

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Faculté de Technologie
Département de Génie Électrique
Laboratoire de Génie Électrique de Bejaia

Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique

Option : Réseaux Électrique

Thème

**Etude et caractérisation d'un
isolateur en porcelaine
superhydrophobe**

Présentés par :

OUAZAR Azouaou

ACHOURI Abdelmoumene

Encadré par : **Dr. ROUHA Nacera**

Co-encadré par : **Mme BOUZIDI**

Devant le jury :

Mm. BALHOUL

Mr. HARZIN

ANNEE : 2022/2023

Remerciement

Avant tout nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

*Ensuite, nous tenons à exprimer notre très grande considération et notre vive reconnaissance à notre promotrice **Mme N. ROUHA** pour avoir accepté d'encadrer notre travail que voici, de même que pour sa patience, ses précieux conseils, sa bienveillante disponibilité à nous orienter, ce qui nous a mené à l'aboutissement de ce travail.*

Qu'elle veuille bien accepter tous nos sentiments de gratitude et de respect.

Nous remercions de même les membres du Jury pour avoir concédé de passer en revue notre étude et se prononcer sur sa qualité éventuelle.

*Nous remercions aussi **Mme Bouzidi** pour ça généreuse aide.*

Nos remerciements s'adressent à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail également à :

***Mme (Moukhtari et Bradai), Mr (Suissi et Bouhali)** et pour le CRAPC Bejaia.*

Tous nos respects sont adressés à nos chers parents qui nous ont encouragé et soutenu beaucoup durant nos études.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

A Dieu le tout puissant, à qui je dois tout, et surtout d'avoir honoré et éclairé mon chemin par le savoir.

A ma mère qui a su être toujours à mes côtés dans la joie et la peine, ma mère, que Dieu te garde pour nous. A mon cher père, qui a été toujours mon appui moral, et qui n'a jamais arrêté de m'encourager et de m'aider dans ma vie et surtout dans mes études, que Dieu te garde pour nous.

« Mon père, ma mère merci pour tout »

A mes chères et adorable sœurs Magdoula et Kahina.

« Mon souhait est de les voir toujours heureuses et d'avoir une vie pleine de joie et de réussite ».

A toute ma famille, en particulier mes cousins et mes oncles.

A mes chers amis Abdalghani, Hanine, Célia, Yanis.

« Mon souhait est de les avoir réussis dans leurs vies ».

A toute la promotion master 2 Réseau électrique, à qui je souhaite un bon parcours professionnel.

A tous mes camarades de l'université que j'ai côtoyé tout au long de mon trajet.

Ouazar Azouaou

Dédicaces

A Dieu le tout puissant, à qui je dois tout, et surtout d'avoir honoré et éclairé mon chemin par le savoir.

A ma mère qui a su être toujours à mes côtés dans la joie et la peine, ma mère, que Dieu te garde pour nous. A mon cher père, qui a été toujours mon appui moral, et qui n'a jamais arrêté de m'encourager et de m'aider dans ma vie et surtout dans mes études, que Dieu te garde pour nous.

« Mon père, ma mère merci pour tout »

A mes chères et adorable sœurs Chahinase et Ratile .

Et mes Ferrare Lias et yaakoube.

« Mon souhait est de les voir toujours heureuses et d'avoir une vie pleine de joie et de réussite ».

A toute ma famille, en particulier mes cousins et mes oncles.

A mes chers amis ,Roni , Ninis, Zidane, Radouane , Ramzi, Yanis, Akram, Nesrine.

« Mon souhait est de les avoir réussis dans leurs vies ».

A toute la promotion master 2 Réseau électrique, à qui je souhaite un bon parcours professionnel.

A tous mes camarades de l'université que j'ai côtoyé tout au long de mon trajet.

Liste des tableaux

Tableau II-1 : corrélation entre IH et l'angle de contact θ	36
Tableau IV-1 : Angle de contact θ et indice d'hydrophobicité IH en fonction de l'angle de déclinaison α de la surface de l'échantillon de porcelaine, pour les différents volumes de la goutte d'eau mis en jeu dans le cas de l'état vierge de la surface propre de porcelaine sans suie.	58
Tableau IV-2 : angle de contact θ et indice d'hydrophobicité IH en fonction de l'angle de déclinaison α de la surface de l'échantillon de la porcelaine, pour les différents volumes de la goutte d'eau mis en jeu dans le cas de l'état vieilli de la surface propre de la porcelaine sans suie	59
Tableau IV-3 : Angle de contact θ et indice d'hydrophobicité IH en fonction de l'angle de déclinaison α de la surface de l'échantillon de porcelaine, pour les différents volumes de la goutte d'eau mis en jeu dans le cas de l'état vieilli de la surface de la porcelaine, pour les différents volumes de la goutte d'eau mis en jeu dans le cas de l'état vieilli de la surface de la porcelaine sans suie, sous pollution humide conductrice à $\sigma = 2\text{mS/cm}$	60
Tableau IV-4 : Angle de contact θ et indice d'hydrophobicité IH en fonction de l'angle de déclinaison α de la surface de l'échantillon de porcelaine, pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vieilli de la surface de la porcelaine sans suie, sous pollution humide conductrice à $\sigma = 5\text{mS/cm}$	61
Tableau IV-5 : Angle de contact θ et indice d'hydrophobicité IH en fonction de l'angle de déclinaison α , pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vierge de la surface de la porcelaine recouverte de suie.	62
Tableau IV-6 : Angle de contact θ et indice d'hydrophobicité IH en fonction de l'angle de déclinaison α , pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vieilli de la surface de la porcelaine recouverte de suie.	63
Tableau IV-7 : Angle de contact θ et indice d'hydrophobicité IH en fonction de l'angle de déclinaison α , pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vieilli sous pollution humide conductrice à $\sigma = 2\text{mS/cm}$, de la surface de la porcelaine recouverte de suie.	64
Tableau IV-8 : Angle de contact θ et indice d'hydrophobicité IH en fonction de l'angle de déclinaison α , pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vieilli sous pollution humide conductrice à $\sigma = 5\text{ mS/cm}$, de la surface de la porcelaine recouverte de suie.....	65
Tableau IV-9 : Angle de contact θ en fonction de l'angle déclinaison α pour un volume de la goutte de $2\ \mu\text{l}$	66
Tableau IV-10 : Angle de contact θ en fonction de l'angle déclinaison α pour un volume de la goutte de $4\ \mu\text{l}$	67
Tableau IV-11 : Angle de contact θ en fonction du volume de la goutte d'eau à $\alpha=0^\circ$	68
Tableau IV-12 : Angle de contact θ en fonction du volume de la goutte d'eau à la limite de α d'éjection (glissement de la goutte sur la surface de la porcelaine).....	68
Tableau IV-13 : Angle d'éviction de la goutte.	72
Tableau IV-14 : La rigidité diélectrique longitudinale E_l de la porcelaine.	73
Tableau IV-15 : Illustre la variation du facteur de perte $\text{tg}\delta$ et la capacité C_x de la porcelaine.	75
Tableau IV-16 : Permittivité électrique relative et indice de perte calculés.....	76
Tableau IV-17 : Composition chimiques des échantillons de porcelaine.....	77

Liste des figures

Figure I-1 Types de supports [2].	4
Figure I-2 Composants d'un pylône.	5
Figure I-3 Isolateur rigide.	6
Figure I-4 Principe d'un isolateur à long fût.	6
Figure I-5 Isolateur capot tige.	7
Figure I-6 isolateur en verre.	7
Figure I-7 Isolateur en silicone.	9
Figure I-8 isolateur en porcelaine.	10
Figure I-9 douille de lampes en porcelaine.	13
Figure I-10 Connecteur en porcelaine à haute fréquence.	14
Figure I-11 Représentation de l'angle de contact à l'équilibre.	15
Figure I-12 Les différents états de la mouillabilité.	16
Figure I-13 Comportement d'une goutte sur une surface [17].	16
Figure I-14 Représentation schématique de gouttes sur des surfaces rugueuses micrométriques, en état Wenzel (a) et en état Cassie-Baxter (b).	17
Figure II-1 La spectromètre infrarouge à transformée de Fourier.	27
Figure II-2 Circuit de mesure de la tension de contournement d'une surface isolante.	30
Figure II-3 Circuit de mesure de la tension de claquage d'un matériau isolant.	31
Figure II-4 Schéma de principe du pont de Schering.	32
Figure II-5 Principe du pont de Schering à transformateur différentiel.	34
Figure II-6 Méthode théorique de détermination de l'angle de contact θ .	34
Figure II-7 appareille de muser de l'angle de contact Figure II-8 La méthode de détermination de.	35
Figure III-1 la structure chimique de la porcelaine.	40
Figure III-2 La structure de la suie observée au microscope optique.	41
Figure III-3 Etapes essentielles de confection d'une surface en porcelaine superhydrophobe.	43
Figure III-4 Objet d'essai.	44
Figure III-5 Appareil de mesure d'angle de contact θ : Drop Shape Analyzer DSA30 KRÜSS Gmbh.	45

Figure III-6 la cage de faraday.....	47
Figure III-7 Photos des éléments du dispositif d'essais et de mesure de la haute tension du laboratoire HT G.E.Université de Bejaïa.	48
Figure III-8 porcelaine (a) : avant et (b) : pendant le passage de la décharge.....	48
Figure III-9 Conductimètre.....	49
Figure III-10 Pont de Schering.	49
Figure III-11 Mesure de l'angle de contact θ de l'échantillon au moyen de l'appareil Drop Shape Analyzer DSA30 KRÜSS GmbH.....	50
Figure III-12 Angle de contact de la goutte d'eau capturée par l'appareil Drop Shape Analyzer DSA30 KRÜSS GmbH.	51
Figure III-13 L'appareil d'analyse de FTIR.	52
Figure III-14 L'appareil d'analyse de la fluorescence de rayon X.	53
Figure III-15 L'appareil d'analyse de diffraction des rayons X.	54
Figure III-16 Représentation schématique du principe de la spectroscopie IR.	54
Figure III-17 apparie de photoluminescence.	55
Figure IV-1 Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vierge de la surface propre de porcelaine sans suie.	58
Figure IV-2 Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vieilli de la surface propre de porcelaine sans suie.	59
Figure IV-3 Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vieilli de la surface de la porcelaine sans suie, sous pollution humide conductrice à $\sigma = 2\text{mS/cm}$	60
Figure IV-4 Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vieilli de la surface de la porcelaine sans suie, sous pollution humide conductrice à $\sigma = 5\text{mS/cm}$	61
Figure IV-5 Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α , pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vierge de la surface de la porcelaine recouverte de suie.	62
Figure IV-6 Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α , pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vieilli de la surface de la porcelaine recouverte de suie.	63

Figure IV-7 Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α , pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vieilli sous pollution humide conductrice à $\sigma = 2\text{mS/cm}$, de la surface de la porcelaine recouverte de suie.....	64
Figure IV-8 Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α , pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vieilli sous pollution humide conductrice à $\sigma = 5\text{mS/cm}$, de la surface de la porcelaine recouverte de suie.....	65
Figure IV-9 angle de contact θ en fonction de l'angle déclinaison α pour un volume de la goutte de $2\mu\text{l}$	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV-10 angle de contact θ en fonction de l'angle déclinaison α pour un volume de la goutte de $4\mu\text{l}$	67
Figure IV-11 Histogramme de l'angle de contacte θ en fonction du volume de la goutte à $\alpha = 0^\circ$	68
Figure IV-12 Histogramme de l'angle de contacte θ en fonction du volume de la goutte à la limite de α d'éjection (glissement/roulement de la goutte sur la surface de la porcelaine).	69
Figure IV-13 Photos des gouttes d'eau sur un échantillon de porcelaine recouvert de suie... ..	70
Figure IV-14 photo prise par Drop Shape Analyzer DSA30 KRÜSS GmbH. Montrant la goutte qui s'étalée sur la porcelaine.	71
Figure IV-15 Histogramme de l'angle d'éviction de la goutte α (éviction) en fonction.	72
Figure IV-16 Histogramme de la rigidité diélectrique longitudinale E_l (kV/cm) de la porcelaine en fonction de l'état de surface de l'échantillon.....	74
Figure IV-17 Histogramme de la rigidité diélectrique longitudinale E_l (kV/cm) de porcelaine en fonction de la conductivité de la pollution ($\sigma = 2\text{mS}$ et $\sigma = 5\text{mS}$).....	74
Figure IV-18 Spectre FTIR des échantillons (vierge avec suie et vieilli avec suie, vieilli avec suie sous	78
Figure IV-19 Spectre FTIR des échantillons (vierge, vieilli à sac et vieilli sous pollution 5mS/cm).....	79
Figure IV-20 Diffractogramme des rayons X des différentes porcelaines.	81
Figure IV-21 Diffractogramme des rayons X des différentes porcelaines.	82
Figure IV-22 spectre d'analyse par photoluminescent.....	83

Liste des symboles et abréviations

a : Etat vierge de la surface propre de porcelaine sans suie.

b : Etat vieilli de la surface propre de porcelaine sans suie.

c : Etat vieilli de la surface polluée de porcelaine sans suie à $\sigma = 2\text{mS/cm}$.

C_x : La capacité de l'objet d'essai.

DSC : L'analyse calorimétrique différentielle.

DSA30 : L'appareil Drop Shape Analyzer.

DRX: L'analyse par diffraction aux rayons X.

D : Diamètre (cm).

D: Désigne la taille des cristallites en °A.

d : Etat vieilli de la surface polluée de porcelaine sans suie à $\sigma = 5\text{mS/cm}$.

d : Distance inter électrode.

d : Distance inter réticulaire, c'est -à -dire distance séparant deux plans consécutifs.

EPDM : Ethylène Propylène Diène Monomère.

E_d : La rigidité diélectrique (kV/cm).

E_p: Champ électrique propre (V/m).

E_e: Champ électrique extérieur (V/m).

E_l : La rigidité diélectrique longitudinale.

e : Etat de la surface propre (sans pollution humide) de porcelaine vierge recouvert de suie.

FTIR : L'analyse infrarouge à transformée de fourrier.

FRX : L'analyse par la fluorescence de rayon X

f : Etat de la surface propre (sans pollution humide) de porcelaine vieillie recouverte de suie.

f : La fréquence.

j : Etat de surface de porcelaine recouverte de suie et vieilli sous pollution humide à $\sigma = 2\text{mS/cm}$.

H : l'enthalpie lors du passage de l'état liquide à l'état solide.

HT : Haute Tension.

H : Humidité.

h :Etat de surface de porcelaine recouverte de suie et vieilli sous pollution humide à $\sigma = 5\text{mS/cm}$.

IH: L'indice d'hydrophobicité.

Lc : La ligne de contournement.

Lf : La ligne de fuite.

MT : Moyenne tension.

MEB : Microscopie électronique à balayage.

Oe: Objet d'essai.

P : La pression.

PDMS/CM : Poly-Di-Méthyle-Siloxane.

Rs: Résistance superficielle (Ω).

Rt: La résistance transversale (Ω)

Ri: Résistance d'isolement (Ω).

r : La rugosité.

r γ SV: Surfaces solide/vapeur.

r γ SL : Surfaces solide/liquide.

r : Le rayon de la gouttelette.

SG : Appareil de commande automatique et manuelle de la tension.

STA : L'analyseur thermique simultané.

TADP : Tension d'apparition des décharges partielle.

Tr : Transformateur haute tension.

T : La température.

Tg δ : Facteur de pertes.

U : Tension électrique à laquelle se produit une perforation (claquage).

V : Voltmètre de crête.

Z : Impédance (Ω).

ZN : Impédance de la capacité étalon de facteur de perte faible.

α : Angles de déclinaison.

γ ls : La tension superficielle entre le solide et le liquide.

γ lv : La tension superficielle entre le liquide et sa phase vapeur.

γ sv : La tension superficielle entre le solide et la vapeur.

ϵ_r : Permittivité relative.

δ : Angle de pertes.

η : Ordre de la réfraction.

θ : Angle de contact ($^\circ$).

*θ^** : L'angle apparent.

e: L'angle de Young.

θ : Angle de diffraction des rayons X sur la surface du matériau étudié.

θ : Position du pic de diffraction considéré.

λ : Longueur d'onde du faisceau de rayon X.

λ : Largeur à mi-hauteur exprimée en radiant.

μ l : Microlitre.

ρ t: La résistivité transversale.

ρ s: La résistivité superficielle.

σ : La conductivité

Table des matières

I.	Introduction générale	1
I.	Chapitre I : Etude Bibliographique	3
I.1	Introduction :	4
I.2	Les lignes électriques :	4
I.2.1	Les supports :	4
I.3	Isolateur :	5
I.4	Les différents types d'isolateurs :	5
I.4.1	Isolateur rigide :	5
I.4.2	Élément de chaine :	6
I.5	Matériaux utilisés pour les isolants solides :	7
I.5.1	Le verre :	7
I.5.2	La bakélite :	8
I.5.3	La Silicone :	9
I.5.4	La porcelaine :	10
I.6	Propriétés de la porcelaine :	10
I.6.1	Propriétés diélectriques :	10
I.6.2	Propriétés mécaniques :	11
I.6.3	Propriétés thermiques :	12
I.7	Différentes familles de porcelaine :	12
I.7.1	Porcelaine dure :	12
I.7.2	Porcelaine tendre :	12
I.7.3	Porcelaine alumineuse :	12
I.8	Domaines électriques d'application de la porcelaine :	12
I.8.1	Applications aux basses fréquences :	13
I.8.2	Applications hautes fréquences :	13
I.9	Super hydrophobicité :	14
I.9.1	Propriétés super hydrophobe	14
I.9.2	Modèles de surfaces super-hydrophobes :	16
I.9.3	Techniques de préparation de surfaces super-hydrophobes :	18
I.9.4	Domaines Applications :	18
I.10	Le vieillissement :	19

I.11	Le vieillissement physique :	19
I.11.1	Le vieillissement chimique :	19
I.11.2	Vieillessement électrique :	20
I.11.3	Vieillessement accéléré :	21
I.12	La pollution :	22
I.12.1	Salinité :	22
I.12.2	Couche de pollution :	22
I.12.3	Degré de pollution :	22
I.13	Différentes sources de pollution :	22
I.13.1	Pollution naturelle :	22
I.13.2	Pollution industrielle :	23
I.13.3	Pollution mixte :	23
I.14	Facteurs climatiques d'influence sur la pollution [1] :	23
I.15	Techniques de lutte contre la pollution :	24
I.16	Conclusion :	24
II.	Chapitre 2 : Méthode Diagnostic	25
II.1	Introduction	26
II.2	Méthodes de diagnostic des matériaux diélectriques	26
II.2.1	Caractérisations chimiques	26
II.2.2	Caractérisations électriques	29
II.3	La méthode théorique et pratique de détermination de l'angle de contact θ et l'indice d'hydrophobicité (IH)	34
II.4	Indice d'hydrophobicité (IH) :	35
II.5	Conclusion	36
III.	Chapitre 3 : protocole expérimentale	37
III.1	Introduction	38
III.2	Matériau porcelaine	38
III.2.1	La structure chimique de la porcelaine	39
III.3	La structure de la suie	40
III.4	Modèle expérimentale	41
III.4.1	Préparation de la surface superhydrophobe	42
III.4.2	Protocole expérimental	43
III.5	Objets d'essais	44
III.6	Modes opératoires	46

III.6.1	Mesure de la rigidité diélectrique longitudinale.....	46
III.6.2	Essais de vieillissement électrique	46
III.6.3	La préparation de la solution polluante conductrice.....	48
III.6.4	Mesure de la capacité Cx et du facteur de perte tgδ.....	49
III.6.5	Mesure de l'angle de contact.....	50
III.6.6	Analyses chimiques	51
III.7	Conclusion :	55
IV.	Chapitre 04 : présentation et discussion des résultats	56
IV.1	Introduction :.....	57
IV.2	Mesure de l'angle de contact de la goutte d'eau et de l'indice d'hydrophobicité de la surface de la plaque de porcelaine :.....	57
IV.3	présentation, interprétation et discussion des résultats d'essais électriques.....	73
IV.3.1	Mesure de la rigidité diélectrique longitudinale.....	73
IV.3.2	Mesure du facteur de perte et de la capacité du matériau	75
IV.3.3	Calcul de la permittivité électrique ϵ_r et de l'indice de perte $\epsilon_r.tg\delta$	76
IV.4	Présentation et discussion des résultats des analyses chimiques	77
IV.4.1	Analyse par fluorescence des rayons X (FRX).....	77
IV.4.2	Analyse par spectroscopie infrarouge a transformé de Fourier (IRTF)	78
IV.4.3	Analyse par diffractogramme des rayons X des différentes porcelaines	81
IV.4.4	Analyse par photoluminescent des différentes porcelaines	82
IV.5	Conclusion	84
V.	Conclusion générale	88
VI.	Bibliographe	90

Introduction générale

I. Introduction générale

Divers facteurs environnementaux peuvent souvent affecter la capacité d'isolation des isolateurs aériens. Parmi ces facteurs, la pollution atmosphérique joue un rôle significatif. Lorsque la couche de pollution s'accumule sur les surfaces isolantes, son humidification favorise l'apparition de décharges électriques série et parallèle. Cependant, le passage du courant électrique à travers l'isolation contribue à dessécher cette couche polluante. Par conséquent, les surfaces isolantes sont contournées, ce qui entraîne des pannes dans les réseaux de transport d'énergie électrique.

Les isolateurs en porcelaine sont des composants essentiels dans les réseaux de transmission d'énergie électrique. Ils sont utilisés pour soutenir et isoler les lignes électriques afin d'assurer un transfert efficace de l'électricité. Cependant, ces isolateurs sont souvent exposés à des conditions environnementales difficiles, telles que la pluie, l'humidité et la pollution atmosphérique, qui peuvent affecter leur performance et leur durabilité.

En vue de mieux comprendre le comportement des surfaces des isolateurs sous les contraintes de service, nous nous intéressons, dans le cadre de cette étude, à la caractérisation physico-chimique des isolateurs en porcelaine dotés de surfaces super hydrophobes. Pour ce faire, nous exploiterons les résultats de recherche obtenus les plus récents et les techniques de caractérisation les plus couramment utilisées, dans la perspective d'améliorer la conception de ces isolateurs et relever un des défis restants.

Notre objectif est de déterminer l'angle de déclinaison optimal qui permettrait de corriger le profil de l'isolateur à surface superhydrophile ou superhydrophobe. A cet effet, nous avons analysé l'effet du vieillissement et de la pollution sur l'angle de déclinaison des surfaces superhydrophiles et superhydrophobes du matériau en porcelaine, et réalisé des mesures physiques et des analyses chimiques en vue d'établir des corrélations et renforcer nos conclusions.

Notre travail est scindé sur quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons les différentes définitions liées aux matériaux isolants, leurs propriétés et en particulier à la superhydrophobie et son application dans la technologie des isolateurs électriques.

Introduction générale

Dans le deuxième chapitre, nous exposons en détail les méthodes que nous avons utilisées pour effectuer un diagnostic physico-chimique des matériaux diélectriques. Parmi ces méthodes, nous avons mis en pratique l'analyse infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), la spectrométrie par fluorescence des rayons X (FRX), la photoluminescence et l'analyse par diffraction des rayons X (DRX). Nous présentons également les mesures physiques et électriques que nous avons réalisées, soient la mesure de la rigidité diélectrique longitudinale (El), la mesure du facteur de perte ($\text{tg}\delta$) et de la capacité (Cx), ainsi que la mesure de l'angle de contact (θ).

Le troisième chapitre est consacré à l'étude expérimentale visant à examiner les changements d'hydrophobie des isolateurs en porcelaine recouverts ou non de suie et vieillis électriquement à sec ou sous pollution humide conductrice, en fonction de l'angle de déclinaison du plan de surface de l'isolateur. Nous y présentons l'étude menée sur l'influence de certains paramètres physiques sur la perte partielle ou totale de l'hydrophobie, tels que le volume des gouttelettes d'eau déposées sur la surface superhydrophile et superhydrophobe, la conductivité électrique de ces gouttelettes, ainsi que les différentes conditions de surface du matériau (vierge, vieilli, pollué avec des solutions conductrices de 2 mS/cm et 5 mS/cm), qui sera complétée par une caractérisation physico-chimique des surfaces étudiées.

Les résultats de nos travaux seront exposés, interprétés et discutés dans le quatrième chapitre. Nous terminerons ce travail par une conclusion générale

I. Chapitre I : Etude Bibliographique

I.1 Introduction :

L'isolation électrique est un élément critique dans les appareils fonctionnant à haute tension, en particulier les lignes électriques aériennes haute tension, car leur efficacité est liée à la pollution et au vieillissement des matériaux isolants utilisés.

