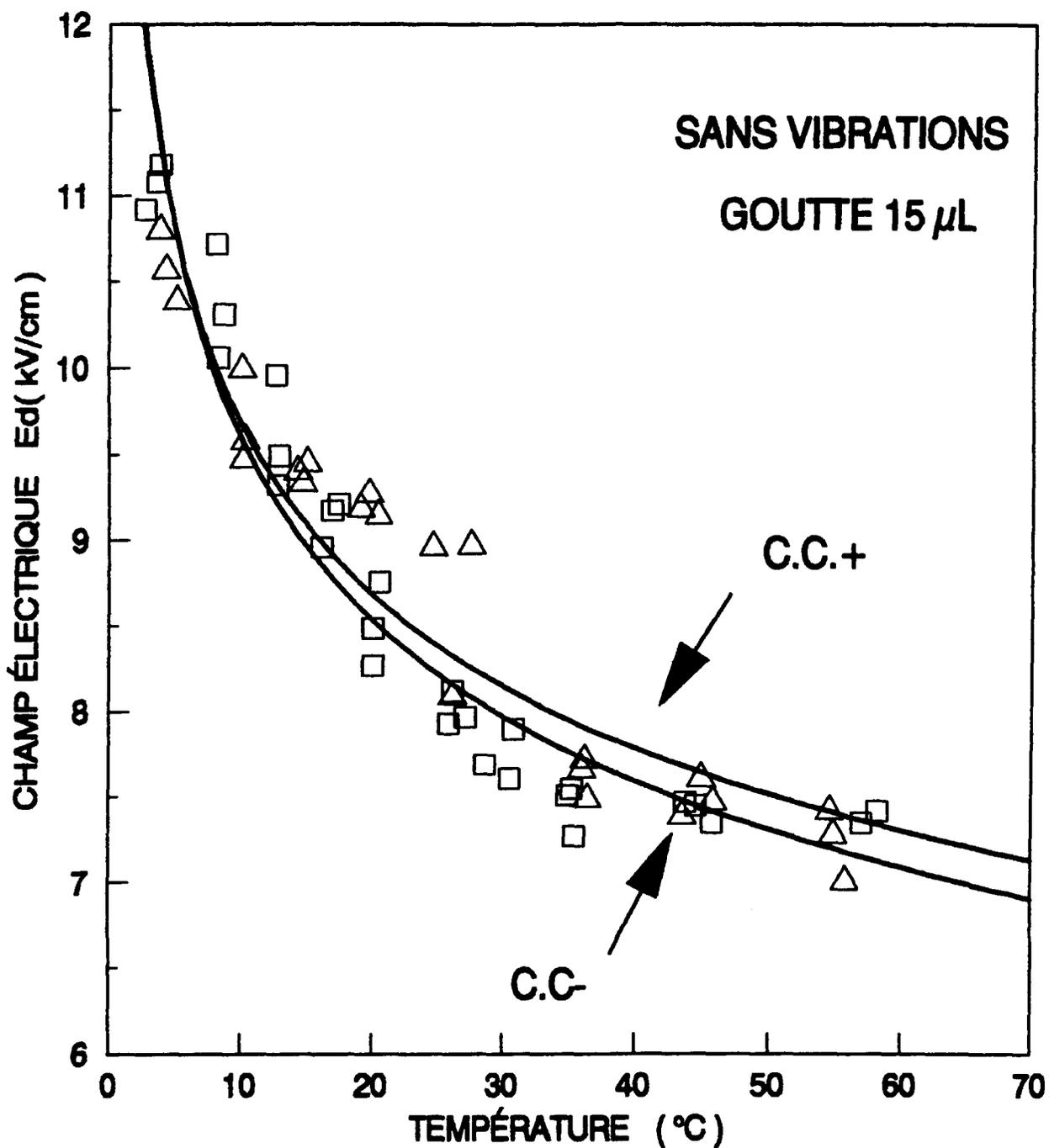
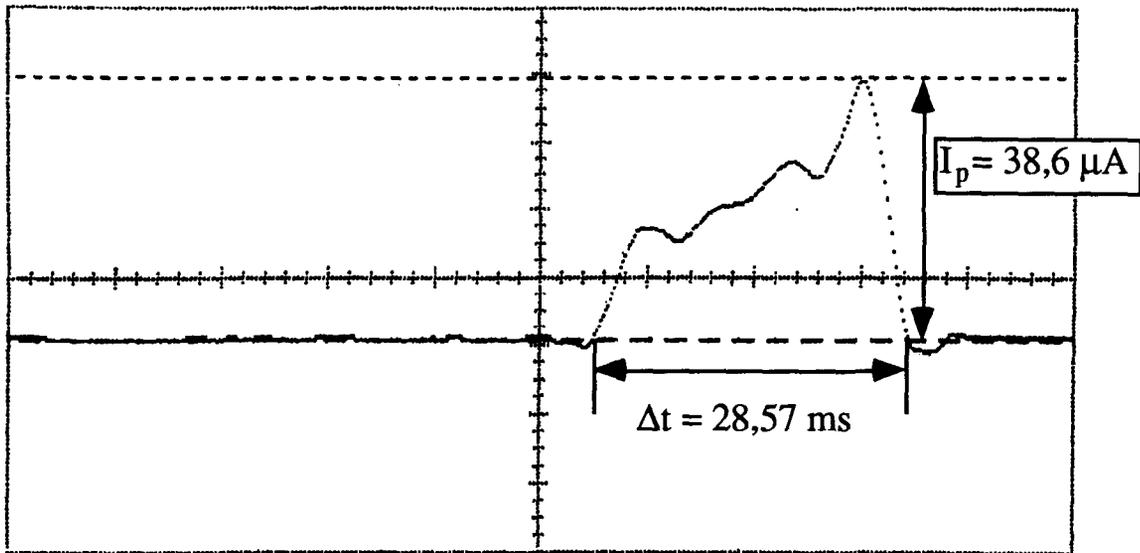
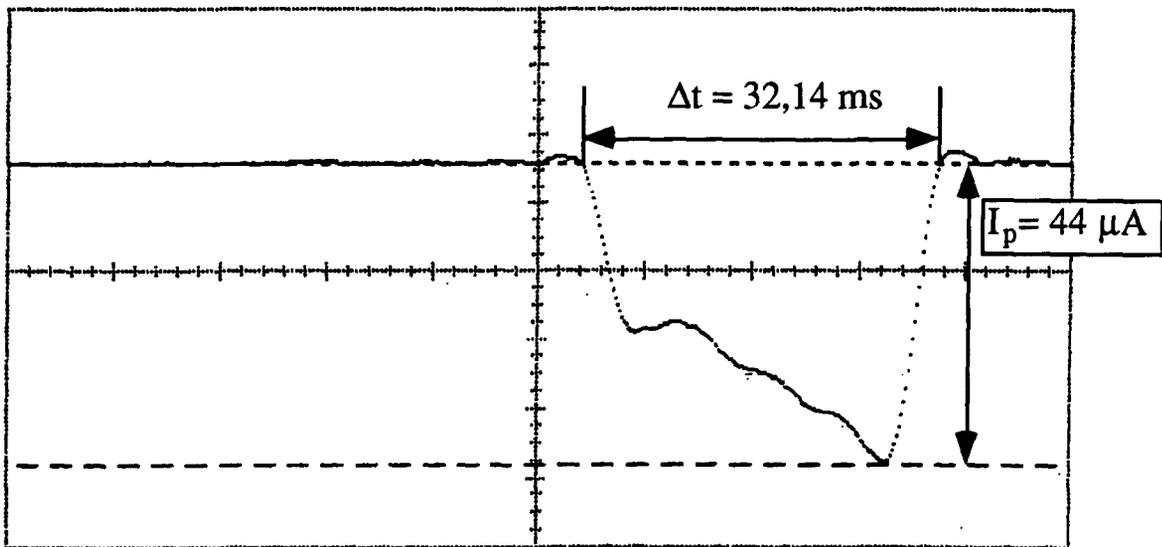


FIGURE 16



Température: $3,8^\circ \text{ C}$, c.c.+, $E = 10,7 \text{ kV/cm}$



Température: $3,8^\circ \text{ C}$, c.c.-, $E = 10,7 \text{ kV/cm}$

Figure 17: Courant de décharge en polarité positive et négative.

La figure 18 présente la caractéristique, $I_p(T^\circ)$, du courant de décharge à des températures variant entre 0° et 40° C sous les tensions positive et négative.

On a observé que le courant de décharge était plus élevé lorsqu'on applique une tension négative au conducteur. L'écart entre les deux polarités diminue lorsque l'on augmente la température.

Les figures 19 et 20 montrent, respectivement pour les polarités positive et négative, la variation du champ électrique E_d en fonction de la température sans vibrations et pour une fréquence de 2,5 Hz.