Il sera question dans ce chapitre de faire connaissance avec certains matériaux du domaine de la haute tension, en particulier ceux utilisés dans la fabrication des isolateurs de traversée en HT. Nous présenterons des définitions liées aux matériaux isolants, leurs propriétés, les facteurs de dégradation à l'exemple du vieillissement en présence de pollution, tout en rapportant quelques techniques de lutte contre cette dernière, comme nous parlerons de l'importance de l'état de surface de ces matériaux, notamment des surfaces superhydrophobe.

I.2 Les lignes électriques :

Les lignes aériennes sont généralement constituées de conducteurs nus, accrochés sur des supports (pylônes ou poteaux) par des chaînes d'isolateurs [1].

I.2.1 Les supports :

Ceux sont des structures en métal ou en béton qui sont utilisées pour suspendre les conducteurs électriques au-dessus du sol. Ils sont conçus pour supporter le poids des conducteurs et des charges externes, ainsi que pour maintenir les uns des autres et à une hauteur appropriée au-dessus du sol. Ils sont de silhouettes : Pylône classique, Pylône haubané en V ou Pylône Mae West (figure I.1).



a) Pylône classique



b) Pylône haubané en V



c) Pylône Mae West

Figure I-1 Types de supports [2].

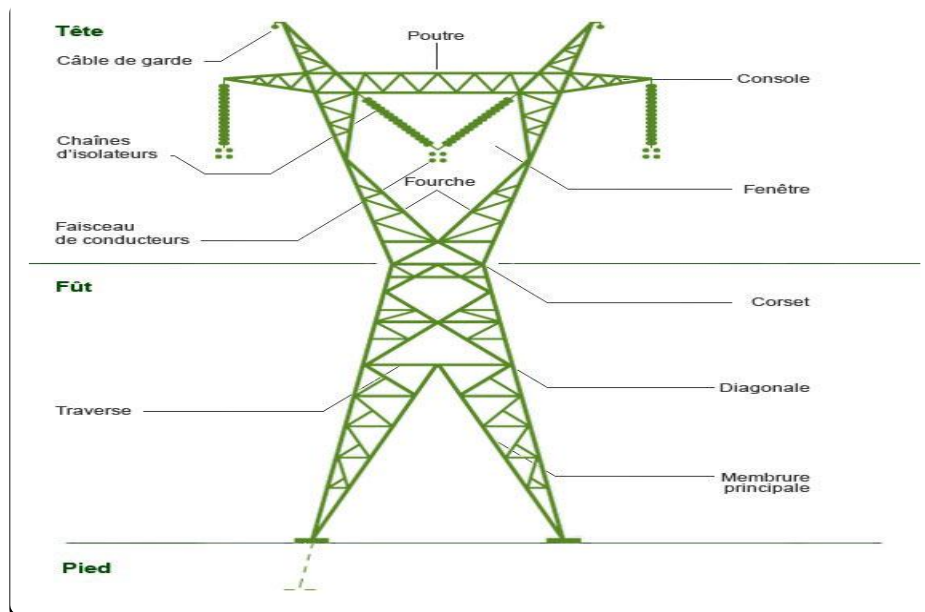


Figure I-2 Composants d'un pylône.

I.3 Isolateur :

Un isolateur est utilisé pour isoler deux matériaux sous des tensions différentes afin d'éviter les court-circuit et les pertes de courant. Un isolant est un matériau solide, liquide ou gazeux qui présente une résistance élevée au passage du courant électrique et une conductivité électrique presque nulle.

Les isolateurs des lignes aériennes, quant à eux, sont constitués de matériaux isolant solides et ont pour rôle d'isoler électriquement les lignes de transport d'énergie électrique des pylônes mis à la terre, et de soutenir les mêmes lignes en résistant aux différentes contraintes mécaniques dues surtout au poids de la ligne.

I.4 Les différents types d'isolateurs :

I.4.1 Isolateur rigide :

Un isolateur rigide (figure I-3) est relié au support par une ferrure fixe. Cet isolateur est principalement soumis à des efforts de flexion et de compression, lorsqu'il est placé en position verticale. Dans certains cas, il peut être placé horizontalement, voir à l'oblique. Les plus répandus sont :

Les isolateurs rigides normalisés en céramique (normes NF C 66-233 et NF C 66-234).

Les isolateurs rigides normalisés en verre (normes NF C 66-233 et NF C 66-234) [3].



Figure I-3 Isolateur rigide.

I.4.2 Élément de chaîne :

Il est fabriqué en matériau isolant et des pièces métalliques. Les isolateurs sont connectés entre deux pour ajouter de la flexibilité à la chaîne d'isolateurs. Cette dernière est soit suspendues au mât vertical (chaîne d'alignement) ou horizontal (chaîne d'ancrage) [4].

a. Isolateur long fût :

Il se compose d'une tige cylindrique solide en céramique, en porcelaine ou en tout autre matériau artificiel isolant. L'isolation en tube long en silicone est utilisée depuis plus de 40 ans en raison de sa haute résistance aux intempéries et à l'érosion [3].

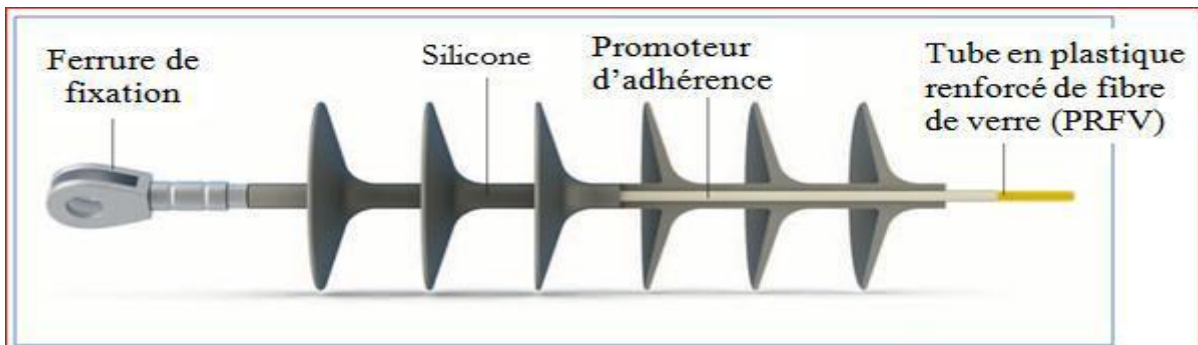
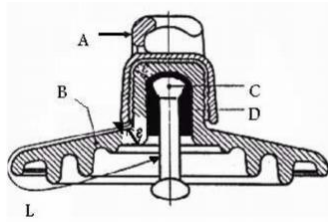


Figure I-4 Principe d'un isolateur à long fût.

b. Les isolateurs à capot et tige :

Le couvercle et la tige sont constitués d'un isolateur soutenu par une tige en acier à tête conique scellée par un isolateur en verre ou en porcelaine. L'extrémité supérieure de l'isolateur a un couvercle en fer malléable scellé avec un trou à travers lequel l'extrémité inférieure de la tige peut être insérée, assurant une étanchéité du couvercle contre les éléments de la chaîne de la tige. Le bas de la tige de l'élément supérieur est Bétonné avec le ciment pour enfoncer l'élément inférieur [5].



A : le capot.
 B : le diélectrique (verre trempé ou céramique).
 D : le ciment de fixation.
 C : la tige.
 L : Plus courte distance dans l'air entre le capot et la tige.
 ϵ : Longueur du canal de perforation, $\epsilon \ll L/2$.



Figure I-5 Isolateur capot tige.

I.5 Matériaux utilisés pour les isolants solides :

Les matériaux isolants solides les plus utilisés pour la fabrication des isolateurs sont essentiellement le verre, la bakélite, la silicone et la porcelaine.

I.5.1 Le verre :

Pour créer du verre, une combinaison de sable, de chaux et de carbonate de sodium est fondue dans des creusets chauffés à 900 °C. Le liquide résultant peu fluctuant, est ensuite versé dans des moules en acier avec des intérieurs creux imitant la forme des isolants souhaités. En termes de composition chimique, le verre comprend du silicate alcalin et du calcium ou du plomb. Les isolateurs en verre, bien que moins chers que leurs homologues en porcelaine, sont également plus délicats et donc limités à une utilisation jusqu'à 30 kV. A une température comprise entre 100 et 400°C, le matériau autrefois rigide devient plus souple, perdant sa résistance initiale de 50 à 100 kV/mm. De plus, sa permittivité relative varie de 5 à 8. A une température de 20°C, sa résistivité varie de 10^{10} à $10^{16} \Omega$, et son facteur de perte est $\text{tg } \delta = 8 \times 10^{-5}$. [6]



Figure I-6 isolateur en verre.

Dans l'industrie électrique, il existe plusieurs principaux types de verres utilisés, notamment :

a. Le verre trempé :

Pour améliorer les propriétés mécaniques et la résistance aux chocs thermiques du verre, une méthode de traitement efficace consiste à chauffer la pièce à une température juste en dessous de son point de ramollissement de 100°C , puis à la refroidir rapidement avec des jets d'air froid sous pression. Ce procédé permet d'obtenir un verre 5 à 6 fois plus résistant à la traction que le verre recuit et capable de supporter des changements brusques de température jusqu'à 100°C .

Le verre trempé offre un avantage distinct en rendant visible tout isolant perforé. A l'inverse, les isolateurs équipés d'un capuchon et d'une tige en Céramique ne permette pas une telle visibilité, notamment sous la contrainte électrique excessives ou en cas de défaillance de l'isolateur.

b. Le verre recuit :

Initialement, l'application principale de cette substance était de créer des isolants rigides. Cependant, un examen plus approfondi a révélé que les isolateurs d'épaisseur modérée n'étaient pas équipés pour faire face à des changements brusques de température. De plus, le verre recuit ne résiste pas aux contraintes mécaniques élevées, ce qui le rend inadéquat pour les isolateurs de suspension. Le verre de sodium est également référencé.

I.5.2 La bakélite :

Il existe trois types de bakélite, chacun étant produit à des températures différentes.

- La bakélite A : est produite à une température modérée de 50°C , et se présente sous la forme d'une résine jaunâtre qui fond facilement et qui peut être dissoute dans l'alcool méthylique.
- La bakélite B : est obtenue à une température plus élevée de 110°C et se présente sous la forme d'un solide friable qui ne peut pas être dissout dans les solvants usuels.
- La bakélite C : est produite à une température encore plus élevée de 180°C et se présente sous la forme d'un matériau insoluble et dur qui peut résister à des températures allant jusqu'à 300°C sans se décomposer. Elle est également résistante à l'oxygène, l'ozone et aux acides usuels [7].

I.5.3 La Silicone :

Les silicones sont une classe de substances relativement nouvelles qui ressemblent aux résines synthétiques, mais qui sont composées de molécules ayant peu ou pas de carbone. Ces matériaux ne sont pas inflammables et sont produits en de nombreuses variantes avec des propriétés très diverses, telles que des huiles, des vernis, des graisses et du caoutchouc. Les silicones sont capables de résister à des températures allant jusqu'à 200°C sans durcir ni se décomposer, et conservent leurs propriétés sur une large plage de températures allant de -40 à 200°C :

- Rigidité diélectrique 15 kV/mm.
- Permittivité relative à 25 °C et 1 KV est de 5,4.
- Facteur de dissipation diélectrique à 25 °C et 10 kHz ; $\text{tg}\delta = 4 \text{ à } 5 \cdot 10^{-3}$.
- Conductivité thermique : 0,41 à 0, 62.....W/m.K.
- Température d'auto-inflammations est supérieure à 300°C.
- Masse volumique de 2300 à 2800 kg/m³ [1].



Figure I-7 Isolateur en silicone.

I.5.4 La porcelaine :

La porcelaine est composée de kaolin et de quartz de la plus haute qualité, qui sera cuit chauffé à 1400°C, recouvert d'émail au silicate et cuit au four pour obtenir une glaçure à chaud qui le rend imperméable [8]. Les propriétés électriques mécaniques et thermiques sont :

- Rigidité diélectrique élevée, 25 à 35 kV/mm.
- Permittivité relative $\epsilon_r = 6$ à 7.
- Grande résistivité, environ $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ à 20°C.
- Faibles pertes électriques en basse fréquence et en haute tension.
- Résistance mécanique 2500 à 4000 N/mm.



Figure I-8 isolateur en porcelaine.

I.6 Propriétés de la porcelaine :

La différence entre la porcelaine et d'autre céramique est sa blancheur, sa cuisson, son imperméabilité, et sa résistance aux chocs thermiques, mécanique et électrique.

I.6.1 Propriétés diélectriques :

Bien que les matériaux céramiques soient utilisées à des niveaux élevés de tension sous diverses contraintes, on peut cependant montrer qu'ils sont limités par un phénomène communément appelé claquage diélectrique, entraînant une dégradation du matériau (Perforé, fondu, fissuré) et perd alors ses propriétés isolantes. Ce phénomène peut être attribué à l'instabilité de la charge d'espace.

En effet, lorsqu'une charge est injectée dans un isolant (par rayonnement électronique, en appliquant une tension entre deux électrodes, etc.), celles-ci et celles générées (en créant des paires électron-trou) s'accumulent dans le matériau, ce qui entraîne la polarisation locale et la déformation du réseau accompagnées d'accumulation d'énergie importante. L'instabilité soudaine de ces charges ou toute perturbation (électrique, mécanique, thermique) provoquera un déclenchement brutal de l'énergie stockée par le réseau, conduisant à la fusion et à la sublimation locales du matériau.

La capacité d'un matériau à résister à la rupture diélectrique est étroitement liée à ses performances et aux propriétés de transport et de piégeage des charges en fonction de la microstructure des matériaux tels que rapporté par J. LIEBAULT, X. MEYZA et M. TOUZIN [9].

Trois propriétés diélectriques pertinentes décident des applications possibles d'un matériau, à savoir la permittivité relative, la capacité et les pertes diélectriques dont l'origine est due à la polarisation dans les matériaux diélectriques et auxquelles s'ajoute le courant de conduction dans les isolants à champ électrique important.

I.6.2 Propriétés mécaniques :

La température et l'environnement jouent un rôle majeur dans le comportement mécanique des céramiques. Par conséquent, à basse ou en moyenne température, la céramique se caractérise principalement par des déformations élastiques, une rupture fragile commence en premier causé par la propagation soudaine des défauts (microfissures ou défauts microstructuraux) [9]. Selon E. Carlstrom et R. Carlsson [10], le défaut initial de la fracture est dû aux grains de quartz généralement utilisés pour la porcelaine et la porosité à faible teneur en alumine pour la porcelaine à haute teneur en alumine. Mais selon PW Olupot et al [11], la réduction du quartz à des températures supérieures (>1250 °C) réduit la résistance et la phase vitreuse mécanique est augmentée. Selon P. Ramaswamy et al [12], pour assurer une bonne résistance à la diffusion de défaut, la teneur en α -quartz doit être minimisée, de sorte que les impuretés telles que l'oxyde de fer, soit inférieur à 1%. Igor Stubna et al [13] ont montré que les microfissures sont dépendantes de la transformation soumis à un cycle thermique de pose du quartz (ébullition et refroidissement).

I.6.3 Propriétés thermiques :

Les céramiques sont essentiellement connues pour leurs propriétés réfractaires, c'est-à-dire leur bon comportement à des températures élevées, sa conductivité thermique c'est-à-dire la propriété de la porcelaine à transmettre un flux de chaleur sur la surface et la dilatation c'est l'amplitude des vibrations atomique de la structure qui augment sous l'effet de la température [14].

I.7 Différentes familles de porcelaine :**I.7.1 Porcelaine dure :**

Fabriqué en Chine au 3ème siècle après J.-C., elle consiste en un mélange de sons blanc ou kaolin, de feldspath ou pétunsé (alumine et silicate de potassium) et de quartz. Après préparation, la pâte est maintenue à basse température (800-1050°C).

Ce processus s'appelle l'étirage. La pâte est ensuite recouverte de feldspath et cuite à haute température (1250-1450°C). La pâte se vitrifie, devient blanche et translucide.

I.7.2 Porcelaine tendre :

Il contient une quantité de (15 à 20%) de quartz et une quantité plus grande de feldspath (25 à 35%), et cuit à une température entre 1170 à 1270 °C [4].

I.7.3 Porcelaine alumineuse :

Elle est conçue par le remplacement du quartz par l'alumine dans le but d'avoir une porcelaine à haute résistance mécanique, et pour avoir une porcelaine à faible perte diélectrique on remplace les feldspathiques alcalines par des carbonates ou silicates (alcalino-terreux) pour diminuer le facteur de perte diélectrique [4].

I.8 Domaines électriques d'application de la porcelaine :

La porcelaine électrique est utilisée pour la fabrication d'isolateurs destinés aux installations de basse tension et aux lignes de communication. Elle est également utilisée pour la production de divers articles pour les installations électriques, tels que des supports de fusible et des prises de courant.

Cependant, le domaine d'application principal de la porcelaine électrotechnique est la fabrication d'isolateurs pour haute tension, comprenant des isolateurs rigides, des isolateurs à suspension, des supports, des supports rigides, ainsi que des isolateurs de traversée pour des tensions très élevées, de 500 000 volts et plus.

I.8.1 Applications aux basses fréquences :

Les isolateurs pour courant continu ou basse fréquence doivent avoir une résistivité électrique élevée, une bonne résistance thermique et un faible coefficient de dilatation ; il y a donc suffisamment de résistance aux chocs thermiques. La porosité doit être très faible.

Une vitrification parfaite est nécessaire pour éviter l'absorption d'eau et améliorer la résistance mécanique. Cet isolant est utilisé dans tous les systèmes de construction, les transmissions, dans les équipements électriques (interrupteurs et coffrets) et dans la fabrication de bougies d'allumage (oxyde d'aluminium) pour moteurs à essence et de résistances pour fours électriques (Fig. 7.a, Fig.8.b). Les isolateurs en porcelaine sont également utilisés dans les lignes de transmission basse ou haute tension pour voies ferrées et poteaux isolants [15].



Figure I-9 douille de lampes en porcelaine.

I.8.2 Applications hautes fréquences :

Outre les caractéristiques des isolateurs basse fréquence, les isolateurs pour les hautes fréquences, doivent avoir une constante diélectrique (ϵ_r), pas trop grande si possible, un angle de pertes diélectriques élevés et faibles ($\tan \delta$). La porcelaine électrique est différente de la porcelaine ordinaire avec une teneur en feldspath légèrement plus élevée, qui améliore la constante diélectrique.

Les super céramiques se caractérisent par des pertes diélectriques réduites, ce qui permet de les utiliser à des fréquences élevées. On utilise l'alumine dense de super pureté cuit à des températures plus de 1600 c° jusqu'à vitrification [15].



Figure I-10 Connecteur en porcelaine à haute fréquence.

I.9 Super hydrophobicité :

Les matériaux super hydrophobes sont une classe de matériaux hydrophobes dont l'angle de contact est supérieur à 150° [16]. On dit que la surface est super hydrophobe si et seulement si une goutte d'eau posée sur la surface atteint un angle de contact d'au moins 150° .

Pour ce faire, la surface doit avoir deux caractéristiques : la première est que le matériau soit de surface non polaire et la seconde est que sa texture de surface réponde au modèle de Cassie [17].

I.9.1 Propriétés super hydrophobe

a. Définition de la mouillabilité [18]

La mouillabilité caractérise la facilité avec laquelle une goutte de liquide s'étale au-dessus d'une surface solide. Elle dépend de l'angle de contact formé par le dépôt d'une goutte d'eau sur ce dernier.

Lorsqu'une goutte de liquide tombe sur une surface solide parfaitement lisse, d'un point de vue chimique, cette goutte est horizontale et en équilibre spécial (généralement sphérique) défini par l'angle de contact θ qui caractérise l'interaction entre les liquides et les solides (Figure I-11).

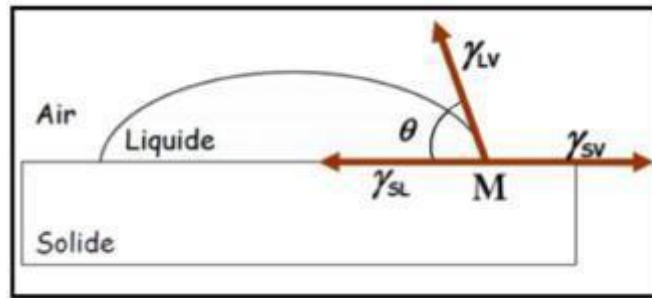


Figure I-11 Représentation de l'angle de contact à l'équilibre.

L'équilibre thermodynamique du point M sur la ligne triplet solide-liquide-gaz est exprimé par l'équation de Young (Equation I.12) liée à l'énergie de surface.

$$\cos \theta_e = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (\text{I.1})$$

- γ_{SV} : est la tension superficielle solide-vapeur (Nm^{-1}).
- γ_{SL} : est la tension superficielle solide-liquide (Nm^{-1}).
- γ_{LV} : est la tension superficielle liquide-vapeur (Nm^{-1}).

L'équation de Young n'est applicable qu'aux cas de surfaces totalement lisse, non poreuse ou rugueuse et complètement uniforme.

On définit la mouillabilité d'un matériau par l'angle de contact entre le matériau avec une goutte d'eau. Lorsque cet angle est supérieur à 90° , la surface est hydrophobe, et lorsqu'elle est inférieure à 90° , la surface est hydrophile.

Ainsi, on voit l'eau s'étaler sur une surface hydrophile et conserver sa forme plus sphérique sur les surfaces hydrophobes.

Au-dessus de 150° , la surface est dite super-hydrophobe. La figure (I.12) donne une vue d'ensemble des contours d'une goutte d'eau sur différents substrats solides.

$\theta < 90^\circ$: hydrophile, $\theta > 90^\circ$: hydrophobe, $\theta > 150^\circ$: superhydrophobe

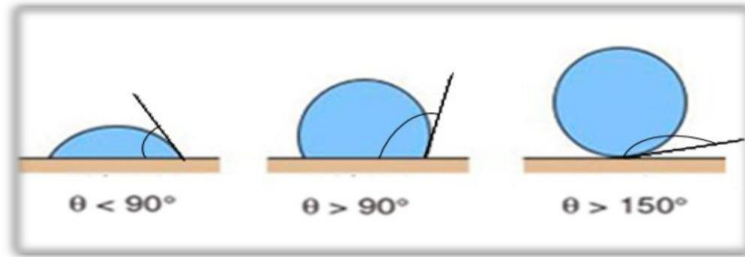


Figure I-12 Les différents états de la mouillabilité.

Non mouillabilité :

Fait référence à la propriété selon laquelle la surface du matériau ne se mouille pas, c'est-à-dire sa capacité à former des liaisons hydrogénées avec les gouttelettes d'eau, c'est ce qui évite de s'étaler sur la surface [19].

b. Angle de contact :

On appelle angle de contact θ l'angle que fait la goutte d'eau avec la surface sur laquelle elle est versée. Sa valeur varie de 0 à 180° selon la nature de la surface de contact (super-hydrophile, hydrophile, hydrophobe, super-hydrophobe) (Fig. I.13) [16].

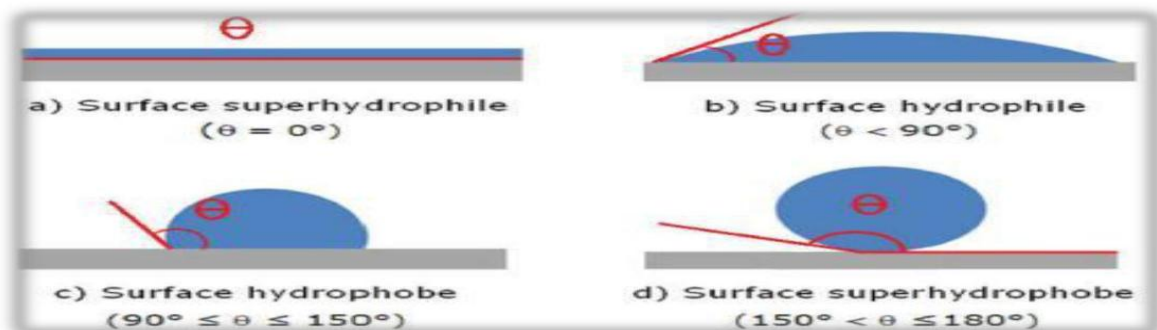


Figure I-13 Comportement d'une goutte sur une surface [17].

I.9.2 Modèles de surfaces super-hydrophobes :

Selon la littérature, il existe deux modèles pour décrire l'effet de la morphologie des surfaces texturées lorsqu'elles sont mouillées. Par exemple, le modèle de Wenzel considérant les surfaces rugueuses pénétrées par des liquides et le modèle de Cassie-Baxter simule le mouillage d'un substrat rugueux lorsque le liquide ne pénètre pas la rugosité.

Le modèle de Wenzel est le plus couramment utilisé dans le cas de surfaces texturées physiquement, et pour les surfaces texturées chimiquement de Cassie-Baxter. Parfois ces deux modèles sont combinés dans le cas des surfaces composites [20,21].

a. Selon Wenzel (1936) :

La goutte déposée est supposée correspondre à la rugosité du solide (Figure I-14). Cela signifie que nous considérons les énergies mise en jeu pour les surfaces solide/vapeur et solide/liquide sont $g\gamma_{SV}$ et $g\gamma_{SL}$, en notant g la rugosité, rapport de la surface réelle du matériau sur sa surface apparente ($g > 1$). Nous concluons que l'angle apparent θ^* de la goutte est exprimé par Fonction d'angle de Young θ_e (Équation I.2).

La relation de Wenzel est la suivante [20] :

$$\cos \theta^* = r \cos \theta \quad (I.2)$$

r : La rugosité ($r > 1$) ;

θ : Angle de contact sans la rugosité;

θ^* : l'angle de contact avec la rugosité;

b. Selon Cassie (1944) :

Les liquides peuvent ne pas être compatibles avec les solides avec lesquels ils n'ont aucune affinité. Au lieu de cela, ils reposent sur un bord rugueux et permettent à l'air de s'échapper en dessous. Considérant le cas simple d'une structure dentelée, le fond d'une telle gouttelette entre en contact avec le solide au niveau de la partie φ_s occupée par le sommet dentelé de la surface, et l'air au niveau de sa partie $(1 - \varphi_s)$. Les angles sur ces deux milieux sont θ et 180° , et l'angle observé est la moyenne de ces deux valeurs, qui est déduite de la relation de Young, en prenant le cosinus de ces angles disponibles) [21] :

$$\cos \theta^* = \varphi_s \cos \theta_e - (1 - \varphi_s) \quad (I.3)$$

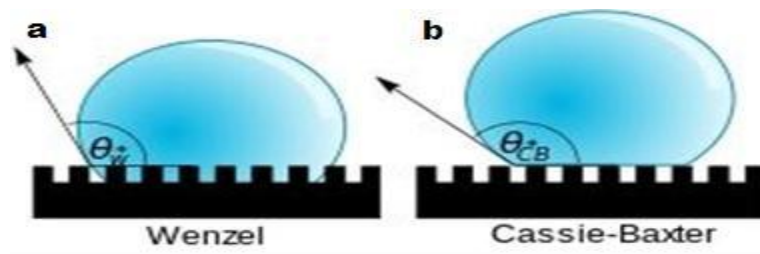


Figure I-14 Représentation schématique de gouttes sur des surfaces rugueuses micrométriques, en état Wenzel (a) et en état Cassie-Baxter (b).

I.9.3 Techniques de préparation de surfaces super-hydrophobes :

Les chercheurs ont utilisé plusieurs méthodes pour rendre les surfaces super-hydrophobes :

a. Dépôt électrochimique :

La méthode consiste à déposer deux substrats dans un liquide, l'un considéré comme anode, tandis que l'autre sert de cathode. Certains composés sont déposés dans les surfaces, leurs propriétés et leurs formes dépendent du substrat (anode ou cathode) [22].

b. Dépôt par vapeur chimique :

Le processus de cette technique consiste à exposer le substrat à une vapeur chimique certains dépôts souhaités sont produits qui se décomposent ou réagissent sur la surface. C'est méthode assez coûteuse car elle nécessite le contrôle de la pression et de la température [23].

c. Techniques utilisant le plasma :

Le plasma peut être utilisé comme technique de dépôt (ions dans un bain de vapeur chimique où les ions sont déposés sur une surface) ou pour détruire des matériaux. Ce dernier est souvent utilisé dans le nano-usinage de surface [24].

d. Photolithographie :

Ce procédé permet d'obtenir une topographie continue. Il comprend le revêtement de la surface d'un photorésistant ou d'un film polymère, qui est ensuite irradiée avec un faisceau de lumière source lumineuse de haute précision. Cette approche est utilisée en électronique [25].

I.9.4 Domaines Applications :

C'est attribué à plusieurs applications. Nous en avons choisi trois principaux : autonettoyant, antibuée, anti-pluie. Tous trois sont issus de propriété vue auparavant : extrême fluidité de l'eau [26,27].

a. L'antibuée :

La buée est une accumulation de minuscules gouttelettes d'eau, d'une taille de 1 à 10 micromètres, soit un millionième à un milliardième de gouttelettes, formées par condensation. L'effet antibuée d'une surface hydrophobe s'explique par la structure de sa surface, qui se compose de milliers de stries, et l'énergie de surface générée lorsque deux gouttelettes d'eau entrent en contact pour former une gouttelette. Les verres antibuée sont utilisés dans notre vie quotidienne. Une fine couche de produit hydrophobe est appliquée sur la lentille pour éviter la sédimentation des gouttelettes d'eau, d'où pas de buée.

b. L'anti pluie :

Une autre application des surfaces super hydrophobes et hydrophobes est de repousser la pluie. En fait, la taille des gouttelettes est de 1 à 2 mm, ce qui est supérieur à la rugosité de la surface. En conséquence, les gouttes de pluie ne pénètrent pas et la surface ne se mouille pas.

Cette application verra peut-être le jour dans les routes. Ces dernières resteront toujours sèches et le véhicule ne glisserait jamais, ce qui réduirait considérablement le nombre de tués sur ces routes.

c. L'autonettoyant :

Les surfaces super- hydrophobe non permet pas à la goutte d'eau de s'étale à leur la goutte reste mobile. Sa permet l'éjection de la goutte d'eau, avec les grandes quantités de l'eau les saletés présentées sur la surface et emporté. Et ce présente dans la nature par des fortes pluies sur les surfaces superhydrophobe que ce soit de porcelaine, de verre...ect.

I.10 Le vieillissement :**I.11 Le vieillissement physique :**

Il se présente sous de nombreuses formes et survient avec ou sans transfert de matériau. Peut être évalué en mesurant la résistance mécanique et la résistance à la fatigue du matériau. Des tests de flexion, de traction et de compression peuvent être effectués pour déterminer la résistance mécanique de l'isolateur. Des tests de fatigue peuvent également être effectués pour simuler les contraintes cycliques auxquelles l'isolateur pourrait être soumis pendant sa durée de vie [18].

I.11.1 Le vieillissement chimique :

Il se présente par les phénomènes d'oxydation, hydrolyse ou la diffusion qui provoque un changement de la composition chimique du revêtement. Le vieillissement chimique de revêtement à base des polymères est influencé par la composition chimique, le poids moléculaire, la structure et la conformation du polymère, l'épaisseur et ses conditions (présence d'ion, température, pH).

Pour évalue la durabilité de revêtement super hydrophobe il existe plusieurs tests de vieillissement [28] : ces tests impliquent l'exposition des échantillons de revêtement à des produits chimiques tels que des acides, des alcalis et des solvants organiques pour simuler les conditions environnementales auxquelles l'isolateur pourrait être exposé pendant sa durée de

vie. Les propriétés sont mesurées avant et après les tests pour évaluer l'efficacité du revêtement dans des conditions réelles.

I.11.2 Vieillessement électrique :

1. Généralités :

Plusieurs modes de vieillissement se produisent sous la contrainte induite par le champ électrique ; il existe deux types de vieillissement : le vieillissement intrinsèque, avec injection de charge et déplacement ainsi que l'existence de dipôles permanents, et le vieillissement extrinsèque, qui se produit à des tensions supérieures à la tension d'apparition des décharges partielle (TADP), donc à DP.

Dans le premier cas, des renforcements locaux de champ électrique à l'origine d'arborescences électriques, conduit finalement à la rupture de l'isolation par l'injection de charge d'espace, dans certaines conditions (typiquement champ électrique continu de plusieurs dizaines de kV/mm). Dans le deuxième cas, le matériau dégrade progressivement jusqu'à sa perforation entraînée par les décharges répétées [29].

2. Causes de dégradations :

Les phénomènes suivants, agissant aux niveaux macroscopique et microscopique, induisent dans la matière des modifications irréversibles qui contribuent rarement à améliorer les performances électriques :

- Sous l'effet des contraintes électriques, un champ électrique permanent déforme les molécules ou les chaînes des polymères, conduisant à la rupture d'une certaine partie d'entre elles.
- Les champs électriques transitoires peuvent entrer en résonance avec l'un des mécanismes de polarisation, induisant un transfert d'énergie important entre le champ et le matériau qui détruit des liaisons chimiques.
- Les courants transitoires survenant lors de court-circuits engendrent des contraintes mécaniques violentes par le jeu des forces de Laplace.
- À cela s'ajoute des contraintes climatiques (variations et non-uniformité de la température, induisant des contraintes mécaniques, humidité, brouillard salin, érosion par le vent et les poussières qu'il transporte) et aussi biologiques (développement de moisissures ou de champignons).

3. Conséquence des dégradations :

Différents paramètres caractéristiques du comportement électrique d'un isolant trahissent un vieillissement du matériau :

- La résistance d'isolement diminue (pollution de surface, pénétration d'eau dans les solides, augmentation de la concentration d'humidité dans les huiles).
- La capacité diminue et le facteur de pertes augmente (dans les isolations en couches: certaines couches ne sont plus isolantes).
- L'indice de polarisation diminue (le courant de conduction devient prépondérant par rapport au courant d'absorption).
- La rigidité diélectrique diminue (apparition de pointes par corrosion, décollement entre l'isolant et les électrodes, bulles, etc.)
- Le taux de décharges partielles augmente (la taille des cavités augmente).

D'une manière générale, le contrôle de l'état de l'isolation peut se faire de deux manières :

- Par diagnostic : l'équipement est mis hors tension et soumis à des tests au laboratoire.
- Par surveillance continue (monitoring) : les caractéristiques de l'isolation sont mesurées en permanence durant le fonctionnement de l'équipement.

I.11.3 Vieillesse accélérée :

Des mesures sont prises pour prédire la durée de vie des composants en fonctionnement normal, avec des essais de vieillissement accéléré. Dans de tel test, l'isolant est soumis à des charges des niveaux différents supérieurs aux niveaux correspondant au fonctionnement normal, jusqu'à une limite de dégradation qui détermine la durée de vie du matériau sous la contrainte étudiée.

Ce processus permet d'établir une relation pratique entre le niveau de la contrainte et la durée de vie. Il sera possible d'évaluer la durée de vie du matériau sous cette contrainte adéquate au service normal. Dans l'expérience pratique il doit être exécuté pour une combinaison de condition aux limite : variation de température, humidité, nombre de phénomène transitoire (foudre, manœuvre...). Particulièrement lorsque les résultats présentent une dispersion statique, le vieillissement accéléré devient plus complexe.

D'autre part, l'augmentation de la contrainte peut conduire à des effets de seuil qui n'a rien avoir avec l'accélération du vieillissement [30].

I.12 La pollution :

La pollution est un problème majeur car elle est à l'origine de la dégradation de l'isolation de l'équipement de haute tension (station, ligne de transmission, ...) [31].

I.12.1 Salinité :

La salinité c'est la concentration de sel dans l'eau, exprimée en kg/m³.

I.12.2 Couche de pollution :

Est une couche composée en général de sel et d'autres substances conductrices ou solutions électrolytiques appliquée sur la surface d'un matériau (isolateur).

I.12.3 Degré de pollution :

C'est la valeur qui quantifie la pollution déposée sur le matériau (isolateur) telles que la salinité, la conductivité de la couche et la densité des dépôts de sel [32].

I.13 Différentes sources de pollution :

Les principales sources de pollution sont : la pollution naturelle, la pollution industrielle et la pollution mixte.

I.13.1 Pollution naturelle :

C'est toute pollution qui se présente par la pollution marine naturelle, la pollution due à la poussière naturelle, aux dépôts de sable et qui sont transportées par le vent dans les zones désertiques et pluvieuses, et affectent un grande nombre d'ouvrage [1].

a. Pollution marine :

Un dépôt de gouttelettes emportées par le vent sur les structures (isolateur) installées en bord de mer va peu à peu former une couche de sel au-dessus de l'isolateur pour finir par recouvrir plus ou moins toute la surface de celui-ci, y compris les parties les plus protégées. Lorsque cette couche de sel est humidifiée par une vapeur, un brouillard, ou simplement par une condensation, elle devient conductrice et un courant de fuite s'accumule à travers celle-ci. Dans certaines conditions, des arcs électriques superficiels peuvent se produire et se déployer jusqu'à ce que le contournement complet de l'isolateur se produise [33].

b. Pollution désertique :

La pollution désertique fait référence à une pollution spécifique aux climats désertiques, c'est-à-dire aux zones à faible pluviométrie et à humidification par condensation. L'accumulation de contaminants est causée par l'interaction du flux d'air chargé de poussière avec l'obstruction créée par l'isolateur [34].

I.13.2 Pollution industrielle :

Cette pollution dépend fortement de l'industrie (métallurgie, usines chimiques, centrales électriques, complexes pétrochimiques, etc.) ; elle est peu répandue et concentrée à des endroits précis qui ne concerne que quelques pôles. Le dépôt de pollution peut résulter de l'immobilisation de particules solides, tels que des dépôts ferromagnétiques provenant d'usines métallurgiques, ou de l'absorption par la couche liquide de gaz présents dans la vapeur [35].

I.13.3 Pollution mixte :

La pollution mixte c'est la forme la plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques, elle résulte par la combinaison d'une ou de plusieurs pollutions précitées [1].

I.14 Facteurs climatiques d'influence sur la pollution [1] :

Parmi les principaux facteurs affectant l'isolant pollués nous distinguons : la météorologie et les conditions climatiques :

a) Vent : Il représente un moyen d'assurer le transport des poussières et du sel marin et la répartition des dépôts de contaminants sur les surfaces des isolants. D'autre part il peut être considéré comme agent autonettoyant si sa vitesse est élevée.

b) Pluie : Une pluie légère humidifie la surface souillée et favorise l'adhérence de la saleté. Cela augmente la conductivité de la couche de pollution.

c) La température : Une température élevée a un effet positif sur la surface polluée car elle assèche les dépôts et augmente la résistance de l'isolant.

I.15 Techniques de lutte contre la pollution :

Pour avoir des surfaces qui rejettent la pollution, on procède à des techniques suivantes :

- **Revêtement à base de silicone :** cela consiste à étaler une fine couche de silicone sur la surface de l'isolateur puis à le vulcaniser à une température ambiante [36].
- **Revêtement avec une couche hydrophobe (graissage) :** Les graissages assurent une protection temporaire des isolateurs en raison de leurs propriétés hydrophobes. La durée de vie du graissage dépend à la fois de l'environnement (pollution, conditions climatiques) et de la qualité réelle du produit. Généralement entre 1 et 4 ans. Bien que le graissage soit largement utilisé dans le monde, le processus de nettoyage et de graissage ultérieur est fastidieux, long et coûteux. Une interruption de service est également nécessaire [37].
- **Isolateur auto nettoyable (isolateur plat) :** l'isolateur plat réduit la ligne de fuite de l'isolateur. Ce dernier, dépourvu de nervures, a la particularité d'être moins susceptible d'accumuler les pollutions que l'isolateur connaît. Il se nettoie très bien même sous l'influence du vent. Principalement utilisé dans les zones désertiques [38].

I.16 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques définitions de certaines notions qui seront utilisées dans la suite de cette étude, comme nous avons décrit les différents types d'isolateurs utilisés dans les lignes de haute tension, notamment les isolateurs en porcelaines et leurs caractéristiques essentielles de mouillabilité et d'angle de contact. Bien que les isolateurs en porcelaine soient très exploités dans le domaine de l'isolation en haute tension, en raison de leurs excellentes propriétés électriques, ils restent limités par les phénomènes de pollution et de vieillissement qui réduisent leurs performances diélectriques et diminuent leur durée de vie.

II. Chapitre 2 : Méthode Diagnostic

II.1 Introduction

La classification des matériaux isolants se fait sur la base de leurs propriétés chimiques, physiques et électriques. Ces dernières sont déterminées par des techniques spécifiques qui sont mises au point pour mesurer, évaluer ou détecter les grandeurs liées à ces propriétés à travers lesquelles ces matériaux sont dits bons ou mauvais isolants.

Dans ce chapitre sont présentées quelques méthodes usuelles de diagnostic des matériaux diélectriques qui seront utilisées dans notre étude pour la caractérisation du matériau céramique.

Les méthodes de caractérisation chimique sont : l'analyse infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), la Spectrométrie par fluorescence des rayons X (FRX), la photo luminescence et l'analyse par diffraction des rayons X (DRX).

Les méthodes de caractérisation électrique sont : mesure de la rigidité diélectrique longitudinale E_i , mesure du facteur de perte $\text{tg}\delta$ et de la capacité C_x . La méthode de caractérisation physique est : la mesure de l'angle de contact θ .

II.2 Méthodes de diagnostic des matériaux diélectriques

II.2.1 Caractérisations chimiques

Une série d'analyses chimiques peut être effectuée pour déterminer l'état d'un matériau (sa jeunesse et son vieillissement lors de la mise en service). Celles-ci permettent de lever le voile sur la production de masse, le vieillissement possible ou même l'influence de certains facteurs dans le processus microscopique, comme les effets de facteurs externes tels que la contamination sur la morphologie et la structure moléculaire du matériau. Les plus intéressantes d'entre elles sont : la numérisation infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), la Spectrométrie par fluorescence des rayons X (FRX), la photo luminescence et la numérisation par diffraction des rayons X (DRX) [40].

II.2.1.1 Spectre infrarouge à transformée de fourrier (FTIR)

La spectroscopie infrarouge est un outil de diagnostic utilisé pour déterminer la nature des liaisons chimiques présentes dans une molécule. En effet, l'expérience montre que certaines fréquences vibratoires dites "fréquences de groupe" sont caractéristiques des groupes chimiques présents dans la molécule étudiée. La spectroscopie infrarouge est un moyen de caractérisation très puissant qui permet d'identifier des groupes de la molécule et

d'obtenir une multitude d'informations à l'échelle microscopique sur leur formation et leurs éventuelles interactions.

Dans le cas de la porcelaine, la méthode infrarouge nous permet de mieux comprendre la structure moléculaire des matériaux ainsi que la cinétique, le mécanisme et le déroulement des réactions chimiques et des cycles de catalyse et de vérifier que les matières premières, les produits intermédiaires et les produits finis sont conformes aux exigences définies par les spécifications. [41,42].

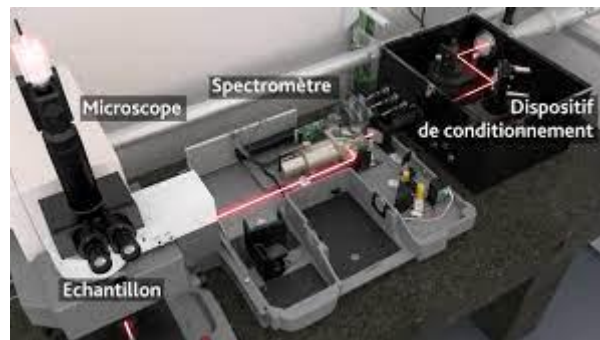


Figure II-1 La spectromètre infrarouge à transformée de Fourier.

II.2.1.2 La Spectrométrie par fluorescence des rayons X (FRX)

La fluorescence X (XRF) est une technique d'analyse qui peut être utilisée pour déterminer la composition chimique d'une grande variété de types d'échantillons, y compris les solides, les liquides, les boues et les poudres libres. La fluorescence X est également utilisée pour déterminer l'épaisseur et la composition des couches et des revêtements. Elle peut analyser des éléments allant du béryllium (Be) à l'uranium (U) dans des gammes de concentrations allant de 100 wt% à des niveaux inférieurs au ppm. La fluorescence X est une méthode d'émission atomique, similaire à la spectroscopie d'émission optique (OES), à la spectrométrie d'émission plasma (ICP) et à l'analyse par activation neutronique (spectroscopie gamma). Ces méthodes mesurent la longueur d'onde et l'intensité de la « lumière » (les rayons X dans ce cas) émise par les atomes énergisés de l'échantillon. En fluorescence X, l'irradiation par un faisceau de rayons X primaire depuis un tube à rayons X provoque l'émission de rayons X fluorescents dotés d'énergies discrètes caractéristiques des éléments présents dans l'échantillon [43].

II.2.1.3 La Photoluminescence

La photoluminescence est une technique utilisée pour caractériser les propriétés optoélectroniques des semi-conducteurs et autres matériaux. Son principe est simple : les électrons sont excités de la bande de valence à la bande de conductance du matériau par un laser dont l'énergie est supérieure à la bande interdite. Par conséquent, les porteurs photo excités se relaxent puis se recombinent spontanément avec des trous dans la bande de valence. Dans le cas des semi-conducteurs directs, l'énergie excédentaire est émise sous forme de lumière (émission spontanée). En analysant le spectre de la lumière émise, il est possible de mesurer la réponse du matériau en termes d'intensité en fonction de la longueur d'onde. Cela permet d'en savoir plus sur la structure de bandes du matériau - la largeur de la bande interdite, l'efficacité relative de la génération de lumière, la qualité du matériau (élargissement inhomogène), etc. Des informations supplémentaires peuvent être obtenues en contrôlant l'environnement de l'échantillon, par exemple en ajoutant un champ magnétique ou en modifiant la température de l'échantillon [44].

II.2.1.4 La Diffractométrie des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X est une méthode analytique utilisée pour l'identification des phases cristallines présentes dans le matériau, leur nature et leur structure. Son importance réside dans le fait qu'elle permet de faire une comparaison automatique avec les documents de référence [41, 42, 45].

Il s'agit d'une méthode d'analyse de phase non destructive qui permet de distinguer les produits amorphes des produits cristallins (minéraux, métaux, céramiques). Elle permet également d'étudier les conditions de formation des phases, leur évolution à température ou atmosphère donnée, donc de connaître le matériau aux conditions d'utilisation telles que la température, le balayage gazeux, ... etc.

II.2.2 Caractérisations électriques

II.2.2.1 Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un isolant est la tension qui provoque la perforation de l'isolant pour une isolation épaisse d'un (01) cm. Elle est évaluée par l'intensité du champ électrique, à laquelle le matériau doit résister, jusqu'à provoquer le claquage, ce qui le rend impropre à exécutez sa fonction plus tard. En pratique, la rigidité diélectrique est définie comme le rapport entre la tension appliquée qui a provoqué le claquage dans les conditions de testes spécifiées et la distance entre les deux électrodes auxquelles est appliquée la tension. La rigidité diélectrique est donnée par l'équation (II.1).

$$E_d = \frac{U}{d} (KV/cm) \quad (II.1)$$

U : tension électrique à laquelle se produit une perforation (claquage) ;
d : distance inter-électrodes

II.2.2.1.a) Mesure de la rigidité diélectrique

Le test de rigidité diélectrique est effectué dans l'air ou dans l'huile ou dans un solide et implique de placer le matériau de test entre deux électrodes et d'augmenter la tension entre les électrodes jusqu'à ce qu'une décharge électrique perce l'échantillon. La sanction de défaut est déterminée par l'analyse de la forme, de l'amplitude et du temps de maintien du courant fourni par le générateur à l'élément en teste et par comparaison avec une consigne déterminée[46].

II.2.2.1.b) Rigidité diélectrique longitudinale

Elle ne dépend guère de la nature du matériau isolant, mais plutôt de son état de surface et du milieu. En effet, dans la plupart des cas, une décharge entre deux conducteurs se trouvant sur la même surface se produit d'abord dans le milieu environnant ou à proximité de la surface solide. La rigidité diélectrique longitudinale des matériaux isolants est déterminée par la tension seuil suivant la décharge qui se produit entre deux conducteurs plan (électrodes planes) placées sur le même plan de cette surface isolante, à une distance d'un centimètre l'une de l'autre. La rigidité diélectrique longitudinale est alors donnée par la relation (II.2).

$$E_{l} = \frac{U_{cont}}{d} (kV/cm) \quad (II.2)$$

La Figure. II-2 illustre le schéma de principe de la mesure de la tension de contournement d'une surface isolante.

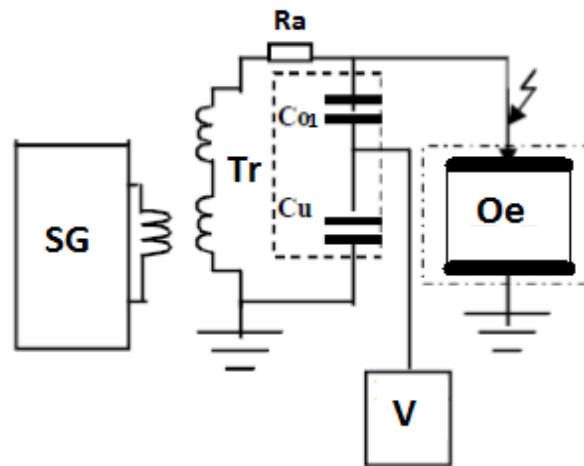


Figure II-2 Circuit de mesure de la tension de contournement d'une surface isolante.

Co1 : Capacité parasite de l'objet de mesure.

Cu : Capacité parasite des conducteurs.