Dans les deux cas, avec ou sans vibrations, on obtient des résultats semblables, soit une même forme de courbe pour une polarité donnée sauf que le champ électrique, E_d , est plus faible lorsque le conducteur est en mouvement.

La figure 21 présente la variation de la longueur critique de la goutte d'eau (l'élongation maximale avant l'éjection), en fonction de la température, avec et sans vibrations. Les résultats ont été seulement obtenus en polarité positive.

La longueur critique d'une goutte d'eau froide est largement supérieure à celle obtenue pour de l'eau chaude. Lorsque le conducteur est en mouvement, la longueur critique est légèrement moins élevée que lorsque le conducteur demeure dans une position fixe.

**COURANT DE DÉCHARGE (I_p)
EN FONCTION DE
LA TEMPÉRATURE AMBIANTE**

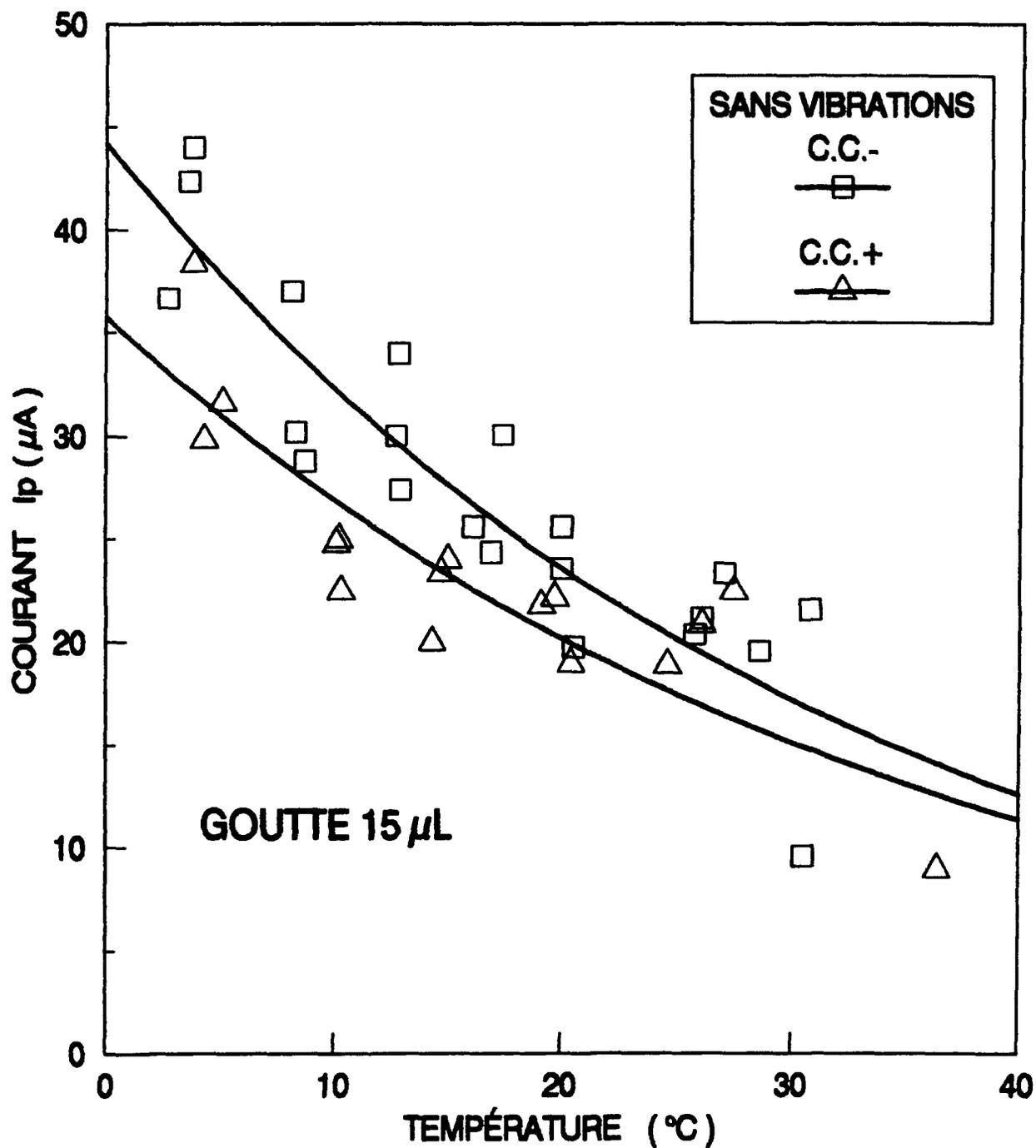


FIGURE 18

CHAMP ÉLECTRIQUE (E_d) EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE AMBIANTE

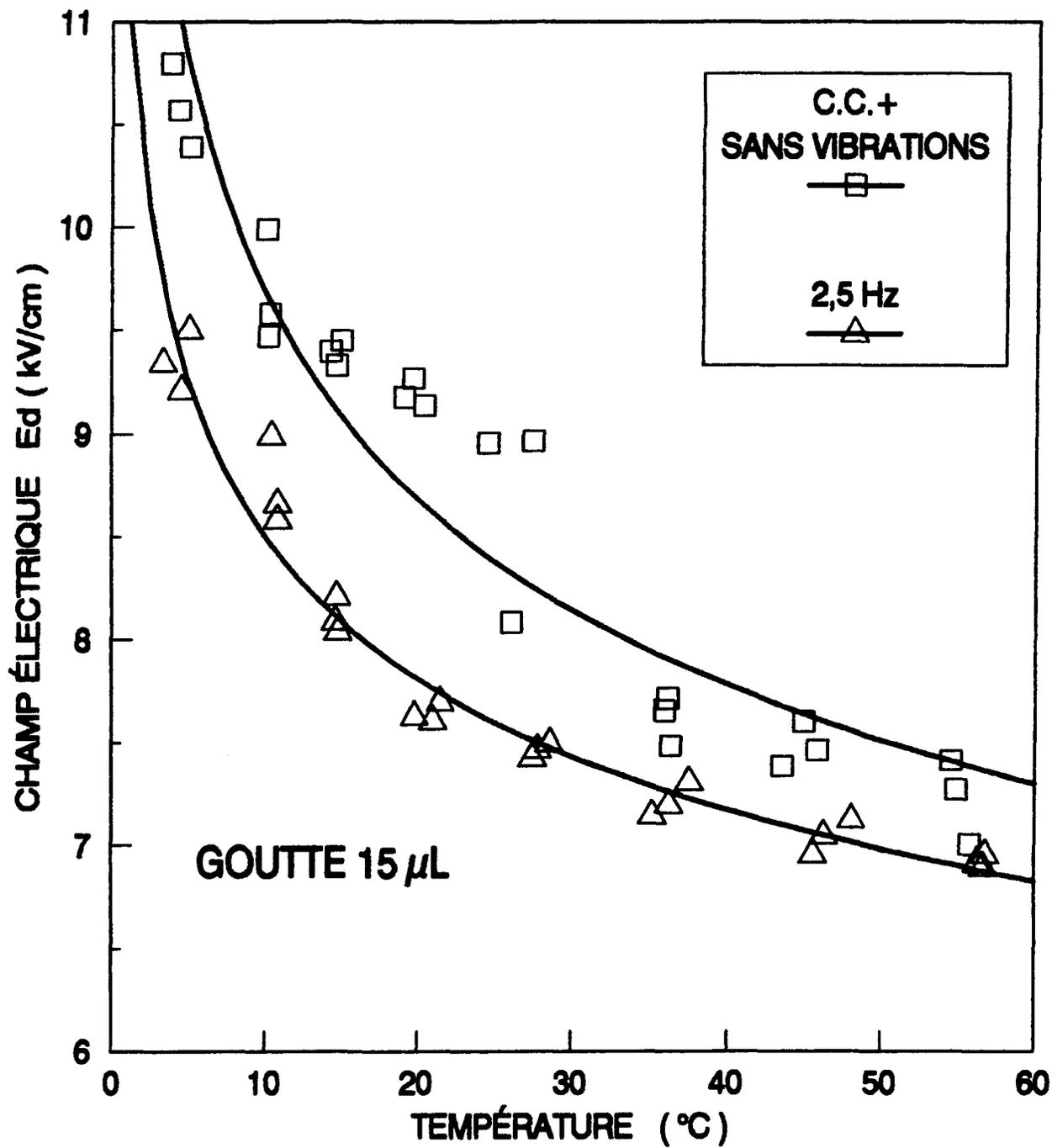


FIGURE 19

CHAMP ÉLECTRIQUE (E_d) EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE AMBIANTE