SG : Appareil de commande automatique et manuelle de la tension.

Tr : Transformateur haute tension.

V : Voltmètre de crête.

Oe: Objet d'essai.

Ra : Résistance d'amorti.

II.2.2.1.c) Rigidité diélectrique transversale

La rigidité diélectrique transversale d'un matériau isolant est définie comme la capacité de ce matériau à résister à un champ électrique appliqué perpendiculairement à sa surface principale. Elle est mesurée entre deux électrodes planes situées de part et d'autre de l'isolant. La valeur de la rigidité diélectrique transversale dépend de la nature de l'isolant. On mesure cette propriété en appliquant une tension croissante jusqu'à ce que l'isolant se perfore, pour une distance donnée entre les électrodes (épaisseur de la plaque isolante). La rigidité diélectrique transversale est déterminée en fonction de la relation entre la tension appliquée et la perforation de l'isolant. Alors la rigidité diélectrique transversale est donnée par la relation (3).

$$E_t = \frac{U_{perf}}{d} \text{ (kV/cm)} \quad (II.3)$$

Avec :

U : tension de claquage donnée (kV)

d : Distance entre les électrodes (cm)

E_t (kV/cm) : rigidité diélectrique (elle s'exprime en V/m ou plus couramment en kV/cm ou MV/m).

La Figure. II-3 illustre le schéma de principe de la mesure de la tension de perforation de l'isolant.

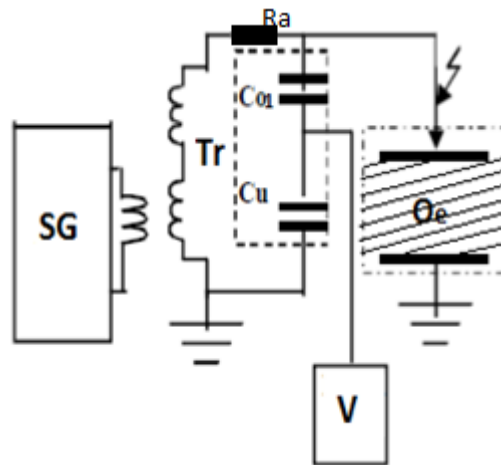


Figure II-3 Circuit de mesure de la tension de claquage d'un matériau isolant.

C01 : Capacité parasite de l'objet de mesure.

Cu : Capacité parasite des conducteurs.

SG : Appareil de commande automatique et manuelle de la tension.

Tr : Transformateur haute tension.

V : Voltmètre de crête.

Oe: Objet d'essai.

Ra : Résistance d'amorti.

II.2.2.2 Facteur de perte, capacité et permittivité

II.2.2.2.a) Mesure du facteur de pertes $tg\delta$ par la méthode du pont de Schering

Le pont de Schering (Figure. II-4) permet la mesure de la capacité et du facteur de perte de l'isolation (condensateurs, câbles, isolateurs, bornes de traversée, ... etc.) en tension alternative [46, 47, 48, 49]

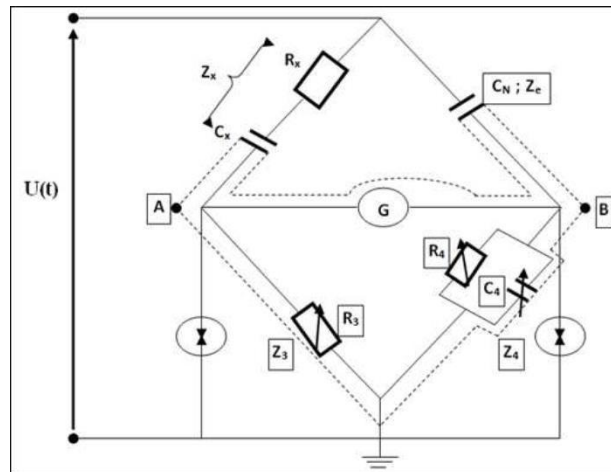


Figure II-4 Schéma de principe du pont de Schering.

- Impédance de branche : L'impédance de l'objet d'essais.

$$Z_x = R_x + \frac{1}{jC\omega_x} \quad (II.4)$$

$$Z_x = \frac{1}{jC\omega_x} (1 + jtg\delta_x) \quad (II.5)$$

Avec :

$$tg\delta_x = \omega * R_x * C_x \quad (II.6)$$

$$Z_N = \frac{1}{jC_N\omega} \quad (II.7)$$

Z_N : Impédance de la capacité étalon de facteur de perte faible

$$Z_3 = R_3 \quad (II.8)$$

$$Z_4 = \frac{R_4 * (\frac{1}{j\omega C_4})}{R_4 + (\frac{1}{j\omega C_4})} \quad (II.9)$$

A l'équilibre : $I_G = 0$

D'où

$$Z_x * Z_4 = Z_N * Z_3 \quad (\text{II.10})$$

En remplace les expressions des impédances et en égalant les parties réelles et imaginaire, on trouve :

$$C_x = \frac{R_4}{R_3} * C_N \quad (\text{II.11})$$

$$tg\delta_x = \omega * R_x * C_x = \frac{\omega * R_3 * C_x * C_4}{C_N} \quad (\text{II.12})$$

$$tg\delta = \omega * R_3 * C_4 \quad (\text{II.13})$$

• Mesure de la constante diélectrique ϵ_r :

$$C_x = \epsilon_r * C_0 \rightarrow \epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (\text{II.14})$$

$$C_0 = \epsilon_0 * \frac{S}{d} \quad (\text{II.15})$$

D'où

$$\epsilon_r = \frac{C_4}{C_3} * C_N \frac{d}{\epsilon_0 * S} \quad (\text{II.16})$$

□ **Pont transformateur différentiel (Figure. II-5) [50]** : Les condensateurs C_x et C_N sont placés dans la branche haute tension. La branche basse tension est remplacée par l'enroulement ω_1 et le ω_2 du transformateur, le troisième enroulement du transformateur est connecté à indicateurs zéro.

Le pont est en équilibre si :

$$C_x = \frac{\omega_1}{\omega_2} C_N \quad (\text{II.17})$$

Le nombre de spire du bobinage et fixé à 4 positions de sorte que le rapport à choisir soit de : 0.1 ; 1 ; 10 ou 100. Le bobinage ω_2 donne des positions de réglage variables

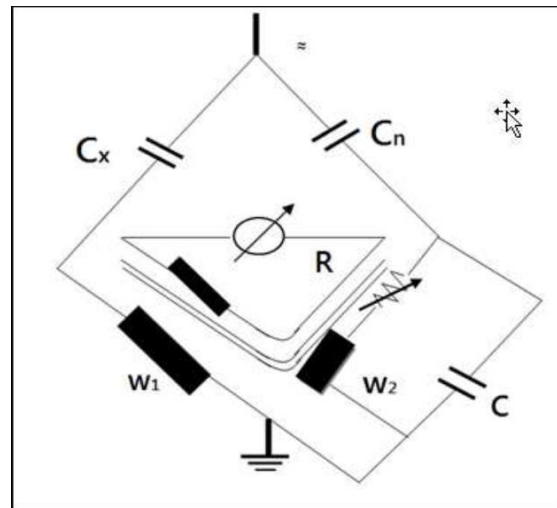


Figure II-5 Principe du pont de Schering à transformateur différentiel.

Pour déterminer $\tan\delta$, une résistance variable R et un condensateur C sont ajoutés au pont. Le facteur de perte est donné par : $\tan\delta = \omega \cdot C \cdot R$. Ajuster C et R donne la valeur de $\tan\delta$ à 50 ou 60 Hz.

II.3 La méthode théorique et pratique de détermination de l'angle de contact θ et l'indice d'hydrophobicité (IH)

- **La méthode théorique :** il existe plusieurs manières pour mesurer l'angle de contact

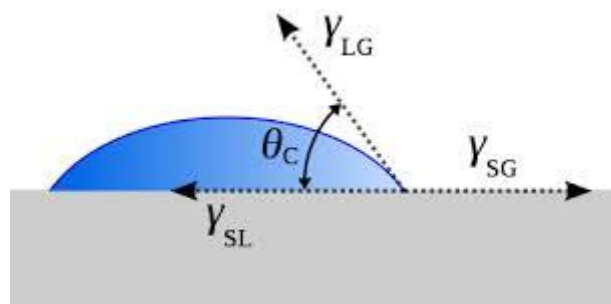


Figure II-6 Méthode théorique de détermination de l'angle de contact θ .

$$\cos \theta_c = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}} \quad (\text{II.18})$$

γ_{SG} : est la tension superficielle solide-vapeur (Nm^{-1}).

γ_{SL} : est la tension superficielle solide-liquide (Nm^{-1}).

γ_{LG} : est la tension superficielle liquide-vapeur (Nm^{-1}).

- La méthode pratique :

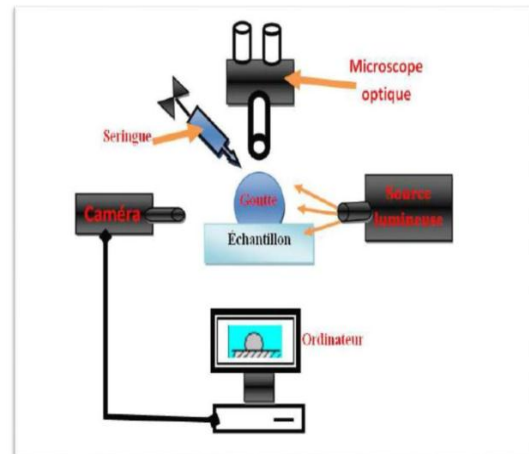


Figure II-7 appareil de mesure de l'angle de contact Figure II-8 La méthode de détermination de l'angle de contact.

Pratiquement, à l'aide d'une seringue, on pose une goutte d'eau sur l'échantillon à analyser. Une photo de la goutte est prise au moyen de la caméra qui est reliée au PC sur l'écran duquel sera visionnée l'image de la goutte avec la détermination des angles de contact θ . Par numérisation du contour de la goutte par la méthode d'interpolation à l'aide de logiciel J, un système motorisé permet de mesurer l'angle θ , tout en avançant et en rétractant la gouttelette, tandis que l'aiguille est maintenue à l'intérieur de la gouttelette. Un boîtier en plexiglas isole le système de sonde de goutte de l'air et des contaminants externes.

II.4 Indice d'hydrophobicité (IH) :

La corrélation entre l'indice d'hydrophobicité IH et l'angle de contact θ est représentée dans le tableau (II.1).

Tableau II-1 : corrélation entre IH et l'angle de contact θ .

IH	Description
1	Seules des gouttelettes discrètes sont formées. $\theta > 80^\circ$ pour la majorité des gouttelettes.
2	Seules des goutteles discrètes sont formées. $50^\circ < \theta < 80^\circ$
3	Seules des gouttelettes discrètes sont formées. $20^\circ < \theta < 50^\circ$, elles ne sont plus circulaire.
4	Des gouttelettes discrètes et des traces mouillées de rigoles d'eau sont observées (c.à.d. $\theta = 0^\circ$). Zones complètement mouillées $< 2cm^2$. Elles couvrent $< 90\%$ de la surface testée.
5	Quelques zones complètement mouillées $> 2cm^2$, qui couvrent moins de 90% de la surface testée.
6	zones mouillées qui couvrent $> 90\%$, c'est-à-dire de petites zones non mouillées (taches / traces) sont toujours observées
7	film d'eau continu sur toute la zone testée.

II.5 Conclusion

Les différentes techniques d'analyses permettent de faire une surveillance du comportement physico-chimie du matériau. Les différentes méthodes de détermination des caractéristiques sont basées sur des mesures qualitatives ou quantitatives, qui permettent de faire le monitoring du matériau dans le but d'assurer son bon fonctionnement même dans les mauvaises conditions d'exploitation.

Ces différentes techniques d'analyse seront réalisées dans le chapitre suivant pour voir si des modifications se sont produites dans la structure du matériau céramique après lui avoir fait subir un vieillissement électrique accéléré au laboratoire de haute tension.

III. Chapitre 3 : protocole expérimentale

III.1 Introduction

Notre étude expérimentale a pour but d'analyser la perte partielle ou totale de l'hydrophobicité / superhydrophobicité des isolateurs en porcelaine de différents états de surface. Pour ce faire, des paramètres d'influence sont mis en jeu, à savoir : le revêtement de la surface de l'isolateur avec une couche de suie, le vieillissement électrique de cette surface, la pollution déposée sur cette dernière, la conductivité de la solution polluante, l'angle de déclinaison de cette surface et la taille des gouttelettes d'eau qui y sont déposées. Pour chaque cas étudié, notre première démarche consiste à déterminer l'angle de contact θ et l'indice d'hydrophobicité ou de superhydrophobicité (IH) du matériau, en fonction de ces différents paramètres mis en jeu.

Il sera ensuite question de caractériser l'état du matériau par des méthodes physico-chimiques décrites dans le chapitre II. Pour ce faire, nos échantillons seront testés et analysés au niveau des différents laboratoires de l'université de Bejaia, en l'occurrence, le laboratoire de haute tension du génie électrique, le laboratoire de génie des procédés, le laboratoire de physique et le CRAPC. Après quoi, le comportement des gouttes d'eau déposées sur les différentes surfaces des échantillons de porcelaine est observé, sous l'influence de l'angle de déclinaison α de la surface du matériau, en vue de déterminer l'angle de contact θ , donc l'indice hydrophobicité du matériau, tout en recherchant l'angle d'éjection de la goutte qui correspond à l'angle optimal du profil de l'isolateur.

Les tests seront réalisés pour deux volumes de gouttelettes d'eau, soient 2 μl et 4 μl , deux conductivités de la solution polluante, soient 5 mS/cm et 2 mS/cm. Les expériences seront menées sur des échantillons de porcelaine et de porcelaine recouverts de suie, dans différentes conditions de surface, comprenant un vieillissement électrique à sec et sous pollution humide conductrice, sous contrainte de champ uniforme, et une tension alternative croissante (50 Hz).

III.2 Matériau porcelaine

La porcelaine est un matériau à plusieurs applications industrielles. Dans le domaine électrique elle est utilisée comme isolateur de ligne électrique. Ce sont des isolateurs poly cristallins, vitrifiés, translucides, imperméables, très durs, recouverts ou non par des vernis de grand feu ou de petit feu. Elles sont constituées par une phase vitreuse enrobant des cristaux de différentes natures.

Notre travail porte sur la caractérisation physico-chimique de la porcelaine italienne. L'Italie a une longue tradition dans la production de céramiques et de porcelaines de haute qualité, remontant à plusieurs siècles. La porcelaine italienne est réputée pour son élégance, son raffinement et son artisanat de qualité.

La porcelaine italienne est généralement composée d'un mélange d'argile, de feldspath et de quartz, qui sont des matières premières céramiques communes. La composition chimique exacte peut varier en fonction de la recette spécifique utilisée par chaque fabricant de porcelaine.

La porcelaine est généralement caractérisée par sa dureté, sa résistance à la pollution, sa résistance à la chaleur et sa résistance aux produits chimiques. Elle est également connue pour sa faible porosité, ce qui signifie qu'elle absorbe peu d'eau, est souvent non réactive et résistante aux acides et aux alcalis.

La porcelaine italienne, en tant que matériau céramique, est considérée comme un isolant électrique. Cela signifie qu'elle a une faible conductivité électrique et ne permet pas facilement le passage du courant électrique à travers elle.

III.2.1 La structure chimique de la porcelaine

La porcelaine est formée de cristaux de quartz, de mullite et quelques fois d'alumine, dispersés dans une masse amorphe (verre) [10]. Les propriétés électriques, surtout, la résistivité (conductivité) dépend de la nature, la proportion des différents composants vitreuse que sa proportion par rapport à la phase cristalline. Alors que les propriétés mécaniques dépendent essentiellement de la composition quantitative et qualitative de la phase cristalline : une augmentation de la proportion de ces constituants (cités avant) fait augmenter la consolidation structurale du réseau. Les propriétés d'une façon générale, une masse vitreuse peut contenir des oxydes dont la densité est plus grande que celles du métal, tels les oxydes alcalins et alcalino-terreux, la conductivité est assurée par les ions. On a constaté que le plus grand accroissement de la résistivité est observé pour : CaO, BaO ; B₂O qui consolident le réseau et ainsi diminuent la mobilité des ions alcalines tels Na⁺, K⁺ qui migrent facilement à travers le réseau. Cette masse vitreuse peut contenir des oxydes dont la densité est inférieure à celle du métal, tels les métaux de transition (FeO,...) ; et la conductivité électronique prédomine

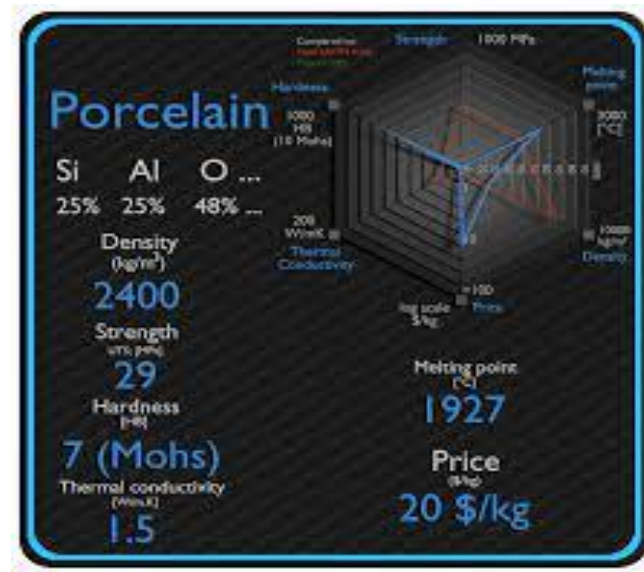


Figure III-1 la structure chimique de la porcelaine.

III.3 La structure de la suie

La suie est un dépôt carboné de couleur noire et d'apparence huileuse. Elle se forme lors de la combustion incomplète de la biomasse (bois) et des hydrocarbures fossiles (charbon, pétrole).

Dans les fumées de feux de bois, d'usines, ou dans les gaz d'échappement, les suies se présentent à un état particulaire d'un diamètre inférieur à un micromètre, ce qui les classe parmi les particules PM 2,5 d'après la terminologie anglaise (particulate matter).

La formation de suie est liée au mode de combustion (en particulier le pourcentage d'air ou d'oxygène, concernant la combustion stœchiométrique) et à la nature du carburant (type d'hydrocarbure). Elle est constituée de composés carbonés agglomérés formant des particules d'environ 20 nm disposées en hélice, résultant en une structure poreuse et régulière

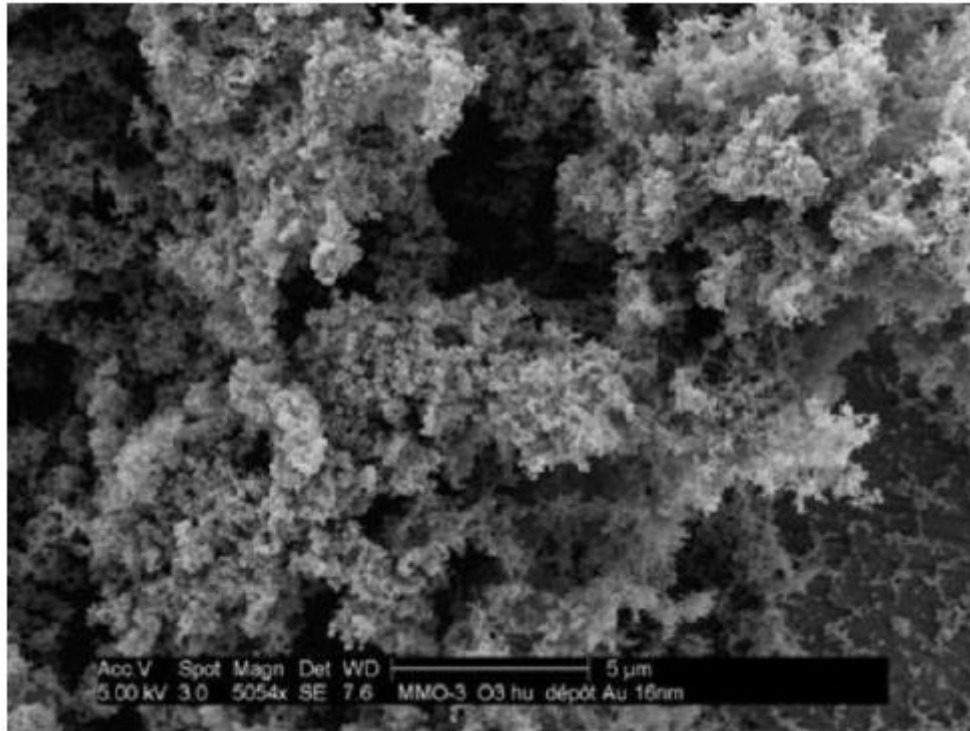


Figure III-2 La structure de la suie observée au microscope optique.

III.4 Modèle expérimentale

Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons particulièrement à la porcelaine, qui est utilisée pour la fabrication des chaînes d'isolateurs dans le domaine de la haute tension. Le matériau étudié est une porcelaine solide d'origine italienne.

Pour réaliser cette étude expérimentale visant à analyser la perte partielle ou totale de l'hydrophobicité d'un isolant en porcelaine en fonction de l'angle de déclinaison de la surface isolante, nous avons retenu huit (08) échantillons de porcelaine (italienne) relatifs à huit (08) états de surface à étudier, soient : quatre échantillons de la porcelaine italienne à l'état vierge, vieillie à sec, vieillie sous pollution humide de conductivité 5 mS/cm et 2 mS/cm, et quatre échantillons de la porcelaine italienne recouverte de suie de la combustion de la silicone à l'état vierge avec suie, vieillie avec suie, vieillie avec suie sous pollution humide de conductivité 5mS/cm et 2mS/cm.

Nos échantillons sont des plaques de dimension 5x100x100 mm, chacun correspondant à un des états considérés, ci-dessus précités, soient :

- la porcelaine vierge, la porcelaine vieillie à sec et la porcelaine vieillie sous pollution humide conductrice.

- la porcelaine recouverte de suie de combustion de silicone : vierge, vieillie à sec et vieillie sous pollution humide conductrice.
- deux conductivités de la solution polluante sont définies, soient : $\sigma=5$ mS/cm et $\sigma=2$ mS/cm.
- deux tailles des gouttes sont définies, soient 2 μ l et 4 μ l.
- l'angle de contact θ est mesuré pour des angles de déclinaison de la surface de la porcelaine α variable, soit : $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$.
- les mesures électriques réalisées sur chaque échantillon sont : le facteur de perte $\text{tg}\delta$, la capacité C_x et la rigidité diélectrique longitudinale E_l .
- les analyses chimiques réalisées sur chaque échantillon sont : la FTIR, la FRX, la photoluminescence et la DRX.

Les mesures électriques et les essais de vieillissement électriques accélérés effectués sur des échantillons de porcelaine et de porcelaine recouverte de suie sont réalisés au laboratoire de Haute Tension du département de Génie Electrique. Les mesures de l'angle de contact θ sont réalisées au laboratoire de Génie des Procédés et les analyses chimiques sont réalisées au laboratoire de Physique et du CRAPC de l'Université A. MIRA, Bejaia.

III.4.1 Préparation de la surface superhydrophobe

Pour préparer nos échantillons en porcelaine à surface superhydrophobe, nous étalons manuellement et uniformément sur les échantillons une très fine couche de gel en silicone fraîche. Cette dernière est directement exposée à la flamme de la combustion de la silicone. Les composés chimiques (fumée) résultant de cette combustion incomplète de ce combustible, apporte de la suie qui se dépose sur la couche fraîche de gel en silicone recouvrant la plaque en porcelaine qui aussi se carbonise pour donner une couche de suie d'une bonne adhérence (**figure III.3**).

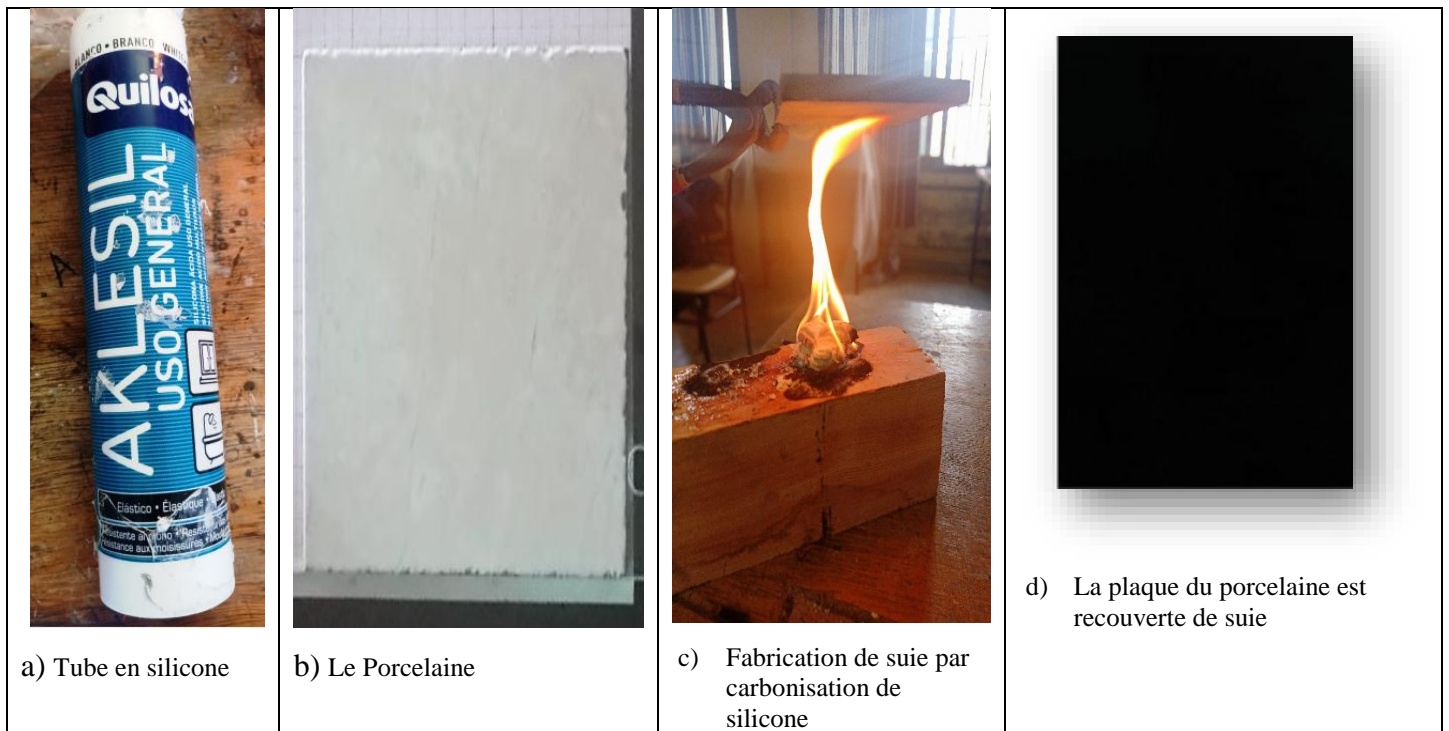


Figure III-3 Etapes essentielles de confection d'une surface en porcelaine superhydrophobe.

III.4.2 Protocole expérimental

1. Avant d'entreprendre tout essai physique et électrique, une série de mesures électriques et physiques et d'analyses chimiques de caractérisation est entreprise sur la plaque de porcelaine à l'état vierge. Ceci consiste à mesurer sa rigidité diélectrique longitudinale, son facteur de perte $\tan\delta$, sa capacité C_x , son angle de contact pour différentes déclinaisons de la surface isolante pour les deux volumes de la goutte d'eau, et à effectuer une série d'analyses FTIR-FRX, photoluminescence et DRX. Les résultats de ces mesures et analyses feront l'objet de valeurs de référence et seront présentés ultérieurement.
2. La deuxième plaque de porcelaine est d'abord vieillie électriquement à l'état propre (sec), en lui faisant subir une série de décharges plus de 100 claquage et en capte le point qui subit plus de 50 claquage en surface (AC 50 Hz) en champ uniforme, avant d'entreprendre la même série de mesures de caractérisation physico-chimique que précédemment.
3. La troisième plaque de porcelaine est vieillie électriquement sous pollution humide de conductivité 5 mS/cm, en lui faisant subir une série de décharges en surface (AC 50 Hz) en champ uniforme, avant d'entreprendre la même série de mesures de caractérisation physico-chimique que précédemment.

4. La quatrième plaque de porcelaine est vieillie électriquement sous pollution humide de conductivité 2 mS/cm, en lui faisant subir une série de décharges en surface (AC 50Hz) en champ uniforme, avant d'entreprendre la même série de mesures de caractérisation physico-chimique que précédemment.

5. Les cinquième, sixième, septième et huitième plaques de porcelaine recouvertes de suie de silicone **subiront** respectivement le même traitement que les plaques 1, 2, 3 et 4.

Pour chacun des huit cas considérés, il est question de mesurer l'angle de contact θ de la goutte d'eau déposée sur le matériau pour différentes déclinaisons de la plaque en porcelaine, et par la même déterminer l'indice d'hydrophobicité pour chaque cas étudié. Cette opération est répétée pour les deux tailles de la goutte d'eau.

III.5 Objets d'essais

- **Essais de vieillissement électrique et mesure de la rigidité diélectrique longitudinale**

Pour réaliser les essais de vieillissement électrique et la mesure de la rigidité diélectrique longitudinale l'échantillon de porcelaine de dimensions $(10 \times 10 \times 0,8) \text{ cm}^3$ est posé sur une plaque en verre (4) le tout étant fixé sur un support (table) mis à la terre (5). Pour réaliser les essais de vieillissement électrique, deux électrodes (3) de forme parallélépipédique en cuivre et de taille $(1 \times 10 \times 0,5) \text{ cm}^3$ arrondies aux extrémités afin d'éviter l'effet de bords sont posées aux extrémités de l'échantillon à une distance de huit (08) cm l'une de l'autre. L'une des deux électrodes est portée à une source de Haute Tension et l'autre est mise à la terre. La figure (III.4) montre une photographie de l'objet d'essai. Pour mesurer la rigidité diélectrique longitudinale on pose les deux électrodes à une distance de 1 cm.



Figure III-4 Objet d'essai.

1 : échantillon de porcelaine ; 2 : câble mise sous tension ; 3 : électrodes ; 4 : plaque en verre

- **Angle de contact**

En vue de mener les tests sur l'effet de la déclinaison de la surface de la porcelaine sur son hydrophobicité, nous avons utilisé l'appareil *Drop Shape Analyzer DSA30 KRÜSS GmbH*.

Il s'agit d'un analyseur de forme de goutte DSA30 qui peut mesurer l'angle de contact θ en contrôle qualité. C'est un instrument flexible qui mesure avec précision l'angle de contact et l'énergie libre de surface (SFE) en analysant la mouillabilité et l'adhérence des surfaces des porcelaines. Il est équipé d'une unité d'éclairage LED unifiée, d'optiques de haute qualité et d'une caméra haute résolution. Il en résulte une image précise de la gouttelette distribuée, garantissant que la forme de la gouttelette peut être évaluée de manière fiable pour l'angle de contact.

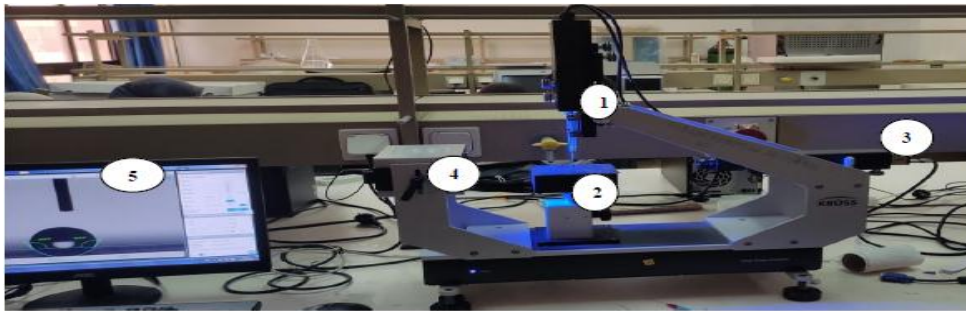


Figure III-5 Appareil de mesure d'angle de contact θ : *Drop Shape Analyzer DSA30 KRÜSS GmbH*.

1 : réservoir de la solution liquide et pipette

2 : plateau où est déposé l'échantillon

3 : caméra

4 : torche

5 : PC de paramétrage de données (volume de la goutte) et l'affichage de la forme de la goutte et de l'angle de contact θ .

- **Pont de Schering**

Pour la mesure du facteur de perte $\text{tg}\sigma$ et de la capacité C_x des échantillons de porcelaine, nous avons utilisé le pont de Schering qui est basé sur le principe de l'équilibre des impédances. Il utilise un circuit en pont à transformateur différentiel (voir la fig. II-5 §II.2.2.2. b). Les condensateurs C_x (représenté par l'échantillon de porcelaine) et C_N sont placés dans la branche haute tension. La branche basse tension est remplacée par l'enroulement ω_1 et le ω_2 du transformateur, le troisième enroulement du transformateur est connecté à indicateurs zéro. En ajustant les valeurs des résistances et des condensateurs

connus dans le pont, on peut atteindre un équilibre où le courant dans la branche de détection (enroulement $\omega 3$) est nul. Les valeurs de $\text{tg}\delta$ et C_x sont directement lus sur les afficheurs digitaux du pont.

III.6 Modes opératoires

III.6.1 Mesure de la rigidité diélectrique longitudinale

La mesure de la rigidité diélectrique longitudinale de l'échantillon est effectuée selon le principe donné en (§II.2.2.1. b). Pour des distances inter-électrodes d égales à 1cm, 2cm et 3cm, on applique une rampe de tension alternative 50 Hz, de vitesse constante 2 kV/s jusqu'au claquage. La rigidité diélectrique longitudinale est donnée par la pente de la caractéristique : tensions de claquage U_d vs distance inter-électrode d , soit par la relation :

$$E_i = U_d / d \quad (\text{III. 1})$$

III.6.2 Essais de vieillissement électrique

Dans le but de simuler un cas de contournement par une décharge électrique d'un système d'isolateur en porcelaine, sous contrainte de champ électrique, nous avons réalisé des essais de vieillissement électriques accélérés sur des échantillons de porcelaine.

Pour simuler ce vieillissement électrique accéléré, nous avons fait subir à l'échantillon, une série de 100 claquages superficiels, et ce dans le cas de trois états de leurs surfaces : sec, pollué avec une solution de conductivité électrique $\sigma = 5\text{mS/cm}$ et pollué avec une solution de conductivité électrique $\sigma = 2\text{mS/cm}$. Cela revient à appliquer sur la surface de l'échantillon considéré, entre deux électrodes planes en cuivre distantes de d (cm), une rampe de tension alternative 50 Hz, de vitesse constante 2kV/s jusqu'au claquage.

La figure (III.6) illustre le dispositif expérimental utilisé pour le vieillissement accéléré du matériau. Le dispositif est constitué des éléments suivants :

- Un transformateur HT (T100) 0.8/135 kV pouvant délivrer une tension allant de 0 à 100 kV pour des essais en alternatif et de 0 à 135 kV en tension continue.
- Un appareil de commande automatique et manuelle de tension SG, à vitesse de montée variable.
- Un diviseur de tension capacitif ($C_0 = 0.1 \mu\text{F}$ et $C_u = 41.4 \mu\text{F}$) pour les mesures en tension alternative.

- Un voltmètre de crête AC/DC de type MU11, à affichage digital permettant, selon le montage électrique, la mesure des hautes tensions alternatives ou continues.
- Une résistance de protection $R = 106 \text{ k}\Omega$ limitant le courant.
- Une table servant de support à l'objet d'essai (ensemble échantillons et électrodes).
- Enfin, l'ensemble dispositif HT et échantillon est entouré par une cage de protection (cage de faraday).

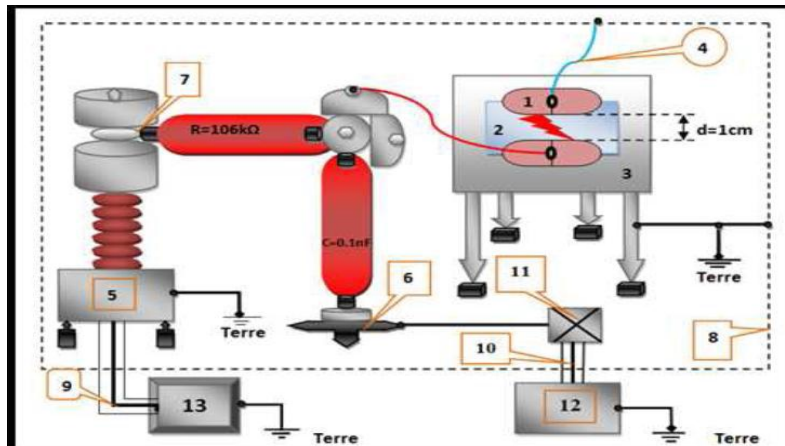


Figure III-6 la cage de faraday.

1 : Électrode en cuivre. 2 : Matériaux (porcelaine). 3 : Table. 4 : Fil conducteur. 5 : Transformateur haute tension. 6 : Support d'éléments. 7 : Nœuds de liaison. 8 : Grille de protection. 9 et 10 : Câble coaxial. 11 : Boîte de connexion. 12 : (MU11) Voltmètre de crête. 13 : (SG1BT) Système de commande manuel et automatique.





Figure III-7 Photos des éléments du dispositif d'essais et de mesure de la haute tension du laboratoire HT G.E. Université de Bejaïa.

Notre objet d'essai est constitué de l'échantillon de porcelaine et de la paire d'électrodes en cuivre. La figure (III.8) montre des photos de l'objet d'essai pour une surface non Polluée de porcelaine avant et pendant le passage de la décharge

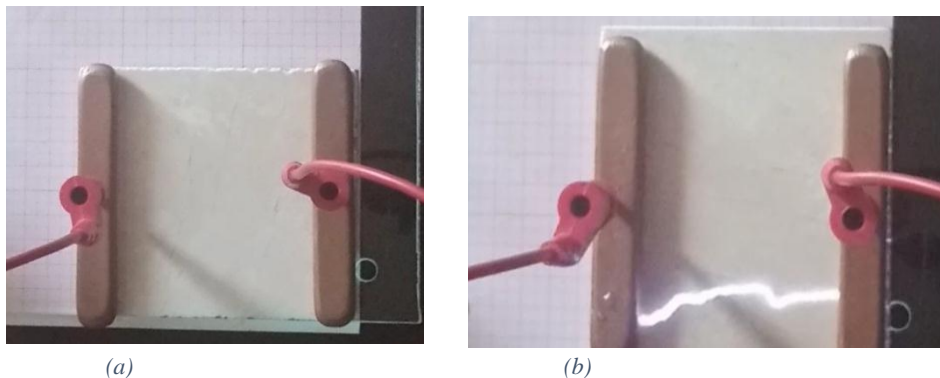


Figure III-8 porcelaine (a) : avant et (b) : pendant le passage de la décharge.

III.6.3 La préparation de la solution polluante conductrice

Un mélange d'eau distillée et de chlorure de sodium (Na Cl) fait office de solution polluante dont la conductivité désirée est contrôlée au moyen d'un conductimètre comme illustré sur la **figure (III.9)**. Pour une meilleure netteté d'image prise des gouttes, nous avons ajouté du bleu de méthyle à la solution.

Au moyen d'une caméra placée au-dessus de l'objet d'essais, nous relevons, après rupture, le chemin emprunté par la décharge. Vu que la décharge est initiée de manière aléatoire sur la surface de l'échantillon, nous relevons, pour analyses les zones touchées par dix passages de la décharge au minimum.

Dans le souci de conserver les mêmes conditions climatiques de laboratoire, soit une température ambiante $T = 22.2^{\circ}\text{C}$, une pression $P=1003\text{hPa}$ et une humidité $H=59\%$, tous les essais sont réalisés de manière successive.

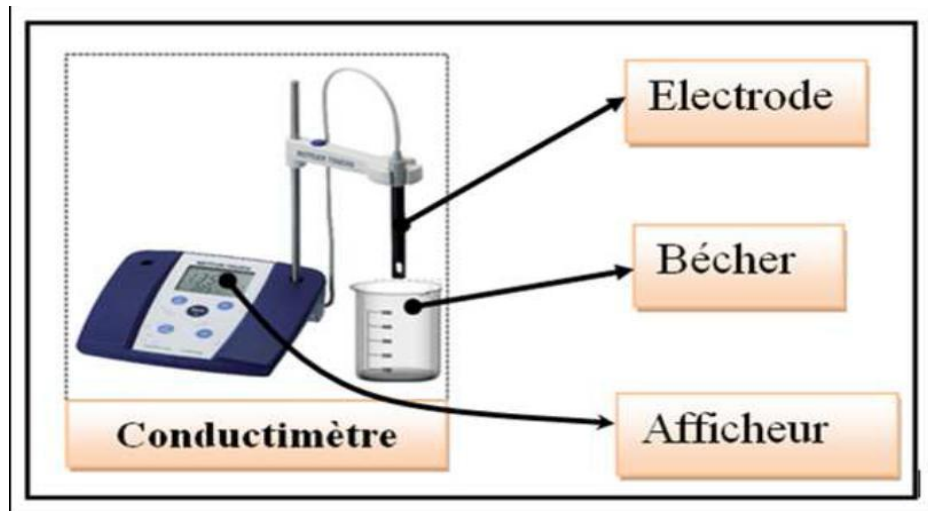


Figure III-9 Conductimètre.

III.6.4 Mesure de la capacité C_x et du facteur de perte $\text{tg}\delta$

Le facteur de pertes $\text{tg}\delta$ et la capacité C_x sont déterminés avant et après vieillissement de l'échantillon de porcelaine, pour tous les cas envisagés de la surface de l'échantillon de porcelaine (vierge, vieilli à sec et vieilli sous pollution humide de conductivité électrique $\sigma=5\text{mS/cm}$ et $\sigma=2\text{mS/cm}$. C_x et $\text{tg}\delta$ sont mesurés sous une tension électrique appliquée $V=100\text{V}$ et une fréquence $f= 50\text{Hz}$. La permittivité ϵ_r et l'indice de perte $\epsilon_r \cdot \text{tg}\delta$ du matériau sont alors déterminés



Figure III-10 Pont de Schering.

III.6.5 Mesure de l'angle de contact

Après avoir effectué le revêtement avec la couche de suie, les mesures électriques et les essais de vieillissement électrique des échantillons de porcelaine, nous avons procédé à l'analyse de la perte partielle ou totale de l'hydrophobicité du matériau, en fonction de sa déclinaison. Pour cela, nous avons suivi le protocole décrit ci-dessous :

1. L'appareil "Drop Shape Analyzer DSA30 KRÜSS GmbH" est utilisé pour analyser la forme de la goutte et mesurer l'angle de contact θ par le biais duquel sera déterminé l'indice d'hydrophobicité du matériau analysé.
2. La plaque de porcelaine est posée sur le plateau de l'appareil et son angle d'inclinaison α par rapport à l'horizontal est précisément fixé et contrôlé par un rapporteur.
3. A l'aide de la pipette microscopique automatique, une goutte d'eau est déposée sur la surface de l'échantillon, de volume précisément paramétré sur le PC.
4. La gouttelette est capturée par la caméra et visionnée sur le PC. L'appareil analyse la forme de la goutte et mesure l'angle de contact θ .
5. Pour obtenir une meilleure qualité d'image, nous avons utilisé une eau distillée colorée avec un bleu de méthyle.

Nos tests sont réalisés pour :

- ✓ Les angles d'inclinaison α allant de 0° à 180° ;
- ✓ Deux conductivités de la solution d'eau $\sigma=2\text{mS/cm}$ et $\sigma=5\text{mS/cm}$;
- ✓ Deux volumes des gouttes d'eau : $2\mu\text{l}$ et $4\mu\text{l}$;
- ✓ Huit états de surface de la porcelaine .

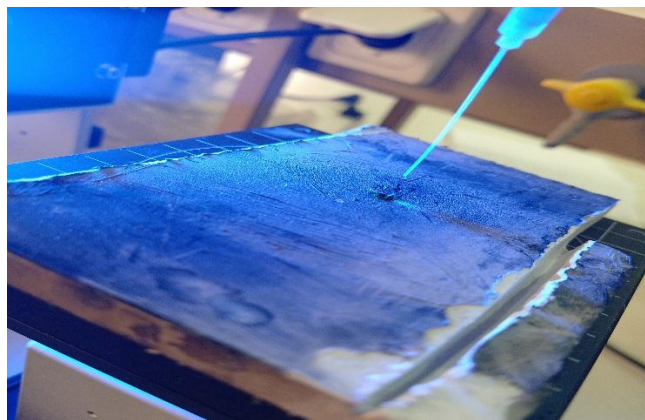


Figure III-11 Mesure de l'angle de contact θ de l'échantillon au moyen de l'appareil Drop Shape Analyzer DSA30 KRÜSS GmbH.

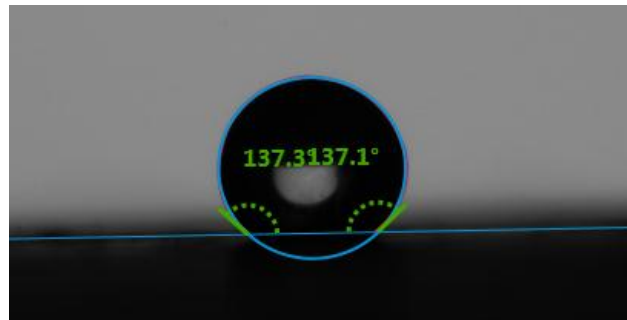


Figure III-12 Angle de contact de la goutte d'eau capturée par l'appareil Drop Shape Analyzer DSA30 KRÜSS GmbH.

III.6.6 Analyses chimiques

III.6.6.1 L'analyse FTIR mode ATR

L'ATR est l'une des technologies d'échantillonnage les plus couramment utilisées en spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), qui a pour but de tirer profit des propriétés physiques de la lumière pour obtenir des informations sur la composition et la structure de l'échantillon analysé. Cette méthode ne nécessite que très peu de préparation de l'échantillon, et permet d'analyser aussi bien les liquides que les solides.

1- Préparation de l'échantillon : Six (06) échantillons de porcelaine (vierge, vieilli à sec, vieilli avec pollution conductrice à $\sigma=5$ mS/cm, porcelaine recouverte de suie, vieilli avec suie et vieilli avec suie sous pollution conductrice à $\sigma=5$ mS/cm, de 5mm d'épaisseur sont placés sous un diamant à réflexion unique avec lentille ZnSe qui comprend une tour haute pression du spectrophotomètre (modèle NicoletTM IS50 FTIR) afin de réaliser l'analyse FTIR mode ATR. La lentille ZnSe est placée sur la zone où la décharge est passée 10 fois au minimum.

2- principe de mesure : l'analyse FTIR – ATR est réalisée sur les échantillons de porcelaine dans la gamme spectrale $[400\text{cm}^{-1};4000\text{cm}^{-1}]$. Le traitement des spectres obtenus est réalisé à l'aide du logiciel panorama trial version. La figure (III. 13) représente le spectrophotomètre (modèle NicoletTM IS50 FTIR).

3- les avantages d'ATR :

Préparation minimale de l'échantillon - placez l'échantillon sur le cristal et collectez les données

- **Nettoyage rapide et facile** - retirez simplement l'échantillon et nettoyez la surface du cristal
- **Analyse d'échantillons dans leur état naturel** - pas besoin de chauffer, de presser en pastilles ou de broyer pour collecter les spectres
- **Excellent pour les échantillons épais ou fortement absorbants** - idéal pour les échantillons difficiles comme le caoutchouc noir



Figure III-13 L'appareil d'analyse de FTIR.

III.6.6.2 L'analyse par la fluorescence de rayon X :

La fluorescence X (FRX) est une technique d'analyse qui nous permet de déterminer la composition chimique des six(06) échantillons de porcelaine solide précités.

Principe :

L'échantillon de porcelaine à analyser est placé sous le faisceau de rayons X. Sous l'action de ces rayons X, les atomes qui composent l'échantillon passent d'un état fondamental à un état excité. L'état excité est instable, et l'atome tend alors à revenir à l'état fondamental en libérant de l'énergie, notamment sous forme de photons X. Chaque atome a sa propre structure électronique et émet des photons avec sa propre énergie et sa propre longueur d'onde. La fluorescence X est l'émission secondaire de rayons X caractéristique des atomes qui

composent un échantillon. L'analyse de ce rayonnement X secondaire permet d'appréhender à la fois la nature des éléments chimiques présents dans l'échantillon et leurs concentrations massiques.



Figure III-14 L'appareil d'analyse de la fluorescence de rayon X.

III.6.6.3 L'analyse par diffracter des rayons X :

Après leur élaboration, les échantillons sont caractérisés par diffraction des rayons X. Cette technique permet d'identifier les phases cristallines en présence dans le matériau et de déterminer leurs caractéristiques cristallographiques.

Les échantillons étudiés sont : porcelaine vierge, porcelaine vieilli, porcelaine vieilli avec pollution de conductivité 5mS/cm, porcelaine avec suie, porcelaine vieillie avec suie, porcelaine vieillie avec suie sous pollution conductrice de $\sigma= 5\text{mS/cm}$)



Figure III-15 L'appareil d'analyse de diffraction des rayons X.