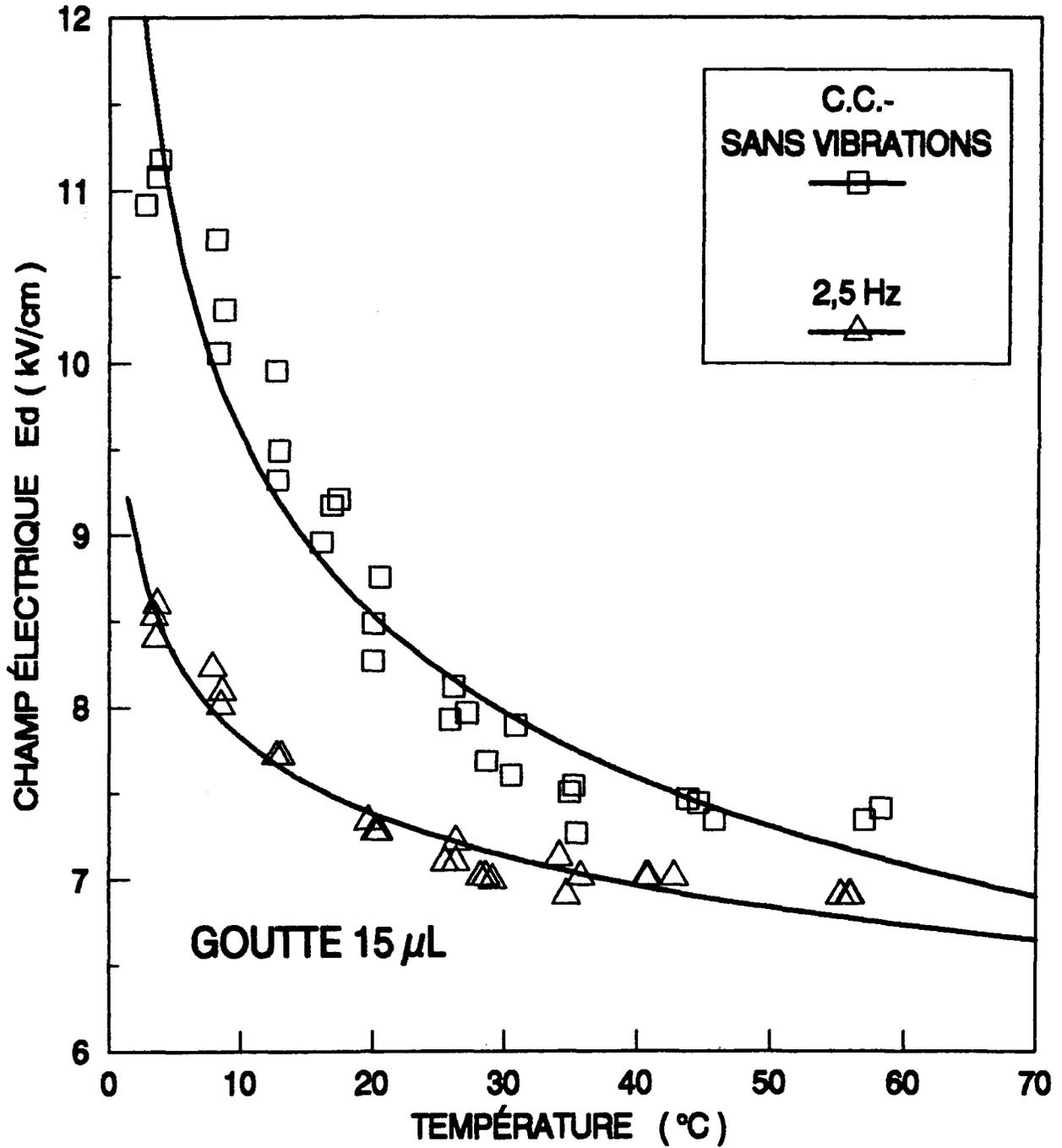


FIGURE 20

LONGUEUR CRITIQUE EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE AMBIANTE

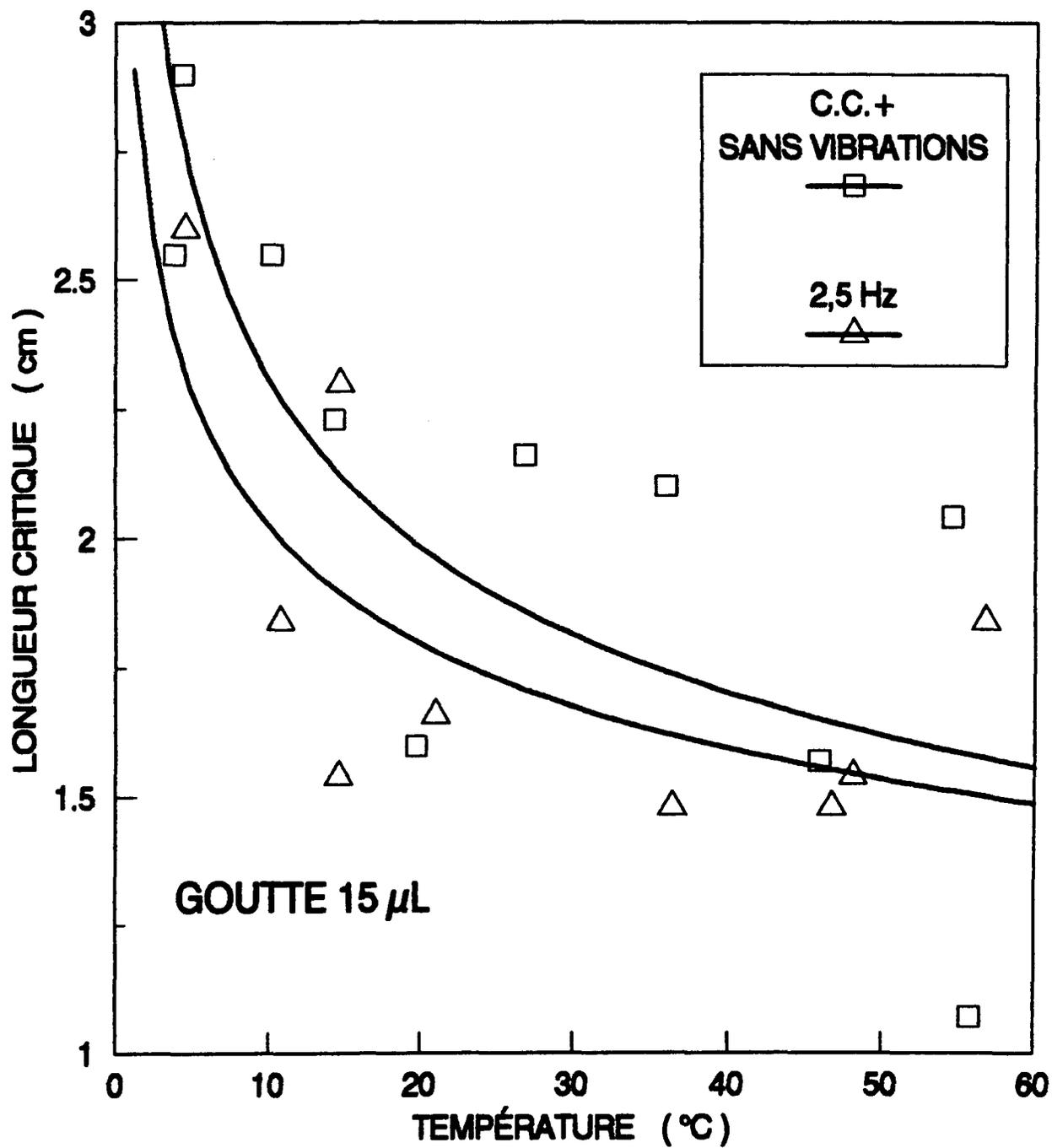


FIGURE 21

La figure 22 illustre les changements du volume optimum de la goutte (volume d'eau demeurant sur le conducteur après l'éjection) pour différentes valeurs de température, avec et sans vibrations. Ces résultats ont été obtenus en polarité positive.

Le volume d'eau demeurant sur le conducteur après l'éjection d'une gouttelette est plus important pour les températures près de 0°C que pour les températures élevées. Lorsque le conducteur vibre, le volume optimum est plus petit. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus précédemment pour la longueur critique.

On peut visualiser l'élongation critique et le volume optimum de la goutte d'eau sur les figures 23a et 23b montrant une séquence de la variation de la forme d'une goutte d'eau lorsque le conducteur se déplace de la position maximale supérieure jusqu'à l'éjection d'une gouttelette. La position du conducteur correspondant à cette séquence photographique est illustrée à la figure 24. L'éjection se produit lorsque le conducteur change de direction, juste après avoir atteint la position maximale inférieure. On observe ainsi un petit déphasage entre les positions extrêmes du conducteur et celles de la goutte. Ce déphasage correspond au décalage entre la position la plus basse du conducteur et la position de la goutte lorsqu'une gouttelette est éjectée. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus lors de l'étude des vibrations induites sur un conducteur sous une pluie artificielle [20].

VOLUME OPTIMUM EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE AMBIANTE

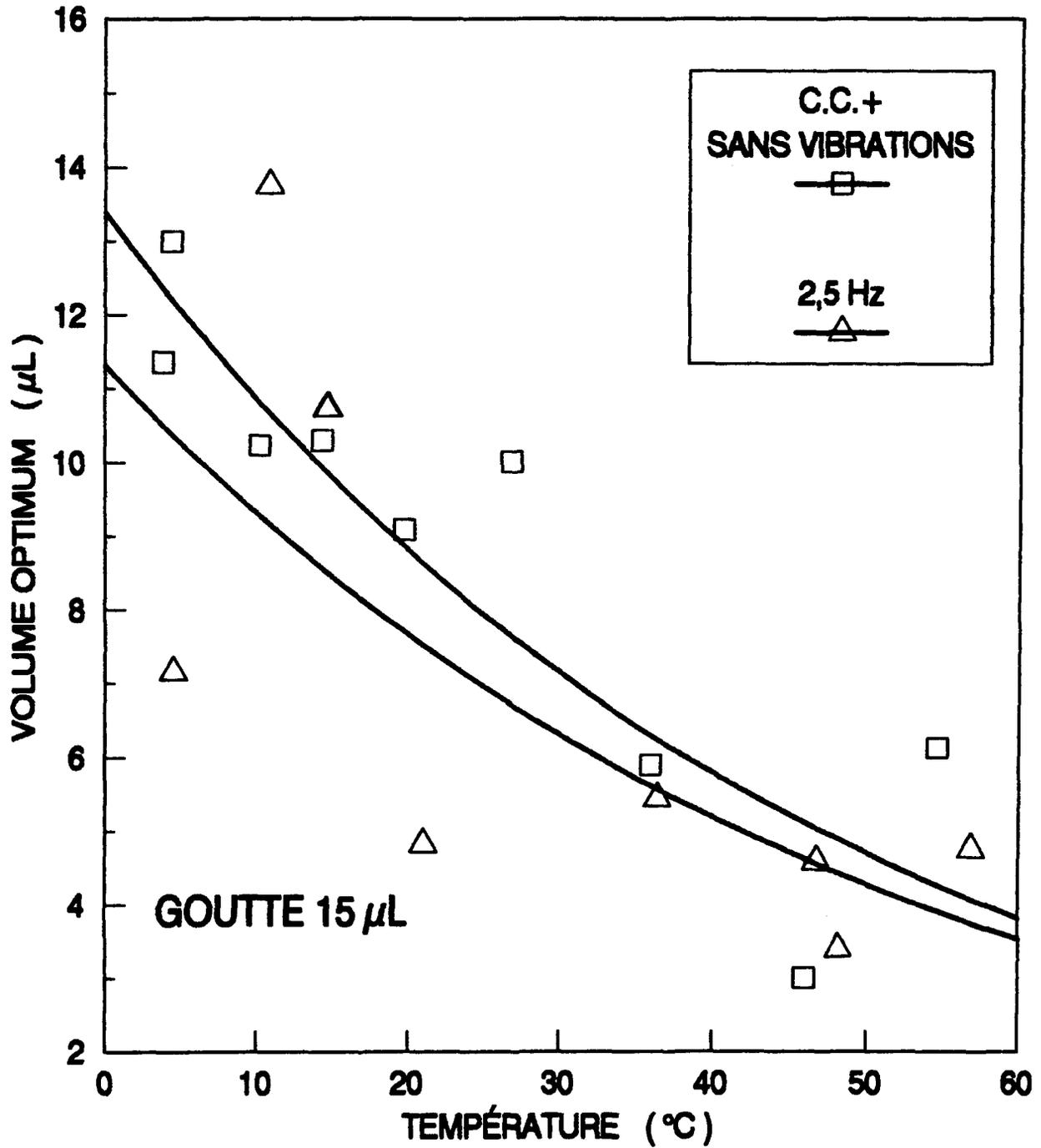
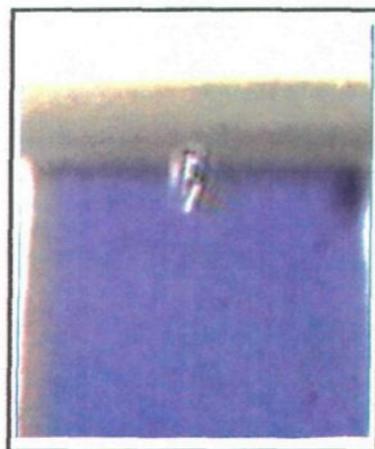