Principe :

L'appareil de diffraction utilisé est un diffractomètre à poudre D8 Advance-BRUKER AXS. Il possède une géométrie de type Bragg–Brentano et constitué d'un goniomètre horizontal en configuration (figure III.16), d'un porte-échantillon tournant et d'un tube à rayons X de radiation K α_1 et K α_2 du cuivre de longueurs d'ondes $\lambda_1 = 1,5406$ et $\lambda_2 = 1,5444$ Å. Un monochromateur arrière situé entre le détecteur et l'échantillon permet de s'affranchir du bruit de fond engendré par le rayonnement de fluorescence de certains éléments, tel que le fer. Les spectres RX ont été enregistrés en 2θ entre 5° et 60° .

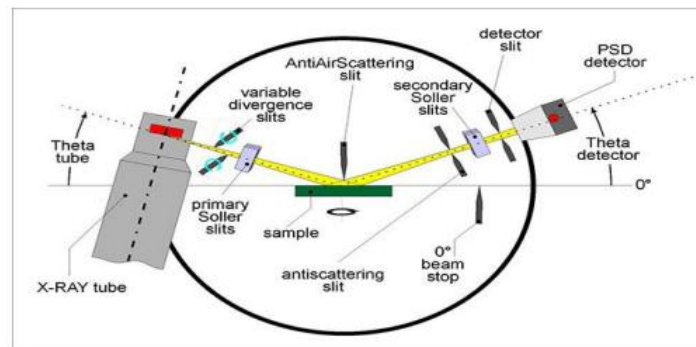


Figure III-16 Représentation schématique du principe de la spectroscopie IR.

III.6.6.4 L'analyse par photoluminescent

La photoluminescence est le phénomène d'émission de lumière suite à la réaction d'un matériau photoluminescent sujet à une "excitation" par exposition à un rayonnement optique ultraviolet, visible ou infra rouge

Son principe de fonctionnement est simple : on excite les électrons de la substance étudiée à l'aide d'un rayonnement (généralement monochromatique) et l'on détecte la lumière émise par cette dernière. En général, l'énergie de la lumière émise est plus faible que celle du rayonnement utilisé pour l'excitation.

Le spectre de la photoluminescence UV caractéristique de l'excitation des électrons des atomes qui composent l'échantillon est alors déterminé et visionné sur l'écran de PC.

Les trois échantillons analysés sont : la porcelaine vierge, la porcelaine avec suie, la porcelaine vieillie avec suie sous pollution conductrice à une conductivité de 5mS/cm.



Figure III-17 apparie de photoluminescence.

III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé diverses techniques de mesures physiques et électriques, et d'analyses chimiques réalisées qui nous ont permis de faire une caractérisation physico chimique de la porcelaine, ceci dans le but d'étudier l'effet de l'angle d'inclinaison de la surface du matériau sur son indice d'hydrophobicité, en prenant en compte sa, ses propriétés électriques, physiques et chimiques, par rapport à son état initial, sous l'influence de certains paramètres mis en jeu: vieillissement, contamination, taille des gouttelettes d'eau, conductivité de la solution polluante et l'effet de la couche de suie.

Les résultats de ces mesures et analyses seront interprétés et corrélés pour statuer sur la perte totale ou partielle de l'hydrophobicité de ce matériau. Des résultats intéressants ont été obtenus et seront présentés le chapitre IV suivant.

*IV. Chapitre 04 : présentation et discussion des
résultats*

IV.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats obtenus à partir de divers essais physiques (angles de contact θ de la goutte d'eau, indice d'hydrophobicité), électriques (rigidité diélectrique, pertes diélectriques, etc.) et d'analyses chimiques (FTIR, FRX, DRX et la photoluminescence) réalisées dans différents laboratoires du Génie électrique, du Génie des Procédés, de physique et du CRAPC de l'université A. Mira de Bejaia.

Ces essais et analyses ont généré une importante base de données qui nous a permis de comprendre le comportement de la porcelaine en ce qui concerne la perte totale ou partielle de son hydrophobicité ou super hydrophobicité en fonction des paramètres d'influence étudiés. De plus, cela nous a permis de caractériser et d'évaluer le comportement électrique et chimique de la porcelaine avant et après son vieillissement sous contrainte électrique et ou pollution conductrice humide.

Les résultats de cette étude ont conduit à des conclusions intéressantes que nous présenterons ci-dessous.

IV.2 Mesure de l'angle de contact de la goutte d'eau et de l'indice d'hydrophobicité de la surface de la plaque de porcelaine :

Dans notre étude, nous examinons comment l'angle de contact θ d'une goutte d'eau varie en fonction des différentes déclinaisons de la surface de la plaque de porcelaine. Nous nous intéressons particulièrement aux paramètres d'influence tels que le volume des gouttes et leurs conductivités sur la surface de contact. L'objectif est d'obtenir une meilleure compréhension et gestion des différentes variantes étudiées.

Pour mesurer l'angle de contact θ , nous avons utilisé l'appareil "Drop Shape Analyzer DSA30 KRÜSS GmbH". Cet instrument analyse la forme de la goutte, le mouillage et l'adhérence sur la surface solide du verre et mesure avec précision l'angle de contact θ . Nous déterminons l'indice d'hydrophobicité dans le tableau (§ II. 1).

Tableau IV-1 : Angle de contact θ et indice d'hydrophobicité IH en fonction de l'angle de déclinaison α de la surface de l'échantillon de porcelaine, pour les différents volumes de la goutte d'eau mis en jeu dans le cas de l'état vierge de la surface propre de porcelaine sans suie.

	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH
2 μ l	0	0	4	10	0	4	20	0	4	30	0	4	40	0	0
4 μ l	0	0	4	10	0	4	20	0	4	30	0	4	40	0	0

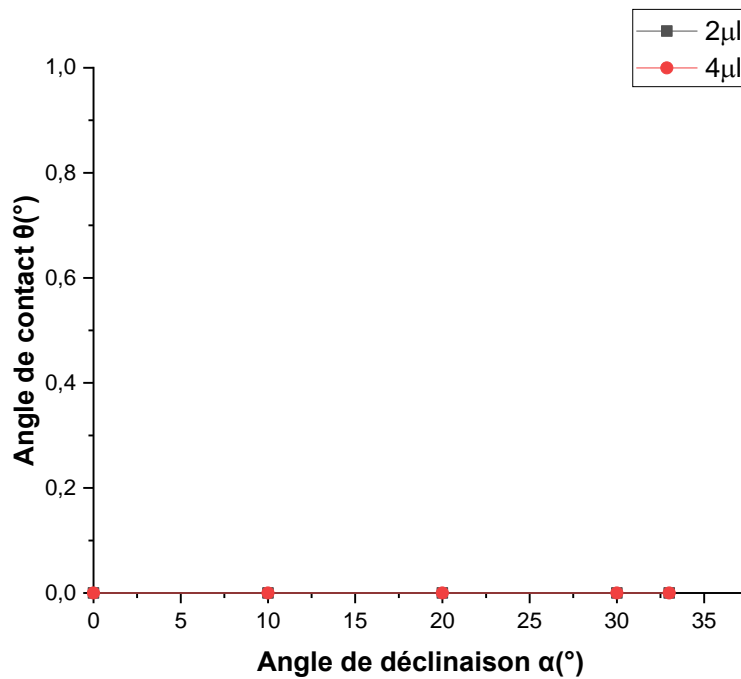


Figure IV-1 Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vierge de la surface propre de porcelaine sans suie.

Tableau IV-2 : angle de contact θ et indice d'hydrophobicité IH en fonction de l'angle de déclinaison α de la surface de l'échantillon de la porcelaine, pour les différents volumes de la goutte d'eau mis en jeu dans le cas de l'état vieilli de la surface propre de la porcelaine sans suie

	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH
2 μ l	0	5	3	10	6.4	3	12	8.2	3	14	11.2	3	16	11.8	3
4 μ l	0	6.3	3	10	7.1	3	12	9.8	3	14	/	4	16	/	4

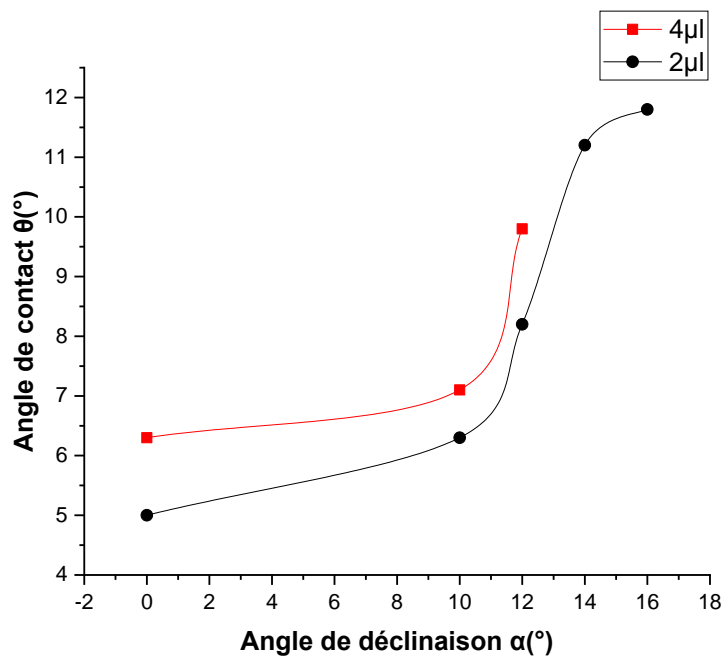


Figure IV-2 Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vieilli de la surface propre de porcelaine sans suie.

Tableau IV-3 : Angle de contact θ et indice d’hydrophobicité IH en fonction de l’angle de déclinaison α de la surface de l’échantillon de porcelaine, pour les différents volumes de la goutte d’eau mis en jeu dans le cas de l’état vieilli de la surface de la porcelaine, pour les différents volumes de la goutte d’eau mis en jeu dans le cas de l’état vieilli de la surface de la porcelaine sans suie, sous pollution humide conductrice à $\sigma = 2\text{mS/cm}$.

	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	HI	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	HI	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	HI	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	HI	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	HI
2 μl	0	0	4	10	0	4	20	0	4	30	0	4	40	0	4
4 μl	0	0	4	10	0	4	20	0	4	30	0	4	40	0	4

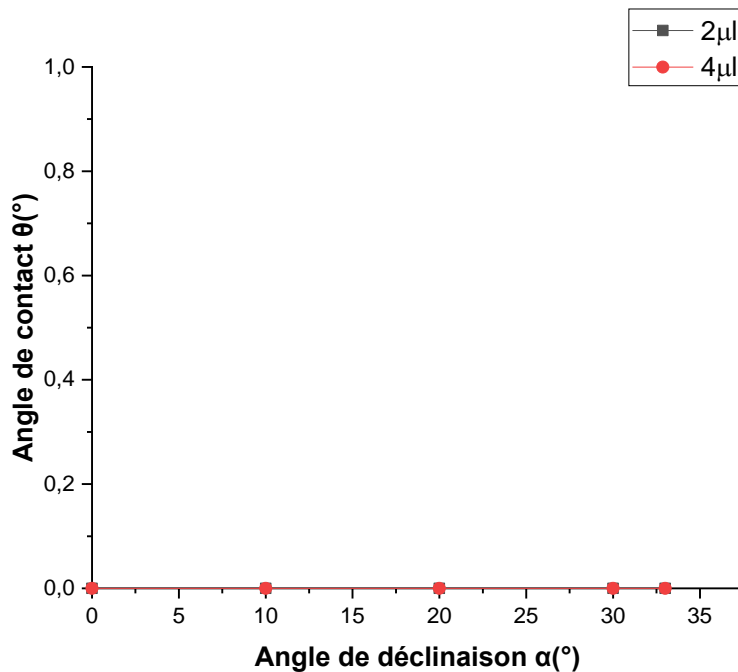


Figure IV-3 Angle de contact θ en fonction de l’angle de déclinaison α pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l’état vieilli de la surface de la porcelaine sans suie, sous pollution humide conductrice à $\sigma = 2\text{mS/cm}$.

Tableau IV-4 : Angle de contact θ et indice d'hydrophobicité IH en fonction de l'angle de déclinaison α de la surface de l'échantillon de porcelaine, pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vieilli de la surface de la porcelaine sans suie, sous pollution humide conductrice à $\sigma = 5\text{mS/cm}$.

	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH
2 μl	0	0	4	10	0	4	20	0	4	30	0	4	40	0	4
4 μl	0	0	4	10	0	4	20	0	4	30	0	4	40	0	4

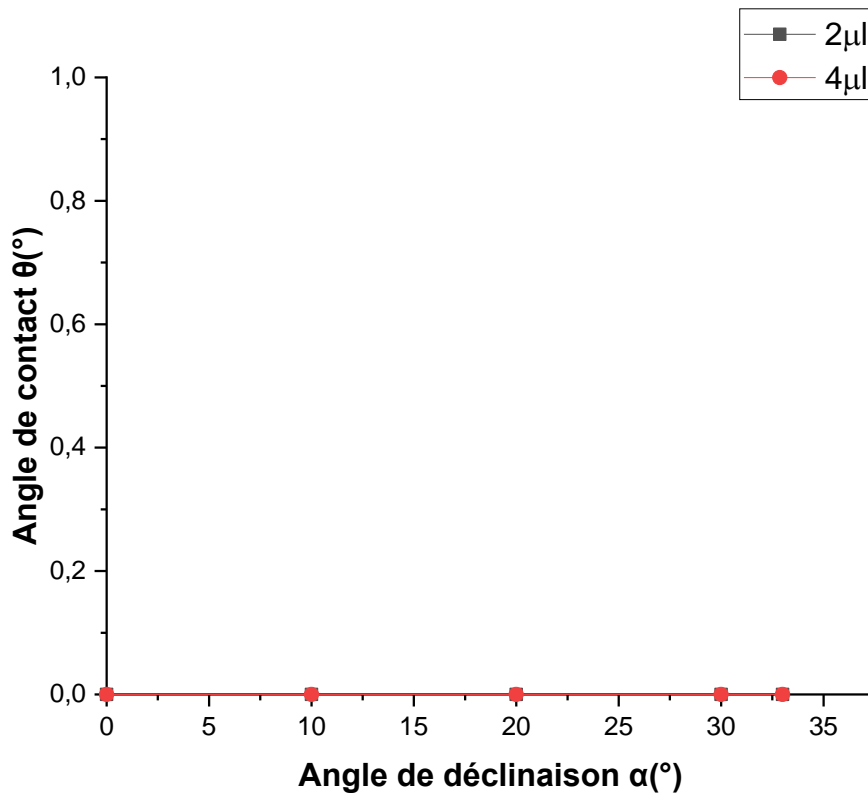


Figure IV-4 Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vieilli de la surface de la porcelaine sans suie, sous pollution humide conductrice à $\sigma = 5\text{mS/cm}$.

Tableau IV-5 : Angle de contact θ et indice d'hydrophobicité IH en fonction de l'angle de déclinaison α , pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vierge de la surface de la porcelaine recouverte de suie.

	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH
2 μ l	0	126.7	1	0.5	125.5	1	1	121	1	2	116.5	1	3	115.3	1
4 μ l	0	128.6	1	0.5	125.7	1	1	115.7	1	2	105.8	1	3	86.3	1

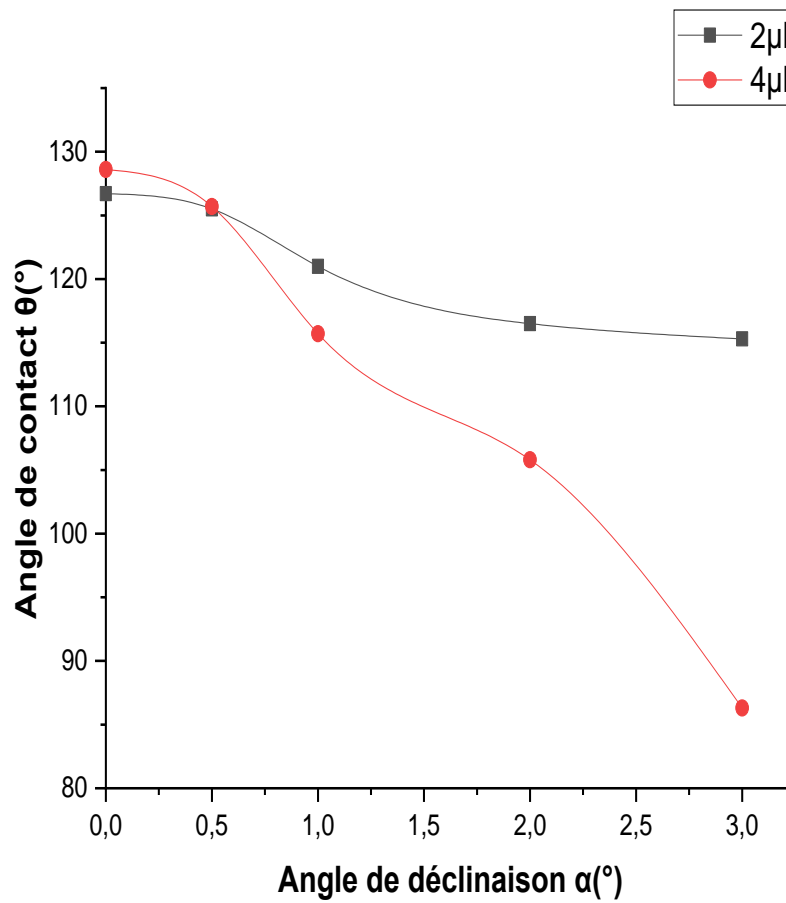


Figure IV-5 Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α , pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vierge de la surface de la porcelaine recouverte de suie.

Tableau IV-6 : Angle de contact θ et indice d'hydrophobicité IH en fonction de l'angle de déclinaison α , pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vieilli de la surface de la porcelaine recouverte de suie.

	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH
2 μ l	0	116.8	1	0.5	116	1	1	114	1	2	110.4	1	3	105.7	1
4 μ l	0	129.8	1	0.5	129.1	1	1	128	1	2	123.9	1	3	105.7	1

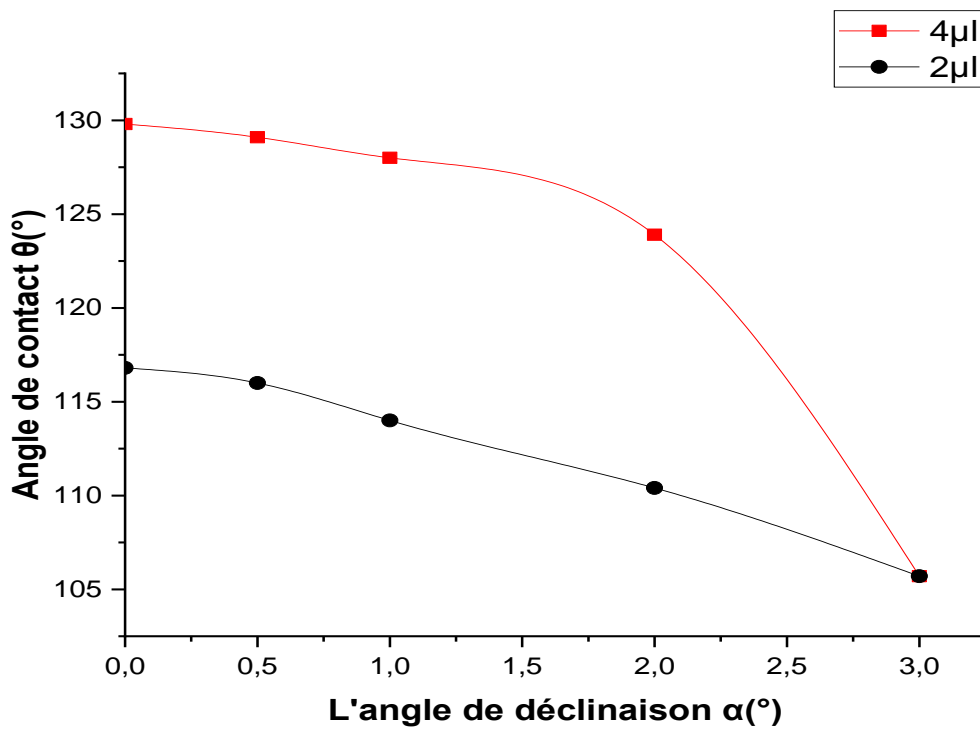


Figure IV-6 Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α , pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vieilli de la surface de la porcelaine recouverte de suie.

Tableau IV-7 : Angle de contact θ et indice d'hydrophobicité IH en fonction de l'angle de déclinaison α , pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vieilli sous pollution humide conductrice à $\sigma = 2\text{mS/cm}$, de la surface de la porcelaine recouverte de suie.

	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	IH
2 μl	0	93.3	1	0.5	82.2	1	1	78.8	2	1.5	69.4	2
4 μl	0	104.6	1	0.5	96.3	1	1	89.1	1	1.5	81.7	1

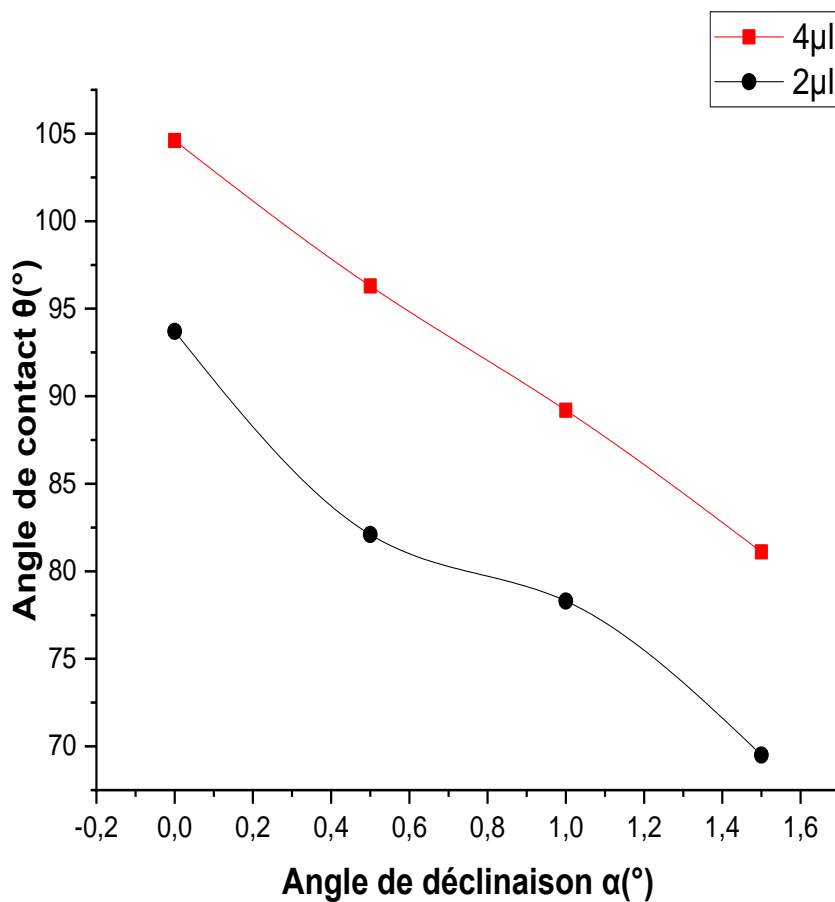


Figure IV-7 Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α , pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vieilli sous pollution humide conductrice à $\sigma = 2\text{mS/cm}$, de la surface de la porcelaine recouverte de suie.

Tableau IV-8 : Angle de contact θ et indice d'hydrophobicité IH en fonction de l'angle de déclinaison α , pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vieilli sous pollution humide conductrice à $\sigma = 5 \text{ mS/cm}$, de la surface de la porcelaine recouverte de suie.

	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	HI	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	HI	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	HI	$\alpha(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	HI
2 μl	0	83.3	1	0.5	76.9	2	1	68.4	2	1.5	60.1	2
4 μl	0	94.3	1	0.5	85.8	1	1	74.7	2	1.5	68.2	2

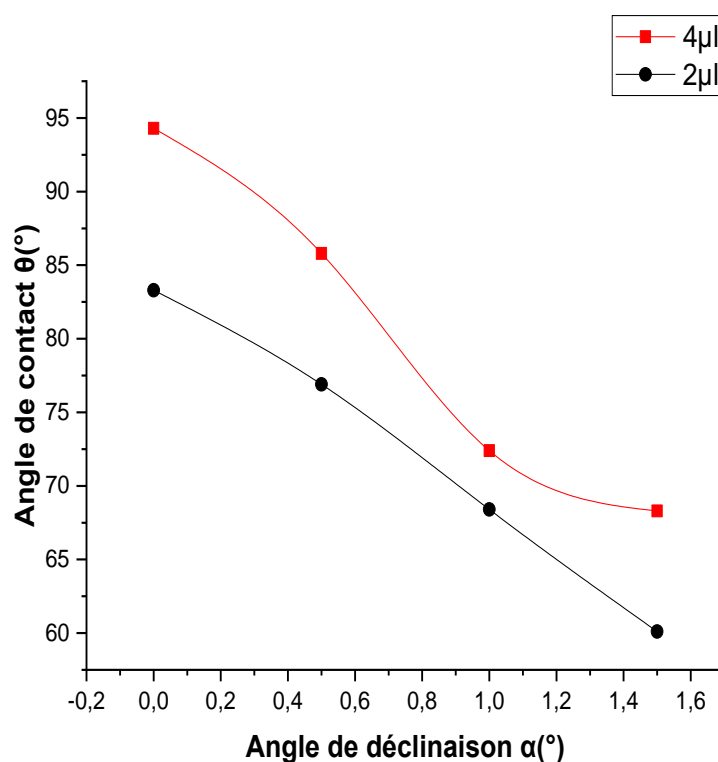


Figure IV-8 Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α , pour différents volumes de la goutte, dans le cas de l'état vieilli sous pollution humide conductrice à $\sigma = 5 \text{ mS/cm}$, de la surface de la porcelaine recouverte de suie.