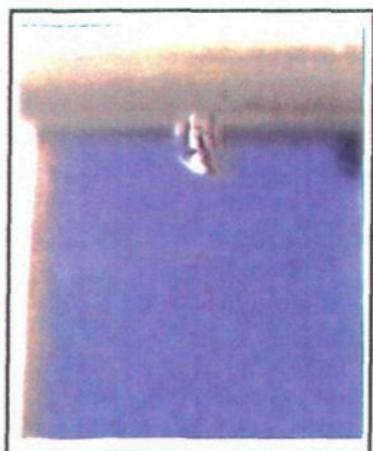
FIGURE 22



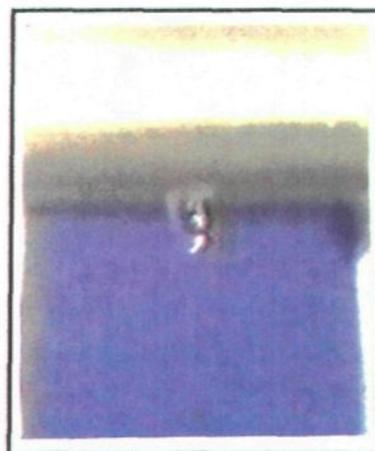
Position 1



Position 3

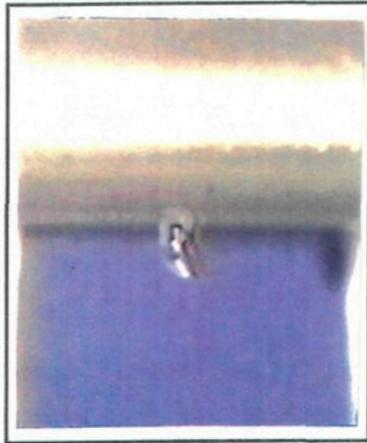


Position 2



Position 4

Figure 23a: Séquence de la déformation d'une goutte d'eau



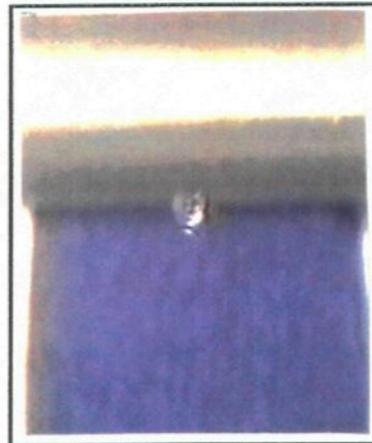
Position 5



Position 7



Position 6



Position 8

Figure 23b: Séquence de la déformation d'une goutte d'eau

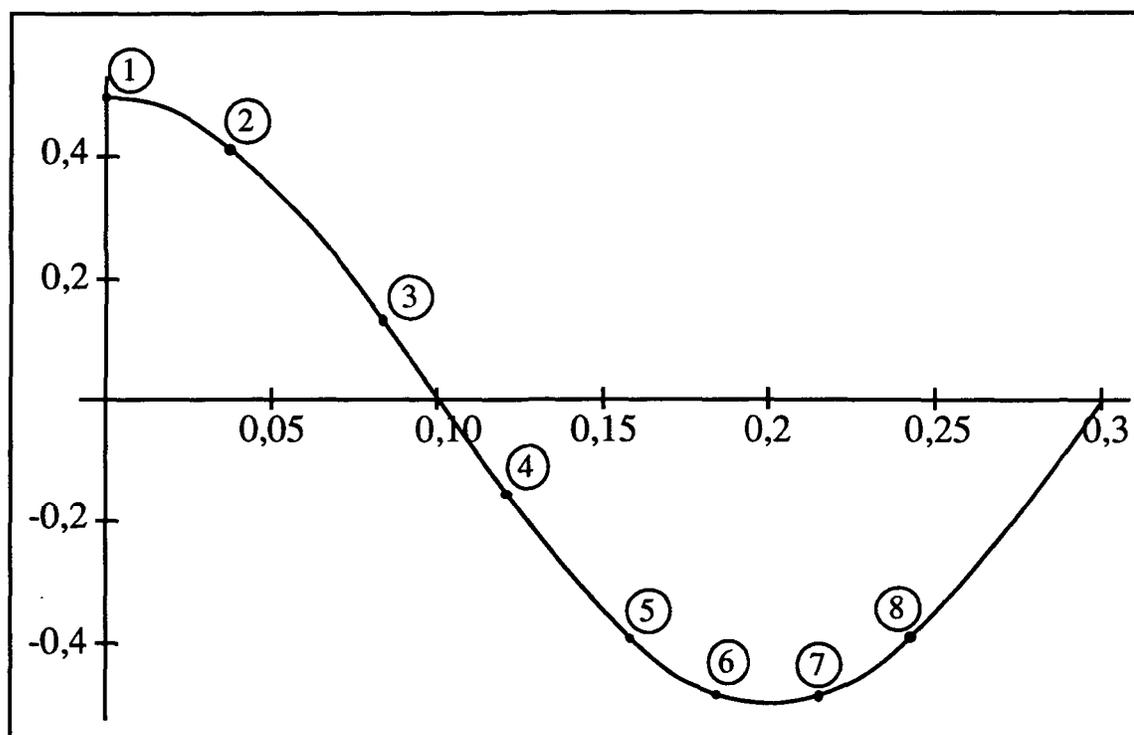


Figure 24: Position du conducteur correspondant à la séquence photographique

4.3.4 Influence de la température sur les vibrations induites d'un conducteur sous une pluie artificielle

On a vérifié les résultats obtenus avec le montage à échelle réduite sur un montage existant dans notre laboratoire dont les dimensions du conducteur central respectent les dimensions réelles des conducteurs utilisés pour le transport de l'énergie électrique à haute tension.

Ce montage (figure 25) est constitué d'un conducteur lisse placé dans l'axe d'un cylindre en grillage métallique composé de trois parties. La partie centrale a une longueur de 2 m et est reliée à la terre par l'intermédiaire d'une résistance de mesure. Les deux cylindres extérieurs d'une longueur de 0,3 m jouent un rôle d'anneaux de garde et sont reliés directement à la terre. En vue de fixer la fréquence naturelle du conducteur, on applique une force mécanique à chaque extrémité de celui-ci. Le conducteur a les caractéristiques suivantes: diamètre: 3,2 cm; longueur: 357 cm; masse: 1,56 kg.

Compte tenu des dimensions du montage, et n'ayant pas en notre possession d'enceinte pouvant contrôler la valeur de la température ambiante pour des températures très élevées, on a opté pour changer la température de l'eau tombant sur le conducteur au lieu d'augmenter la température ambiante.

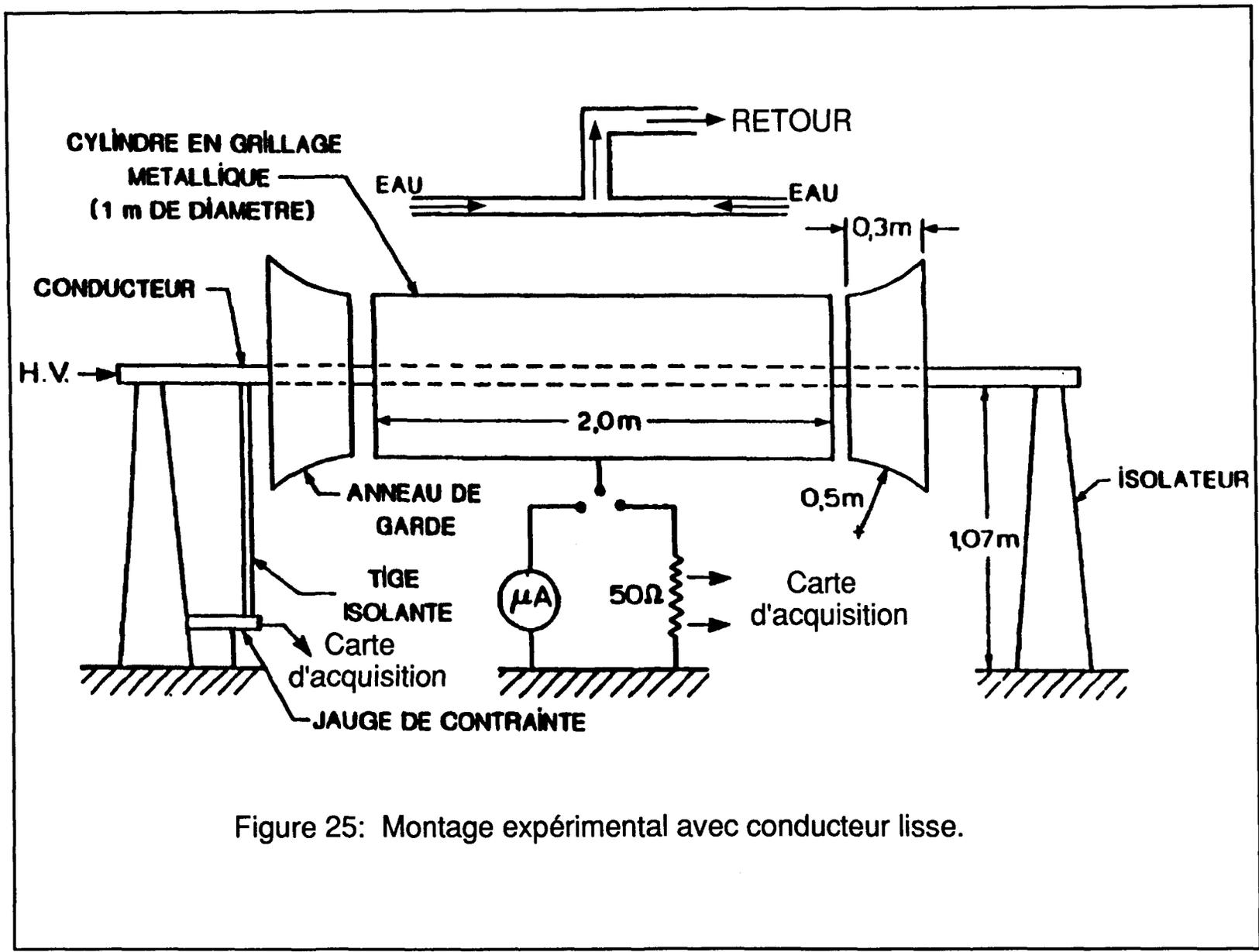


Figure 25: Montage expérimental avec conducteur lisse.

Étant donné que dans le montage existant l'eau était pulvérisée à la sortie des gicleurs, il était impossible avec un tel système d'augmenter d'une manière significative la température des gouttes d'eau suspendues au conducteur.

Les gicleurs ont donc été remplacés par un système composé d'un conduit cylindrique de cuivre de 2 cm de diamètre et d'une longueur de 2 m (soit la longueur de la cage métallique) disposé juste au-dessus du conducteur. Ce conduit est perforé sur la longueur d'une trentaine de trous minuscules d'où s'écoule l'eau pour tomber directement sur le conducteur. Afin d'augmenter l'efficacité du système, on a alimenté le conduit par ses deux extrémités et le renvoi d'eau s'effectue en plein centre (figure 25). On a fait circuler l'eau à très forte pression afin de minimiser les pertes de chaleur tout en ajustant une intensité de précipitation équivalente à celle fournie par les gicleurs.

L'ensemble haute tension utilisé pour réaliser nos expériences est un système modulaire de fabrication Messwandler-Bau 100 kV, 5 mA. On mesure l'amplitude des vibrations, à l'aide d'une jauge de contrainte. Le signal de sortie de la jauge est envoyé sur un indicateur de contrainte modèle VISHAY p-350 AP lequel est relié à une carte d'acquisition de données Data-Translation, modèle DT2805 et les données sont traitées par le logiciel Asystant de Macmillan Software Co., série: 1021513.

Le courant de décharge est mesuré par l'intermédiaire d'une résistance de mesure de 50Ω placée entre le grillage de la cage et la masse. La tension aux bornes de cette résistance est mesurée à l'aide de la même carte d'acquisition de données mentionnée ci-haut.

Le conducteur était refroidi ou réchauffé selon le cas par un apport massif d'eau à la température désirée. Lorsque la température du conducteur et celle de l'eau atteignaient la même valeur on diminuait le débit d'eau pour obtenir un écoulement normal et alors on effectuait un test.

Avec ce montage, on a fait quelques essais comparatifs de l'influence de la température sur l'amplitude de vibrations du conducteur et sur le courant de décharge (figure 26). Voici les observations:

- Lorsque la pluie artificielle est obtenue à partir d'une alimentation à l'eau froide ($4,8^\circ \text{C}$), l'amplitude de vibrations du conducteur est plus élevée que pour une alimentation à l'eau chaude (31°C) toujours dans les mêmes conditions expérimentales soit lorsque l'on maintient le champ électrique et le débit d'eau constant.
- En comparant le courant de décharge et l'amplitude de vibrations pour les deux températures, on peut voir que comme pour les études précédentes ^[1], l'amplitude de vibrations est directement proportionnelle au courant pulsatoire I_p et inversement proportionnelle à la composante directe du courant de décharge I_d .

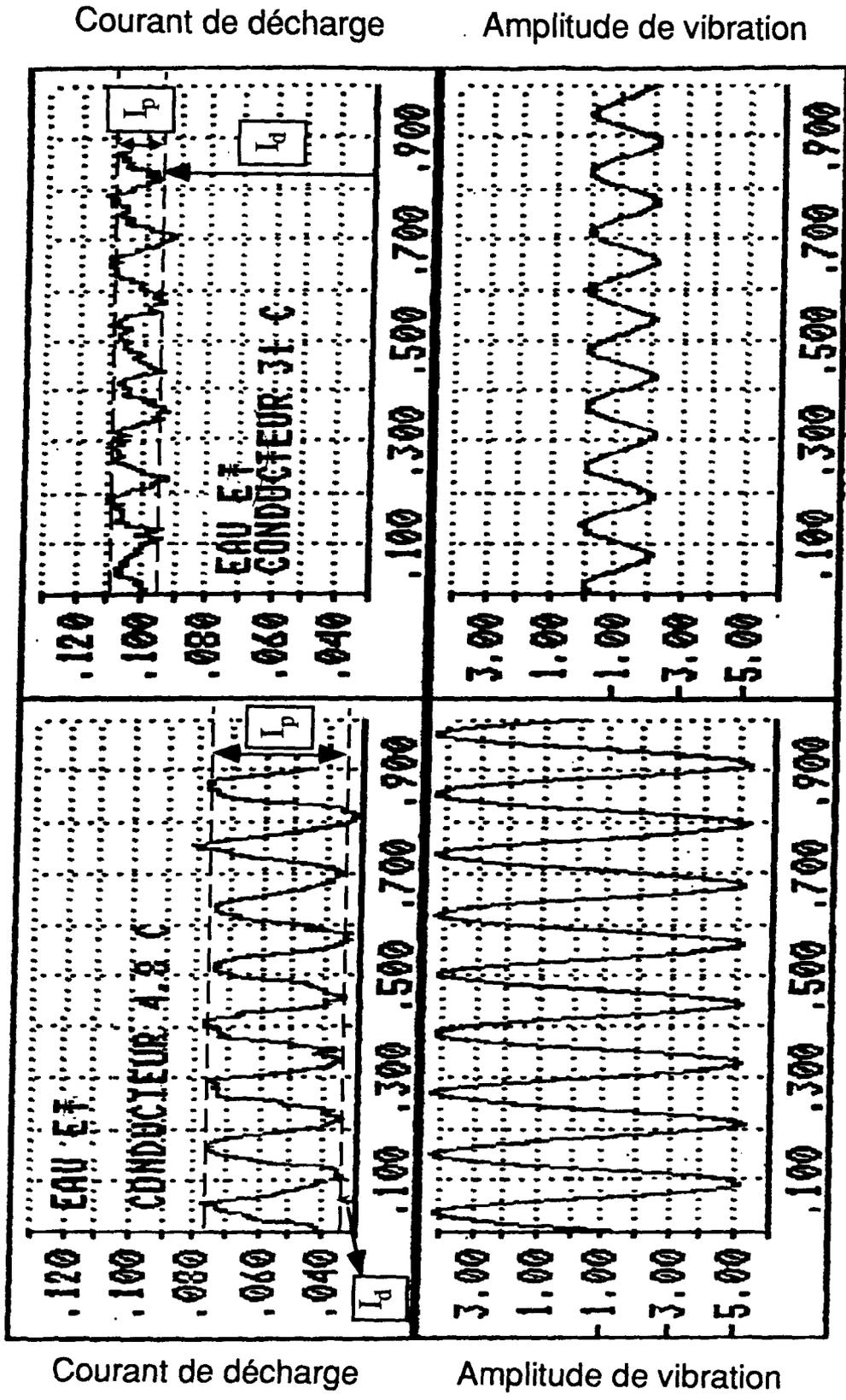


Figure 26: Amplitude de vibrations et courants de décharge du conducteur aux dimensions réelles.

- Ces résultats concordent avec ceux obtenus sur le modèle réduit et confirme la diminution de l'amplitude de vibrations induites par effet de couronne lorsque la température ambiante augmente.

4.4 CALCUL DE LA CONSTANTE K_{EAU} DU MODÈLE PHYSIQUE DE LA GOUTTE

La figure 27 représente le déplacement du conducteur (Y_1) et celui de la goutte d'eau suspendue (Y_2) en fonction du temps lorsqu'aucune tension n'est appliquée au conducteur. Cette expérience a pour but de déterminer la constante du ressort K_{eau} du modèle physique proposé pour la goutte soit un système masse-ressort.

On reprend les équations 9 et 10 du chapitre 3 concernant la modélisation physique de la goutte d'eau et comme mentionné précédemment, on néglige le déphasage entre le déplacement de la goutte et celui du conducteur afin de conserver la linéarité du système proposé.

$$F_r = M_1 \ddot{Y}_1 - K(Y_2 - Y_1) + M_1 g \quad (9)$$

$$0 = M_2 \ddot{Y}_2 - K(Y_1 - Y_2) + M_2 g \quad (10)$$

où $M_1 =$ masse du conducteur $= 4,6 \times 10^{-2}$ kg

$M_2 =$ masse de la goutte $= 1,497 \times 10^{-5}$ kg (pour une goutte de 15 μL
à 20° C)

$$Y_1 = 0,5 \cos (5\pi t) \text{ (cm)}$$

$$Y_2 = -0,294 + 0,54 \cos (5\pi t) \text{ (cm)}$$

$$\ddot{Y}_1 = -12,5 \pi^2 \cos (5\pi t) \text{ (cm/s}^2\text{)}$$

$$\ddot{Y}_2 = -13,5 \pi^2 \cos (5\pi t) \text{ (cm/s}^2\text{)}$$

Y_1 , Y_2 , \ddot{Y}_1 et \ddot{Y}_2 proviennent des résultats obtenus et présentés sur la figure 27.