Tableau IV-9 : Angle de contact θ en fonction de l'angle déclinasion α pour un volume de la goutte de $2 \mu\text{l}$.

θ \ A	A	B	c	d	E	f	G	H
0	0	5	0	0	126.7	116.8	93.3	83.3
0.5	0		0	0	125.5	116	82.2	76.9
1	0		0	0	121	114	78.8	68.4
2	0		0	0	116.5	110.4	69.4	60.1
3	0		0	0	115.3	105.7		
10	0	6.3	0	0				
12	0	8.2	0	0				
14	0	11.2	0	0				
16	0	11.8	0	0				

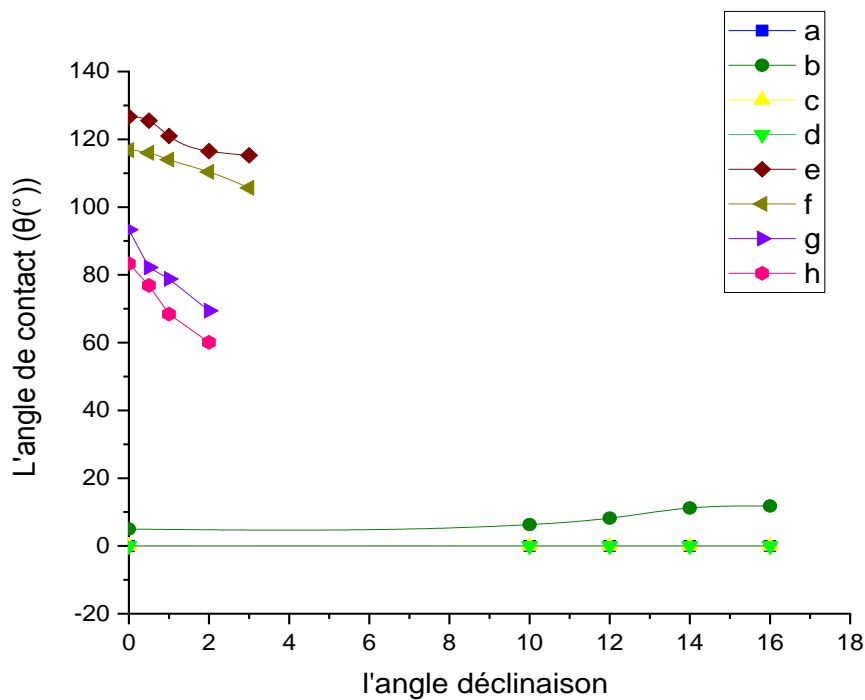


Figure IV-9 angle de contact θ en fonction de l'angle déclinasion α pour un volume de la goutte de $2 \mu\text{l}$.

Tableau IV-10 : Angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour un volume de la goutte de $4\mu\text{l}$.

θ \ α	A	B	C	D	E	F	G		h
0	0	6.3	0	0	128.6	129.8	104.6		94.3
0.5	0		0	0	125.7	129.3	96.3		85.8
1	0		0	0	115.7	128	89.1		74.7
2	0		0	0	105.8	123.9	81.7		68.2
3	0		0	0	86.3	105.7			
10	0	7.1	0	0					
12	0	9.8	0	0					

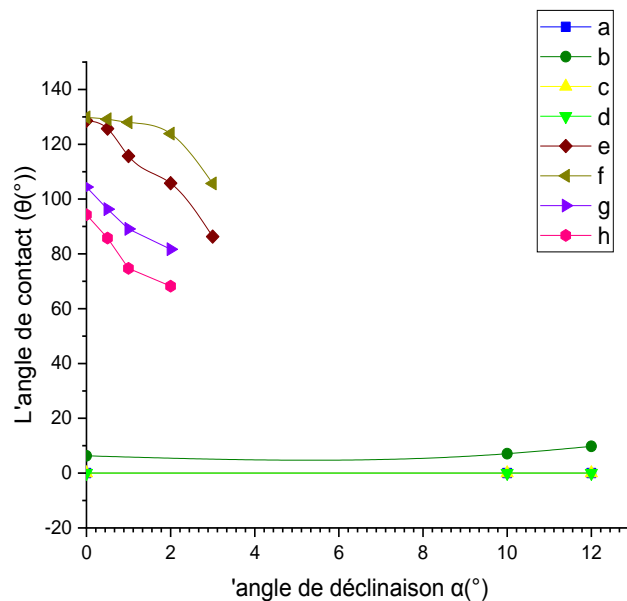


Figure IV-10 angle de contact θ en fonction de l'angle de déclinaison α pour un volume de la goutte de $4\mu\text{l}$.

Tableau IV-11 : Angle de contact θ en fonction du volume de la goutte d'eau à $\alpha=0^\circ$.

2 μ l	0	5	0	0	126.7	116.8	93.3	83.3
4 μ l	0	6.3	0	0	128.6	129.8	104.6	94.3

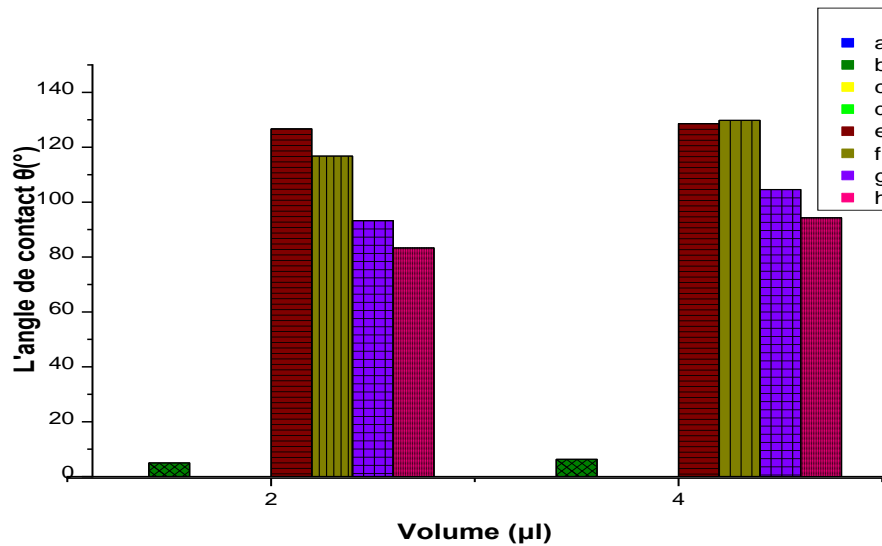


Figure IV-11 Histogramme de l'angle de contact θ en fonction du volume de la goutte à $\alpha = 0^\circ$.

a : Etat vierge de la surface propre de porcelaine sans suie.

b : Etat vieilli de la surface propre de porcelaine sans suie.

c : Etat vieilli de la surface polluée de porcelaine sans suie à $\sigma = 2\text{mS/cm}$.

d : Etat vieilli de la surface polluée de porcelaine sans suie à $\sigma = 5\text{mS/cm}$.

e : Etat de la surface propre (sans pollution humide) de porcelaine vierge recouvert de suie.

f : Etat de la surface propre (sans pollution humide) de porcelaine vieillie recouverte de suie.

j : Etat de surface de porcelaine recouverte de suie et vieilli sous pollution humide à $\sigma = 2\text{mS/cm}$.

h :Etat de surface de porcelaine recouverte de suie et vieilli sous pollution humide à $\sigma = 5\text{mS/cm}$.

Tableau IV-12 : Angle de contact θ en fonction du volume de la goutte d'eau à la limite de α d'éjection (glissement de la goutte sur la surface de la porcelaine).

Echantillon	a	b	C	d	E	F	g	H
Volume								

2 μ l	0	11.8	0	0	115.3	105.7	69.4	60.1
4 μ l	0	9.8	0	0	86.3	105.7	81.7	68.2

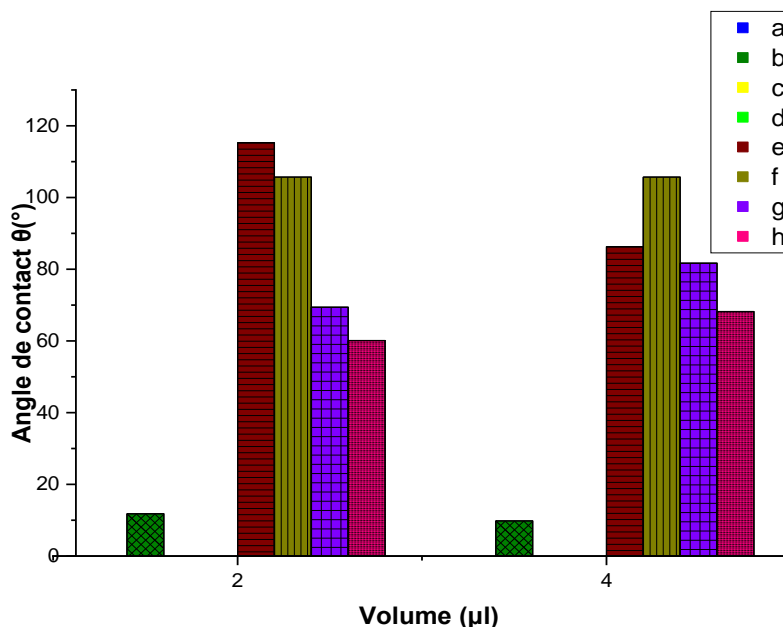


Figure IV-12 Histogramme de l'angle de contact θ en fonction du volume de la goutte à la limite de α d'éjection (glissement/roulement de la goutte sur la surface de la porcelaine).

➤ **Effet de la couche de suie couvrant la plaque de porcelaine sur l'angle de contact θ :**

Les résultats de mesures donnés par les tableaux **IV.1** à **IV.8** et les figures **IV.1** à **IV.10** montrent que :

- **La porcelaine sans suie** présente une surface superhydrophile, attesté par un angle de contact $\theta=0$ dans le cas d'un état vierge de celle-ci et vieillie sous pollution humide conductrice à $\sigma=2$ mS/cm et $\sigma=5$ mS/cm (Voir les tableaux **IV.1**, **IV.3**, **IV.4** et les figures **IV.1**, **IV.3**, **IV.4**). Par contre, la porcelaine sans suie, vieillie à sec, présente un aspect de surface hydrophile attesté par des petits angles de contact θ limités à $9,8^\circ$ (voir tableau **IV.2** et figure **IV.2**).

Le revêtement de la surface de la porcelaine avec de la suie confère à celle-ci un aspect super hydrophobe (voir les tableaux **IV.5**, **IV.6**, **IV.7**, **IV.8** et les figures **IV.5**, **IV.6**, **IV.7**, **IV.8**).

L'adduction de la couche de suie a transformé l'état de surface de la porcelaine d'un aspect super hydrophile à un aspect super hydrophobe.

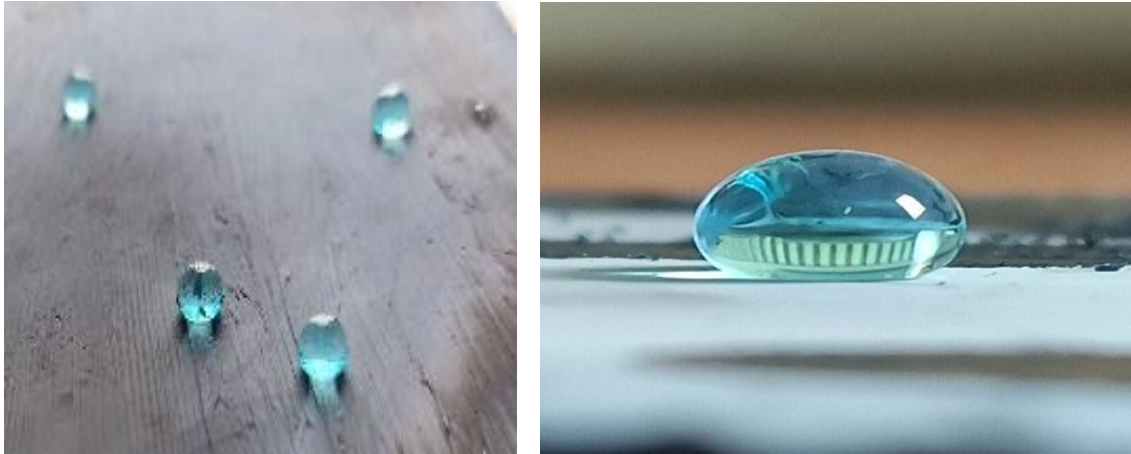


Figure IV-13 Photos des gouttes d'eau sur un échantillon de porcelaine recouvert de suie.

Effet de la déclinaison α de la surface de la plaque de porcelaine sur l'angle de contact θ en fonction de l'état de cette surface : les résultats de mesures des cas de la porcelaine sans suie relatifs aux tableaux (IV.1, IV.3, IV.4), affiche un angle de contact $\theta=0$, quel que soit l'angle de déclinaison α . Par contre, dans le cas de la surface de la porcelaine sans suie vieillie à sec (tableau IV.2), l'angle de contact θ augmente à mesure que l'angle de déclinaison α augmente, tout en gardant des valeurs très faibles, ce qui attribue à la surface un aspect hydrophile.

- **La porcelaine recouverte de suie** présente un aspect de surface hydrophobe à superhydrophobe selon le cas considéré. Quel que soit l'état de la surface de l'échantillon, les résultats de mesure relevés dans les tableaux (IV.5, IV.6, IV.7, IV.8) et traduits par les différentes caractéristiques illustrées par les figures (IV.5, IV.6, IV.7, IV.8), montrent que l'angle de contact θ diminue à mesure que l'angle de déclinaison α augmente. Le matériau garde son aspect hydrophobe jusqu'à l'éviction de la goutte, sauf pour les échantillons vieilliss sous pollution (à $\sigma=2$ mS/cm et $\sigma=5$ mS/cm) qui perdent leur hydrophobie en augmentant l'angle de déclinaison α .

➤ **Effet du volume des gouttes d'eau posées sur la surface de la plaque de porcelaine**
Nous avons considéré, dans cette étude, des volumes de gouttes très petits ($2\mu\text{l}$ et $4\mu\text{l}$), pour simuler un dépôt de rosée fine (par condensation) sur les surfaces des isolateurs en porcelaine.

- **Dans le cas de la porcelaine sans suie :**

Selon les résultats inscrits dans les tableaux (IV.1, IV.3, IV.4) correspondant aux états vierge et vieilli sous pollution, et selon les caractéristiques relatives tracées sur les figures (IV.1,

IV.3, IV4), la surface de la porcelaine a un aspect super-hydrophile, vu qu'elle présente une mouillabilité totale lors du dépôt de la goutte d'eau sur sa surface (la goutte s'étale), voir les figures (IV.11, IV.12 et VI. 13).

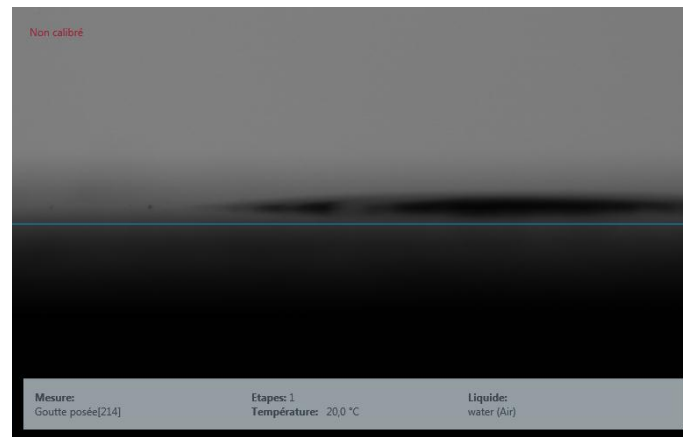


Figure IV-14 photo prise par Drop Shape Analyzer DSA30 KRÜSS GmbH. Montrant la goutte qui s'étalée sur la porcelaine.

Cependant, les résultats de mesure sur la porcelaine sans suie vieillie à sec (tableau IV.2 IV.11 et IV.12, et figure IV.2) ont révélé un angle de contact θ faible, qui augmente avec l'augmentation de l'angle de déclinaison de la surface de l'échantillon ; car à mesure que l'angle de déclinaison α s'accroît, la goutte se déplace sur la surface en adoptant un front de plus en plus arrondi, ce qui se manifeste par des angles de contact θ plus importants. Par conséquent, lorsque le volume de la goutte augmente, le rayon de son front augmente également, donc θ aussi. Ce comportement de la goutte est remis à l'effet du vieillissement à sec qui laisse des rugosités en forme de micro ou nanostructures qui empêchent la goutte de s'étaler.

- **Dans les cas de porcelaine avec suie :**

La porcelaine vierge recouverte de suie présente le même état d'hydrophobie pour les deux volumes considérés (2 μl et 4 μl) à $\alpha=0^\circ$ (Figure IV.11). Cependant, elle perd considérablement en hydrophobie quand la goutte est plus volumineuse quand α augmente (figure IV.5). Alors que pour les surfaces vieillies, aussi bien à sec que sous pollution humide (figure IV.6, IV.7 et IV.8), plus le volume de la goutte est grand, plus les angles de contact θ sont importants, (voir la figure IV.11 et IV.12). Ceci pourrait s'expliquer par le fait qu'à l'état vierge, à mesure que l'angle de déclinaison α augmente, la goutte a tendance à rouler sur la surface en amassant des particules de suie qui se collent à son front, déformant ainsi sa forme arrondie, ce qui se traduit par des angles de contact θ moins importants, et c'est pourquoi lorsque le volume de celle-ci augmente, la déformation de son front est plus

intensifiée sous l'effet du poids, d'où la chute de l'angle de contact θ inversant ainsi l'ordre par rapport au volume de la goutte. Alors qu'à l'état vieilli de la surface, les nano particules formées amoindrissent cette déformation (voir l'explication donnée ci-dessus pour le cas sans suie).

L'augmentation du volume de la goutte (de 2 à 4 μl) n'affecte pas beaucoup l'angle d'éviction $\alpha_{\text{éviction}}$ de la goutte, ce dernier reste quasi-similaire, ou diminue de manière insignifiante, car la goutte glisse (ou roule, selon le cas considéré) sous l'effet de son poids.

Tableau IV-13 : Angle d'éviction de la goutte.

Etat de surface		Porcelaine sans suie				Porcelaine avec suie			
		vierge	Vieilli à sec	Vieilli avec pollution à $\sigma = 2mS$	Vieilli avec pollution à $\sigma = 5mS$	vierge	Vieilli à sec	Vieilli avec pollution à $\sigma = 2mS$	Vieilli avec pollution à $\sigma = 5mS$
Angle d'éviction $\alpha_{\text{éviction}}$	2 μl	0	17	0	0	4	4	2	2
	4 μl	0	13	0	0	3.5	4	2	2

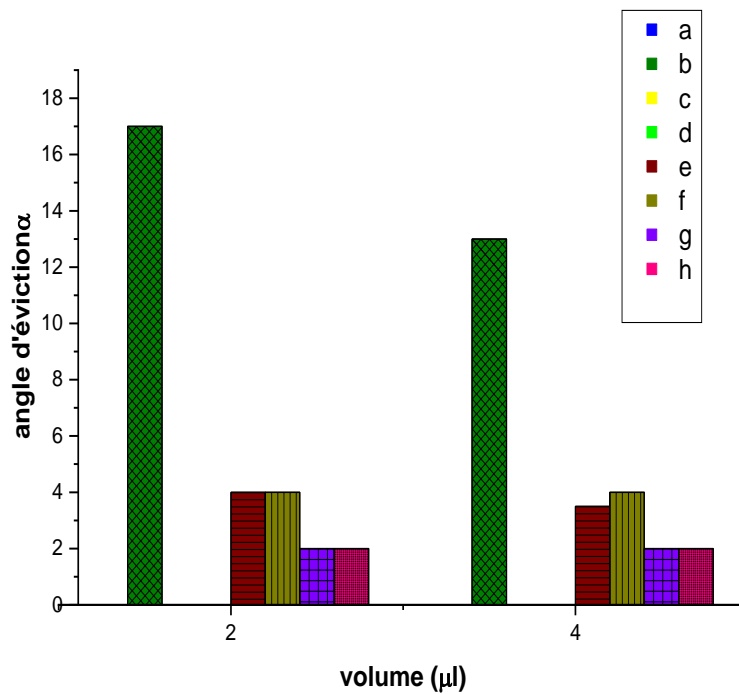


Figure IV-15 Histogramme de l'angle d'éviction de la goutte α (éviction) en fonction.

Effet du vieillissement et de la conductivité de la solution polluante

Le vieillissement sous pollution humide conductrice affecte l'hydrophobie de la porcelaine, et encore plus avec l'augmentation de la conductivité de la solution polluante. L'angle de contact θ diminue par rapport à l'état vierge dans le cas d'une surface revêtue de suie. A l'inverse, le vieillissement à sec, pour la porcelaine sans et avec suie, améliore l'hydrophobie de celle-ci en raison des nano structure formées, (figure IV.11).

IV.3 présentation, interprétation et discussion des résultats d'essais électriques

IV.3.1 Mesure de la rigidité diélectrique longitudinale

Tableau IV-14 : La rigidité diélectrique longitudinale E_l de porcelaine.

	Etat de surface de l'échantillon	E_l (kV/cm)
a	porcelaine vierge propre.	16.73
b	porcelaine vieillie à sec.	15.52
c	porcelaine vieillie sous pollution à $\sigma = 2\text{mS}$.	11.55
d	porcelaine vieillie sous pollution à $\sigma = 5\text{mS}$.	9.56
e	porcelaine vierge avec la suie.	18.38
f	porcelaine avec la suie vieillie à sec.	17.37
g	Porcelaine avec la suie vieillie sous pollution à $\sigma = 2\text{mS}$	14.14
H	Porcelaine avec la suie vieillie sous pollution à $\sigma = 5\text{mS}$.	12.02

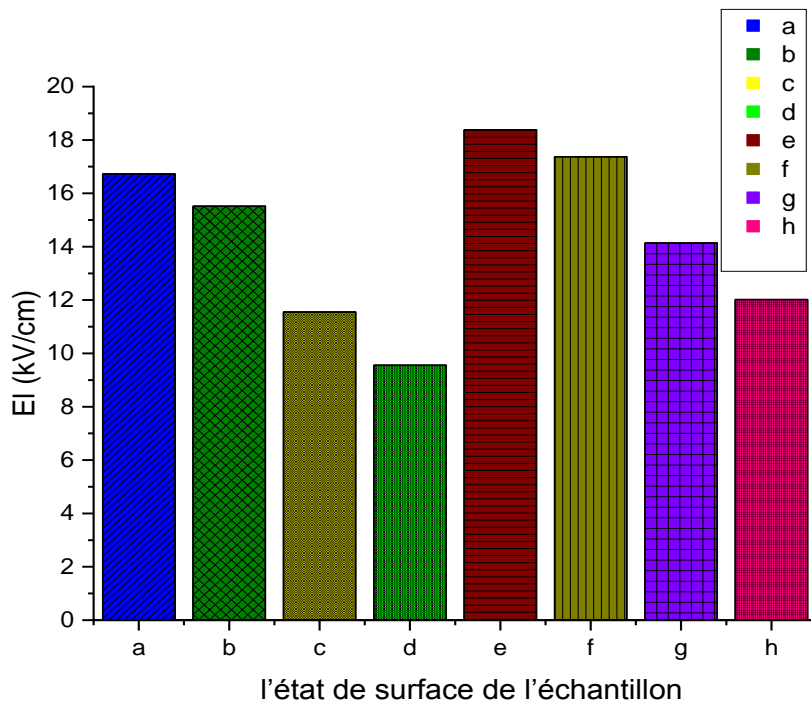


Figure IV-16 Histogramme de la rigidité diélectrique longitudinale E_l (kV/cm) de la porcelaine en fonction de l'état de surface de l'échantillon.