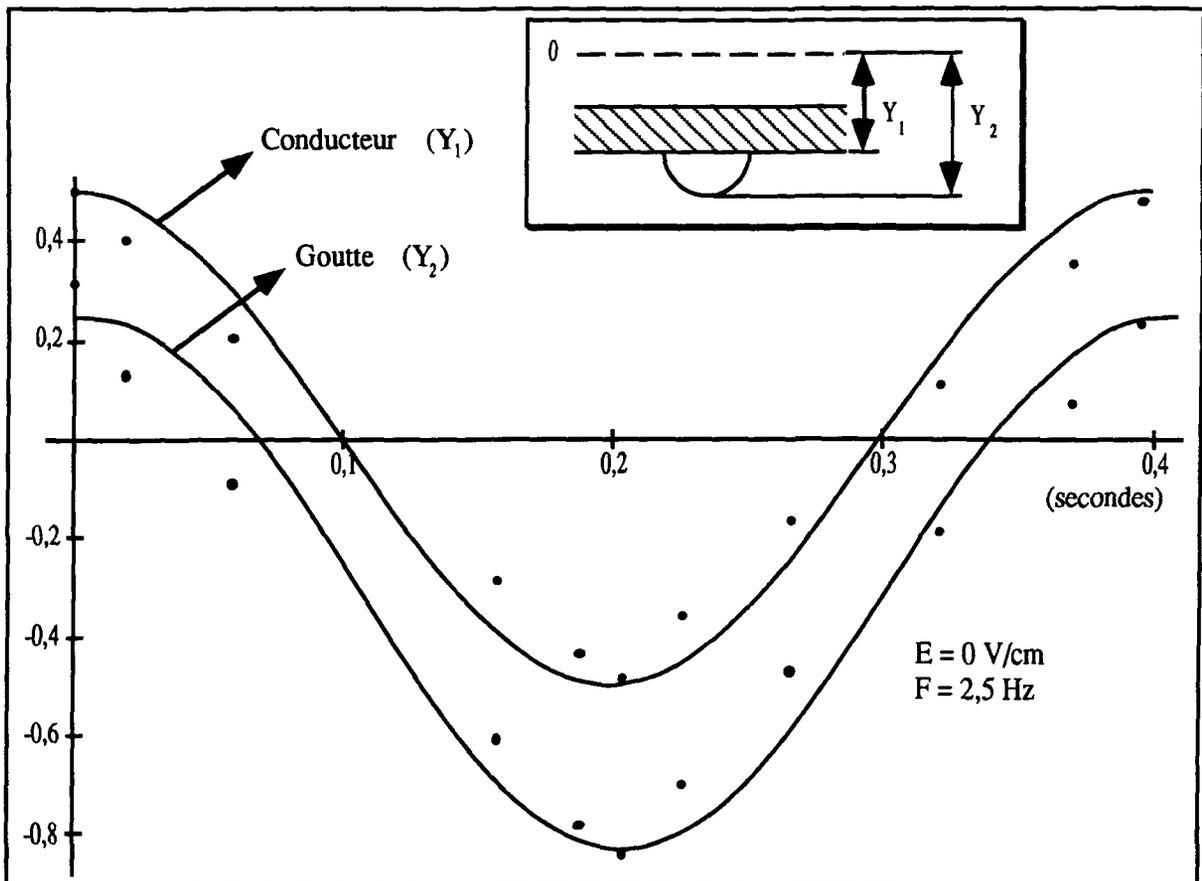


Figure 27: Position du conducteur et d'une goutte d'eau de 15 μL

On obtient de (10):

$$K = M_2 \frac{(\ddot{Y}_2 - g)}{(Y_1 - Y_2)} \quad (10.1)$$

$$K = 1,497 \times 10^{-5} \text{ kg} \left(\frac{(-1,332 \cos(5\pi t) - 9,8) \frac{\text{s}}{\text{m}^2}}{(-0,4 \cos(5\pi t) + 0,294) \times 10^{-2} \text{ m}} \right)$$

$$K = 1,497 \times 10^{-5} \times (3,33 \times 10^3) \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$K = 5 \times 10^{-2} \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$\begin{aligned}
 \text{D'où } F_r &= [(4,6 \times 10^{-2} \text{ kg}) \times (-12,5 \times 10^{-2} \pi^2 \cos(5\pi t) \text{ m/s}^2)] \\
 &\quad - [5 \times 10^{-2} \text{ N/m} \times (-0,04 \times 10^{-2} \cos(5\pi t) + 0,294 \times 10^{-2} \text{ m})] \\
 &\quad + [1,48 \times 10^{-1} \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2] \\
 F_r &= [-5,7 \times 10^{-2} \cos(5\pi t) + 0,45] \text{ N}
 \end{aligned}$$

Il serait également intéressant de calculer la constante K_{eau} en présence d'un champ électrique pour différentes températures de la goutte. Cela demanderait la réalisation d'un nombre importants d'essais qui pourraient faire l'objet d'une étude supplémentaire.

4.5 DISCUSSION DES RÉSULTATS

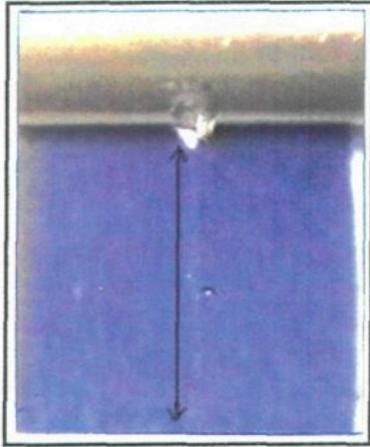
On a vérifié expérimentalement que l'élévation de la température des gouttes d'eau suspendues au conducteur haute tension a pour conséquence de diminuer l'amplitude de vibrations. Cela peut être expliqué comme suit.

Comme il a déjà été mentionné, l'amplitude de vibrations est directement reliée à la valeur crête du courant pulsatoire I_p . À son tour, le courant I_p est proportionnel à la longueur critique des gouttes (l_c) suspendues au conducteur. Donc, plus l_c est grande plus l'amplitude de vibrations est élevée. Étant donné que l'eau chaude est plus fluide, donc moins visqueuse que l'eau froide, cette longueur critique est moins élevée pour une goutte d'eau chaude que pour une goutte d'eau froide (voir la figure 21, page 66).

Ceci peut être visualisé sur les figures 28 et 29 où la longueur critique est plus élevée pour une température de 3,8° comparativement à 45,9° C sans vibrations et pour 14,7° par rapport à 48,1° C avec vibrations. D'où l'amplitude de vibrations induites par effet de couronne diminue lorsque la température ambiante augmente.

Bien que la détermination des pertes par effet de couronne sous la pluie ne rentre pas dans le cadre de cette étude nos résultats expérimentaux indiquent que ces pertes doivent diminuer lorsque la température ambiante augmente. Ceci est dû à la diminution de la longueur critique (l_c) des gouttes suspendues avec l'augmentation de la température.

Longueur critique

 $T = 3,8^{\circ} \text{ C}$  $T = 45,9^{\circ} \text{ C}$

Volume optimum

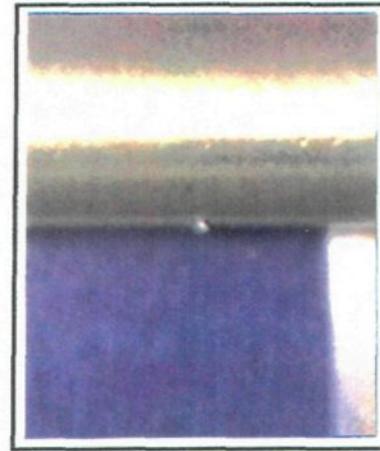
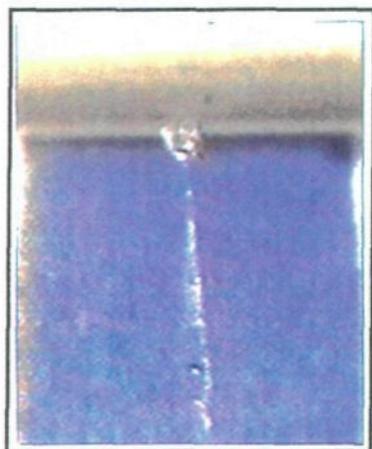
 $T = 3,8^{\circ} \text{ C}$  $T = 45,9^{\circ} \text{ C}$

Figure 28: Longueur critique et volume optimum sans vibrations

Longueur critique

 $T = 14,7^{\circ} \text{ C}$  $T = 48,1^{\circ} \text{ C}$

Volume optimum

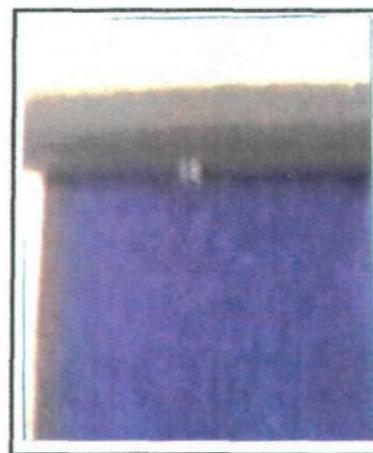
 $T = 14,7^{\circ} \text{ C}$  $T = 48,1^{\circ} \text{ C}$

Figure 29: Longueur critique et volume optimum à 2,5 Hz

CHAPITRE V

CONCLUSION

Les résultats obtenus lors de l'étude de l'influence de la variation de la température ambiante sur les vibrations induites par effet de couronne, qui font l'objet du présent travail, nous permettent d'exposer les conclusions suivantes:

- La forme et l'élongation d'une goutte d'eau suspendue à un conducteur porté à la haute tension dépendent non seulement de l'intensité du champ électrique et de sa polarité mais également de la température ambiante.
- L'étude théorique de l'influence de la variation de la température ambiante sur les propriétés physiques de l'eau et des forces mises en jeu dans les mécanismes de vibrations induites par effet de couronne met en évidence deux phénomènes particulièrement intéressants:
 - a) La variation de la viscosité et de la tension de surface avec la température favorise un détachement plus facile de la gouttelette.

Par conséquent la longueur critique et le volume optimum diminue lorsqu'on augmente la valeur de la température ambiante.

- b) Le champ critique caractérisant l'apparition de l'effet de couronne qui est un facteur déterminant pour l'amorçage des vibrations est plus faible lorsque la température ambiante est élevée.
- L'amplitude de vibrations est directement reliée à la valeur crête du courant pulsatoire I_p observé lors du détachement d'une goutte. À son tour le courant I_p est proportionnel à la longueur critique des gouttes suspendues au conducteur. Il a été démontré que l'augmentation de la température ambiante conduit à une diminution de la taille critique d'une goutte d'eau et a pour effet de réduire l'amplitude des vibrations.
 - L'amplitude de vibrations induite par effet de couronne d'un conducteur lisse soumis à une pluie artificielle diminue lorsque la température de la pluie augmente. Ceci est en accord avec la théorie avancée.
 - Un modèle physique simplifié représentant le comportement d'une goutte d'eau comme étant un système masse-ressort a été développé. Ce modèle n'est qu'une approximation due à la complexité du phénomène réel. Une constante de ressort de 5×10^{-2} N/m a été calculée pour une goutte de 15 μ L soumise à une vibration sinusoïdale ayant une fréquence de 2,5 Hz et une amplitude de 1 cm et ce pour une température ambiante de 20° C.

BIBLIOGRAPHIE

- 0x [1] M. FARZANEH, "Contribution à l'étude des mécanismes des vibrations induites par effet de couronne", Thèse de doctorat d'état, présentée à l'université Paul Sabatier de Toulouse, 1986.
- 0x [2] J.B. JORDAN, "Foul weather corona", Research report, electrical engineering department, Laval University, Québec, 1966.
- [3] C. GARY et M. MOREAU, "L'effet de couronne en tension alternative", Éditions Eyrolles (Paris), pp. 17-33, 283-302, 1976.
- [4] G. LE ROY, C. GARY, B. HUTZLER, J. LALOT et C. DUBANTON, "Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions", Éditions Eyrolles (Paris), pp. 420-533, 1984.
- [5] L.C. PHAN et M. FARZANEH, "Notes du cours Haute tension", 1989.
- [6] C. GARY, "Effet couronne en tension alternative", Techniques de l'ingénieur, no. D 640.3, 1974.

[7] T.N. GIAO et J.B. JORDAN, "Modes of corona discharge in air", IEEE Transactions, Vol. PAS-87, no. 5, pp. 1207-1215, 1968.

JA [8] M. FARZANEH et Y. TEISSEYRE, "A study of corona current and ionic wind during the deformation of a H.V. water drop subjected to a mechanical oscillation", Fifth international symposium on high voltage engineering, Braunschweig, Paper no. 91.01, 24-28 août 1987.

[9] M. HARA et al., "Electrical corona and specific charge on water drops from a cylindrical conductor with high D.C. voltage", Journal of Electrostatic, Vol. 8, pp. 239-270, 1980.

[10] F.W. PEEK, "Law of corona and the dielectric strenght of air", AIEE Transactions Power Apparatus and Systems, Vol. 30, pt. III pp. 1889-1965, 1911.

[11] W.N. ENGLISH, "Corona from a water drop", Physical Review, 74, 1948.

[12] M. PAUTHENIER, G. DUHAUT et L. DEMON, "Contribution à l'étude des pertes électriques dans les lignes à courant continu à haute tension. Étude particulière des gouttes d'eau en pointe fixe.", Revue générale de l'électricité, Tome 59, no. 3, pp. 133-136, mars 1950.

[13] M. AKAZAKI, "Corona phenomena from water drops on smooth conductors under high direct voltage", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-84, no. 1, pp. 1-8, janvier 1965.

- [14] A. MANSIAUX, J. PHAN CONG LUAN, P. TREMBLAY et P. PIROTTE, "Équilibre des gouttes d'eau suspendues aux conducteurs des lignes de transport d'énergie électrique", *Journal de l'Ass. d'Ing. de Montiflore (AIM)*, Belgique, no. 3, pp. 225-228, 1975.
- or [15] J. DUPUY, "Effet de couronne et champ ionisés", *Revue générale de l'électricité*, Tome 67, no. 2, pp. 85-104, février 1958.
- [16] R. COCHET, "Captation de gouttelettes de brouillard par les lignes de transport d'énergie électrique à haute tension", *Revue générale de l'électricité*, Tome 62, no. 3, pp. 113-129, mars 1953.
- [17] L. BOULET et J. JORDAN, "Dégénérescence des ondes de Trichel à la surface de l'eau", *C.R. Acad. SC. Paris*, T. 261, pp. 3759-3760, novembre 1965.
- or [18] G.M. LEMANOZYK, R.M. MORRIS et R.L. WARDLAW, "Corona induced vibration of high voltage conductors", *Compte-rendu du cinquième congrès canadien de mécanique appliquée*, Frédéricton, 26-30 mai 1975.
- or [19] L.C. PHAN et M.A. ALLAIRE, "Effects of atmospheric parameters upon corona-induced vibration of high voltage conductors", *4th Inter. Sym. on H.V. Eng.*, Athens, Paper no. 45.09, pp. 1-4, septembre 1983.

- 0^v [20] M. FARZANEH et Y. TEISSEYRE, "A study of corona current and ionic wind during the deformation of H.V. water drop subjected to a mechanical oscillation", IEEE Transactions, Vol. 3, no. 3, pp. 1122-1130, juillet 1988.
- [21] O. GUENFOUD, I.B. JORDAN et R. SAINT-ARNAUD, "Atmospheric ions and positive point corona", Fourth International Symposium on High Voltage Engineering, Athens, Greece, Paper no. 41.03, septembre 1983.
- [22] S. KURODA et T. HORIUCHI, "Effects of corona discharge on the formation of electrically-extracted liquid jets", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 23, no. 12, pp. 1598-1607, décembre 1984.
- 0^m [23] H.H. NEWELL, T-W. LIAO et F.W. WARBURTON, "Corona and RI caused by particles on or near EHV conductors: II-Foul Weather", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Paper 31 C 44-c, pp. 911-927, avril 1968.
- [24] M.A. SALAMA, H. PAREKH et K.D. SRIVASTAVA, "A comment on the methods of calculation of corona onset voltage", Applied Physics Letter, Vol. 30, no. 3, 1 février 1977.
- [25] J.W. TELFORD et N.S.C. THORNDIKE, "Observations of small drop collisions", Journal of meteorology, Vol. 18, pp. 382-387, juin 1961.

- [26] A. MANSIAUX et L.P. CONG, "Instabilité et variation avec la température des pertes par effet de couronne d'une goutte d'eau soumise à un champ alternatif", Proc. de Can. IEEE Conf. on Power and Communications, pp. 200-201, Montréal, 6-8 nov. 1974.
- [27] M. HARA, S. ISHIBE et M. AKAZAKI, "Corona discharge and electrical charge on water drops dripping from D.C. transmission conductors - an experimental study in laboratory", Journal of Electrostatics, Vol. 6, pp. 235-257, 1979.
- OK [28] C.L. PHAN et A. MANSIAUX, "Corona and charge transfer on water drops in proximity of a conductor", IEEE International Summer Power Conference, San Francisco, Paper no. A 75 565-2, juillet 1975.
- [29] W. JANISCHEWSKYJ et A. ARAINY, "Corona characteristics of simulated rain", IEEE International Winter Power Conference, New York, Paper no. F 80 201-4, février 1979.
- [30] S. SEKAR, "An investigation of pulsed corona in cylindrical and wire-plate geometries", Journal of Electrostatics, Vol. 13, pp. 29-41, 1982.
- [31] P. HEROUX, P.S. MARUVADA et N.G. TRINH, "High voltage AC Transmission Lines: Reduction of Corona under Fool Weather", IEEE International Winter Power Conference, New York, Paper no. 82 WM 026-3, février 1982.

- [32] M. HARA et M. AKAZAKI, "Onset mechanism and development of corona discharge on water drops dripping from a conductor under high direct voltage", *Journal of Electrostatics*, Vol. 9, pp. 339-353, 1981.
- [33] L.P. CONG, P. PIROTTE, R. BRUNELLE et N.G. TRINH, "A study of corona discharges at water drops over the freezing temperature range", *IEEE International Summer Power Conference, Vancouver*, Paper no. T 73 417-3, juillet 1973.
- [34] M. FARZANEH et Y. TEISSEYRE, "Effects of the temperature and voltage polarity on the ionic wind velocity", Article à paraître dans le compte-rendu du congrès suivant: 7th International symposium on High Voltage Engineering, Allemagne, août 1991.
- [35] A. GOKWAYA et M. FARZANEH, "Modeling and simulation of space charge in the vicinity of H.V. water drop", *Fiftenth Annual Pittsburgh Conference on Modeling and Simulation, Pittsburgh, U.S.A.*, compte-rendu pp. 1505-1513, avril 1985.
- [36] Y. TEISSEYRE et M. FARZANEH, "Effects of corona discharge on ice accretion", 4e Congrès international sur le givrage atmosphérique des structures, France, compte-rendu pp. 310-313, septembre 1988.
- [37] Y. TEISSEYRE et M. FARZANEH, "On the mechanisms of the ice accretion on H.V. conductors", *Elsevier Science Publisher B.V. Amsterdam*, no. 0165-232y/90, pp. 1-8, 1990.