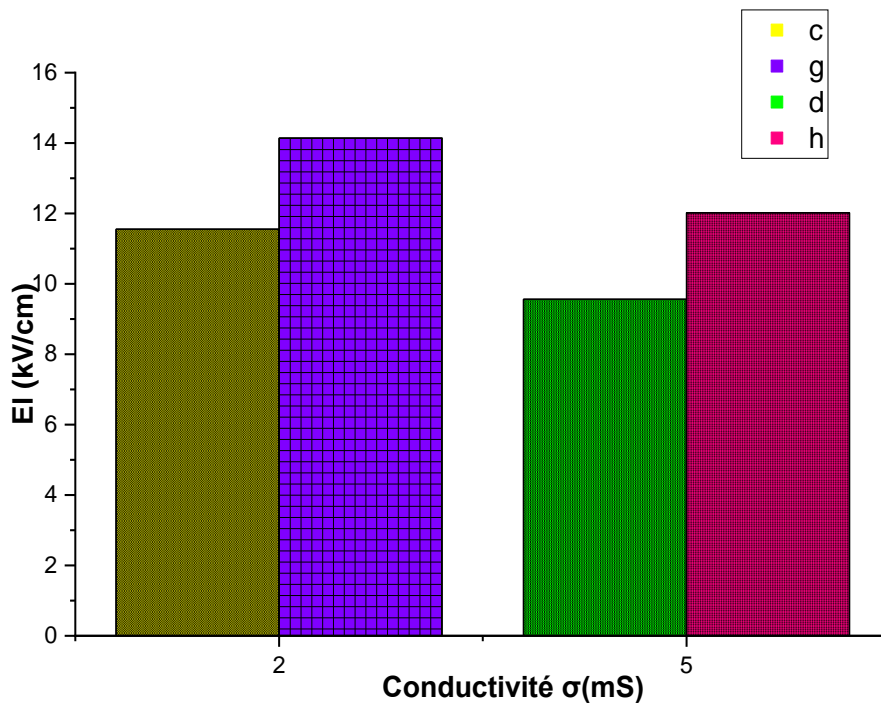


Figure IV-17 Histogramme de la rigidité diélectrique longitudinale E_l (kV/cm) de porcelaine en fonction de la conductivité de la pollution ($\sigma = 2mS$ et $\sigma = 5mS$).

À l'état vierge, avec et sans suie, la porcelaine présente une bonne rigidité diélectrique longitudinale. Cependant, en présence de la pollution, la porcelaine voit ses performances diminuer progressivement à mesure que la conductivité des polluants déposés augmente (figure IV.15 et IV.16).

Le vieillissement électrique du matériau en porcelaine entraîne une diminution de sa rigidité diélectrique longitudinale, qui est plus prononcée avec l'augmentation de la conductivité de la couche polluante (figure IV.15 et IV.16). Ceci pourrait s'expliquer comme suit :

Aussi bien dans le cas avec ou sans suie, la décharge glissante résultant de l'application d'un champ électrique provoque la dégradation de la surface du matériau, laissant des traces microscopiques, qui deviennent plus profondes avec l'augmentation de la conductivité de la couche polluante. La contrainte thermique associée à la décharge est intensifiée par le dépôt de pollution conductrice, ce qui favorise la carbonisation en surface de ces derniers, le dépôt de carbone laissé derrière la décharge augmente la conductivité de surface du matériau, ce qui accentue la dégradation de la rigidité diélectrique longitudinale.

En plus de lui conférer un caractère superhydrophobe, l'ajout d'une couche de suie à la surface de la porcelaine, a pour avantage d'améliorer sa rigidité diélectrique longitudinale relativement au cas sans suie (figure IV.15). Ceci pourrait s'expliquer par l'absorption de l'énergie de décharge par la couche de suie.

IV.3.2 Mesure du facteur de perte et de la capacité du matériau

Tableau IV-15 : Variation du facteur de perte $\text{tg}\delta$ et de la capacité C_x de la porcelaine.

Mesure électrique Echantillon	$C_x(\text{pF})$	$\text{Tg}\delta$
Vierge	15.0914	9×10^{-4}
Vieilli	14.813	9.4×10^{-4}
pollué à 2mS/cm	14.316	1.002×10^{-3}
pollué à 5mS/cm	13.89	1.297×10^{-3}

Le tableau (IV.15) illustre la variation du facteur de perte $tg\delta$ et de la capacité C_x de la porcelaine en fonction de l'état de surface. Nous remarquons que le vieillissement électrique du matériau sans suie résulte une augmentation du facteur de pertes qui est plus marquée avec l'augmentation de la conductivité de la couche polluante.

Donc le vieillissement électrique et la pollution déposée sur l'isolateur influent négativement sur les performances électriques de l'isolateur en porcelaine, ce qui signifie que ce dernier présenterait dans ce cas de figure une grande dissipation d'énergie sous l'effet d'un champ électrique appliqué en présence d'un dépôt de pollution.

IV.3.3 Calcul de la permittivité électrique ϵ_r et de l'indice de perte $\epsilon_r.tg\delta$

Les valeurs des permittivités électriques relatives ϵ_r et de l'indice de perte $\epsilon_r.tg\delta$ à l'état vierge, vieilli, vieilli sous pollution à 2mS/cm et 5mS/cm de la porcelaine, calculées pour une tension de 100kV et une fréquence de 50Hz sont représentées sur le tableau (IV.16)

Tableau IV-16 : Permittivité électrique relative et indice de perte calculés.

	Permittivité ϵ_r	l'indice de perte $\epsilon_r.tg(\delta)$
porcelaine vierge propre	6.82	6.138×10^{-3}
porcelaine vieillie à sec	6.69	6.288×10^{-3}
porcelaine vieillie sous pollution à $\sigma = 2mS$.	6.47	6.4829×10^{-3}
porcelaine vieillie sous pollution à $\sigma = 5mS$.	6.278	8.142×10^{-3}

Le tableau (IV.16) illustre la variation de l'indice de perte $\epsilon_r.tg(\delta)$ et de la permittivité de la porcelaine en fonction de l'état de surface. Nous remarquons que l'indice de perte augmente lorsque le matériau subit un vieillissement électrique. Le vieillissement à sec et sous pollution conductrice affecte les propriétés diélectriques de la porcelaine, ce qui se traduit par une augmentation des pertes diélectriques, par conséquent une augmentation de l'indice de perte.

IV.4 Présentation et discussion des résultats des analyses chimiques

IV.4.1 Analyse par fluorescence des rayons X (FRX)

L'analyse par fluorescence X pour les différents échantillons analysés de porcelaine effectuée par un spectromètre de fluorescence des Rayons X, modèle (Sci Aps X-200) nous a permis de déterminer sa composition chimique. Les résultats obtenus sont portés dans le tableau (IV.17).

Tableau IV-17 : Composition chimiques des échantillons de porcelaine.

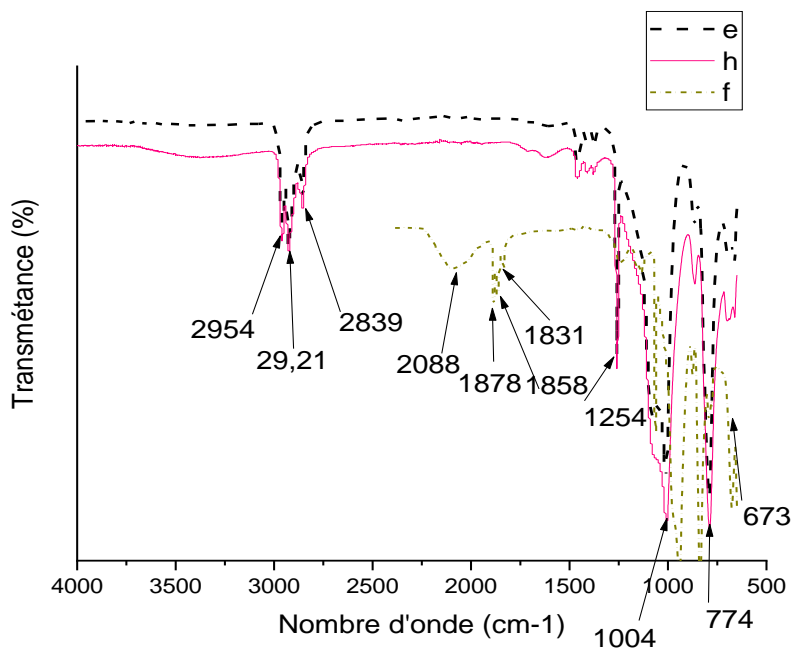
Eléments (%)	Porcelaine vierge	Porcelaine avec suie	Porcelaine avec suie vieille sous pollution à $\sigma = 5\text{mS/cm}$
E.L (Léger)	47.61	38.8	35.41
Al (Aluminium)	3.28	0.64	0.575
Si (Silicone)	30.90	53.22	55.66
K (Potassium)	1.48	0.096	0.116
Ca (Calcium)	8.95	0.917	1.21
Ti (Titane)	0.041	0.641	0.542
Cr (chrome)	0.161	0.036	0.057
Fe (fer)	0.226	0.115	0.144
CO (cobalt)	0.033	0.009	0.014
Cu (Cuivre)	0.003	0.003	/
Zn (Zinc)	5.08	3.76	4.19
Rb (Rubidium)	0.007	0.006	0.007
Sr (Strontium)	0.01	0.009	0.009
Y (yttrium)	0.01	0.008	0.008
Zr (Zirconium)	2.19	1.7	2
MO (molybdène)	0.006	0.005	0.006
Pb (plomb)	0.01	0.007	0.006
S (soufre)	/	0.023	0.043

D'après les résultats présentés dans le tableau (IV.17), nous remarquons que le réseau amorphe de la porcelaine se trouve modifié quand celle-ci est revêtue de suie, ou qu'elle soit vieillie avec suie ; ceci est révélé par la modification du taux de silicium de 30,9 à 53,22 puis à 55,66 %.

Par ailleurs, les éléments légers (E. L) représentés par le taux des matières organiques et de carbone, diminue de 47,61 à 38,8 % pour la porcelaine avec suie puis diminue à 35,41% pour la porcelaine vieillie avec suie. Une diminution importante du taux de potassium (K) est notée dans la porcelaine avec suie de 1,48 à 0,096 %. Ce phénomène est remarqué aussi pour le cas du calcium (Ca) donnant une diminution de 8.95 à 0.917 % pour la porcelaine avec suie.

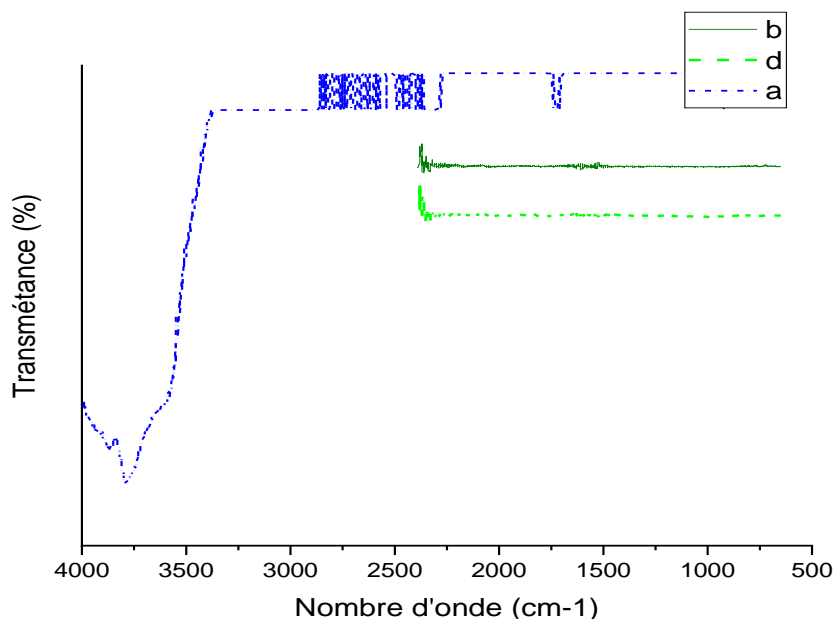
IV.4.2 Analyse par spectroscopie infrarouge a transformé de Fourier (IRTF)

Les spectres infrarouges des matériaux de départ et des matériaux préparés ont été enregistrés à l'aide d'un spectrophotomètre de modèle (NicoletTM IS50 FTIR) dans la plage spectrale de 4000 à 400 cm^{-1} en utilisant le mode ATR (réflexion totale atténuée). Les spectres sont présentés sur la figure (IV.18) :



(a)

Figure IV-18 Spectre FTIR des échantillons (vierge avec suie et vieillie avec suie, vieillie avec suie sous pollution 5mS/cm).a et b



(b)

Figure IV-19 Spectre FTIR des échantillons (vierge, vieilli à sac et vieilli sous pollution 5mS/cm).

Les spectres FTIR relatifs aux différents échantillons avec suie et avec ou sans pollutions sont représentés sur la figure (IV.18). D'après ces spectres, nous remarquons la présence de deux domaines distincts : le premier domaine démarrant de 4000 à 1500 cm^{-1} relative aux groupements hydroxyles (O-H) et les groupements liés aux liaisons (C-H et C-O, C=O, C=C) ; le second domaine, allant de 1600 jusqu'à 500 cm^{-1} ; relatif à l'empreinte digitale du composé et des différents groupements caractérisant les liaisons structurales liés généralement au porcelaine (Si-O, Al-O, etc...). Ainsi, nous remarquons la présence des bandes très larges situés entre 943 et 1011 cm^{-1} ; elles sont attribuées à la liaison Si-O relative au porcelaine. Cependant, la pollution a fait apparaître deux bandes larges à 3430 et 2900 cm^{-1} pour les échantillons ; elles sont attribuées à la présence de groupement hydroxyles des O-H externes caractérisant les liaisons CH₂ et CH₃.

L'application de la suie sur la porcelaine a fait apparaître plusieurs bandes caractérisant les liaisons des composés organiques composant la suie ; par ailleurs, l'influence de vieillissement et de la pollution sur la suie associée au porcelaine se laisse apparaître par la présence accentuée de nouvelles bandes de vibration. D'après les différents spectres des échantillons (porcelaine vieilli avec suie, porcelaine avec suie vieilli sous pollution) nous remarquons la présence des pics caractérisant les groupements fonctionnels à 2968, 2913 et

2866 cm^{-1} des liaisons CH₂ et CH₃ respectivement ; relatifs aux cycles aliphatiques de la suie. Ces pics sont beaucoup plus intenses quand les échantillons ne sont pas soumis à la pollution. D'autres part, au fur et à mesure que la pollution est accentuée, de larges bandes apparaissent vers 3430 cm^{-1} qui sont attribuées à la présence des OH externes indiquant la présence d'eau (H-O-H). De l'autre côté des différents spectres (1600-500 cm^{-1}), plusieurs bandes intenses apparaissent, elles sont attribuées aux différents cycles aromatiques composant la suie. Les bandes remarquées à 1470 cm^{-1} sont attribuées aux groupements fonctionnels des liaisons C-H des cycles aliphatiques CH₂ et CH₃, ces pics sont beaucoup plus intenses à mesure que la pollution augmente. D'autres parts, on remarque la présence d'une large bande à 1650 cm^{-1} , elle est attribuée à la présence de cycles aromatiques C-C, C-H et C-O-C. La structure du verre est très influencée par la présence de la suie et de la pollution, nous le remarquons par la présence et l'élargissement des pics à 991 cm^{-1} , relatif à la liaison Si-O.

L'application de la suie sur la porcelaine a fait apparaître plusieurs bandes caractérisant les liaisons des composés organiques composant la suie ; par ailleurs, l'influence de la suie associée au porcelaine se laisse apparaître par la présence accentuée de nouvelles bandes de vibration. D'après les différents spectres des échantillons, nous remarquons la présence des pics caractérisant les groupements fonctionnels à 2962, 2932 et 2859 cm^{-1} des liaisons CH₂ et CH₃ respectivement ; relatifs aux cycles aliphatiques de la suie. Ces pics sont inexistantes quand les échantillons ne sont pas vieillis à la suie et ils sont absents dans la porcelaine vierge. D'autres part, au fur et à mesure que la porcelaine est vieilli et vieilli avec suie, de larges bandes apparaissent vers 3430 cm^{-1} qui sont attribuées à la présence des OH externes indiquant la présence d'eau (H-O-H). De l'autre côté des différents spectres (1600-500 cm^{-1}), plusieurs bandes intenses apparaissent, elles sont attribuées aux différents cycles aromatiques composant la suie. Les bandes remarquées à 1470 cm^{-1} sont attribuées aux groupements fonctionnels des liaisons C-H des cycles aliphatiques CH₂ et CH₃, ces pics sont beaucoup plus intenses à mesure que la pollution augmente. D'autres part, on remarque la présence d'une large bande à 1650 cm^{-1} , elle est attribuée à la présence de cycles aromatiques C-C, C-H et C-O-C. La structure de la porcelaine est très influencée par la présence de la suie, nous le remarquons par la présence et l'élargissement des pics à 991 cm^{-1} , relatif à la liaison Si-O. La structure de la porcelaine est beaucoup plus influencée quand il est vieilli avec suie que quand il est vieilli seulement.

IV.4.3 Analyse par diffractogramme des rayons X des différentes porcelaines

Les spectres diffractogramme des échantillons sont enregistrés à l'aide d'un diffractomètre à poudre D8 Advance-BRUKER AXS. Il possède une géométrie de type Bragg–Brentano, par le rayonnement de fluorescence de certains éléments, tel que le fer. Les spectres RX ont été enregistrés en 2θ entre 5° et 60° . les spectres sont présentés sur les figures (IV.19 et IV.20) :

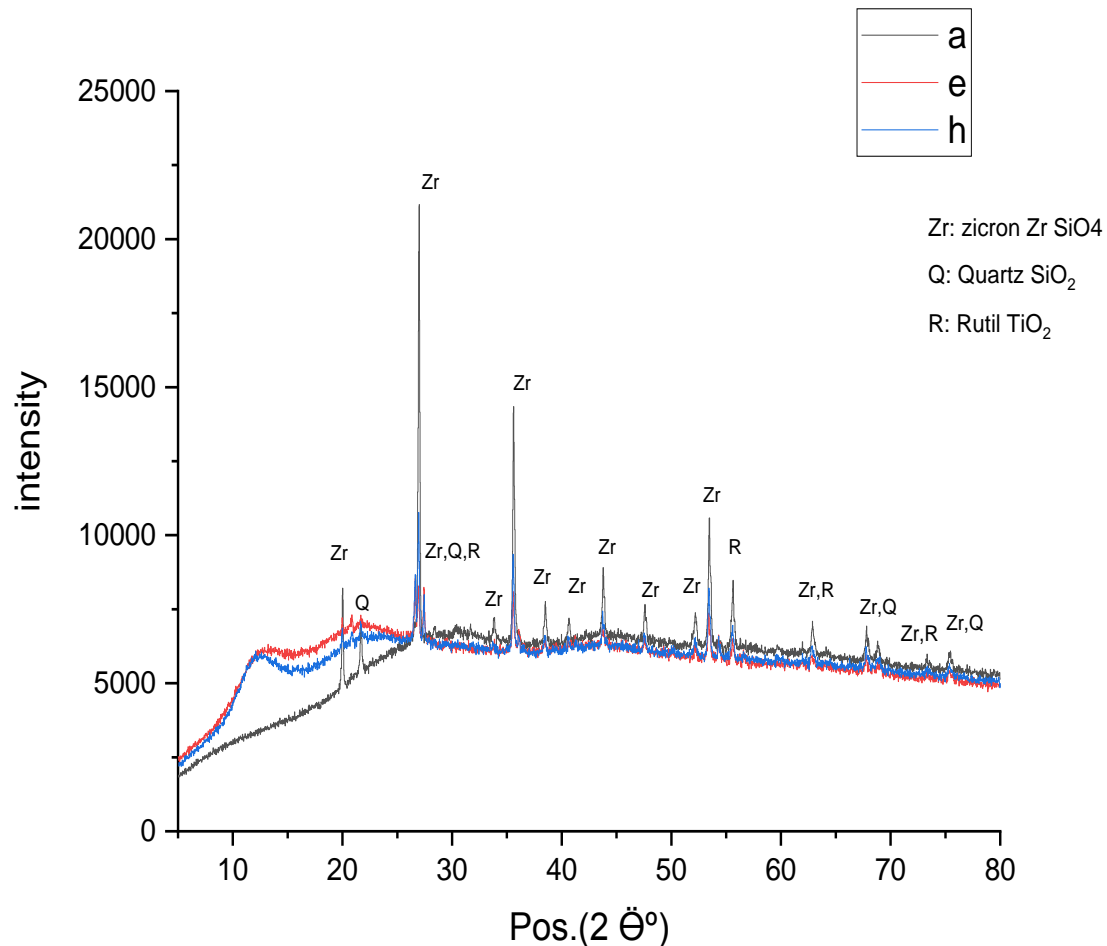


Figure IV-20 Diffractogramme des rayons X des différentes porcelaines.

Les résultats obtenus pour les trois (03) échantillons de porcelaine (a, e et h) sont étudiés et rapportés par la figure IV.19 et qui a mis en évidence la présence des minéraux suivants :

- Le zircon ($ZrSiO_4$) comme minéral principal
- Quartz low (SiO_2), Rutile (TiO_2) en faible quantité

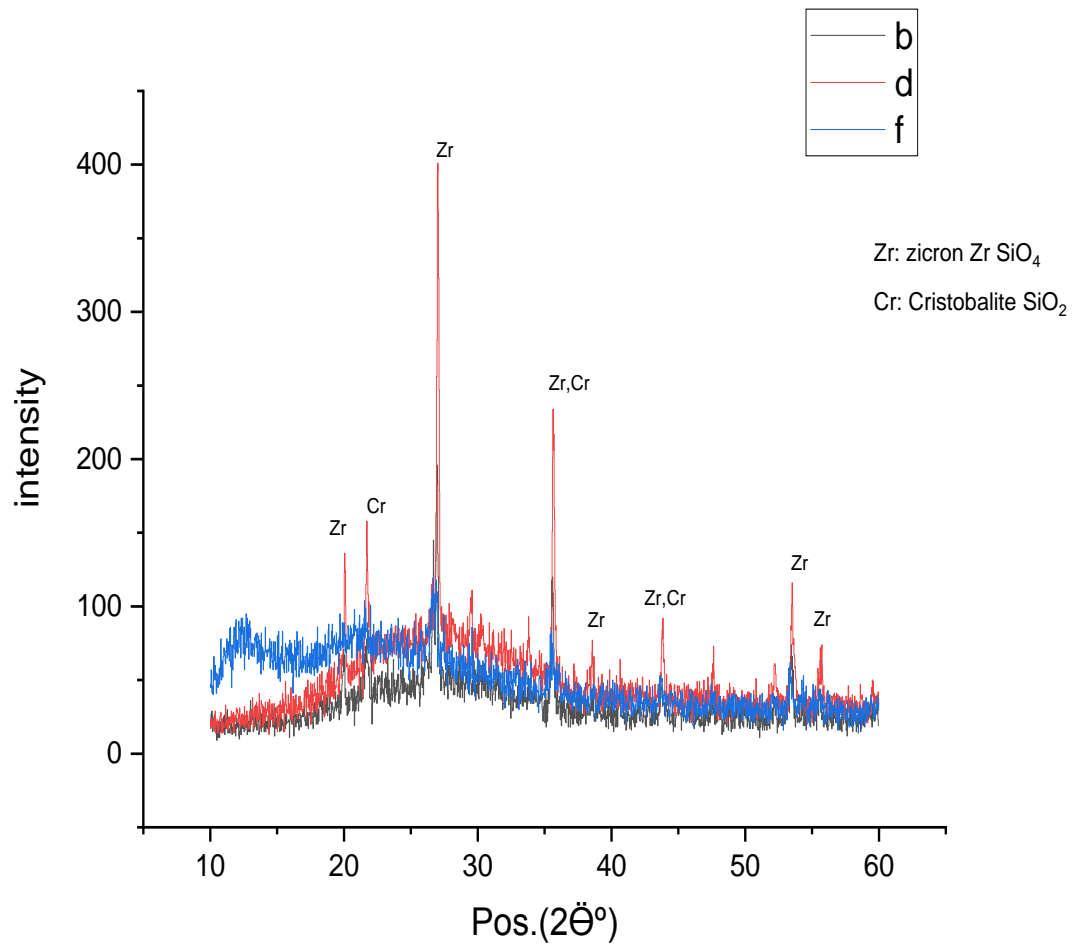


Figure IV-21 Diffractogramme des rayons X des différentes porcelaines.

Zr : zircon (Zr SiO_4)

Cr : Cristobalite (SiO_2)

IV.4.4 Analyse par photoluminescent des différentes porcelaines

La photoluminescence est le phénomène d'émission de lumière suite à la réaction d'un matériau photoluminescent sujet à une "excitation" par exposition à un rayonnement optique ultraviolet.

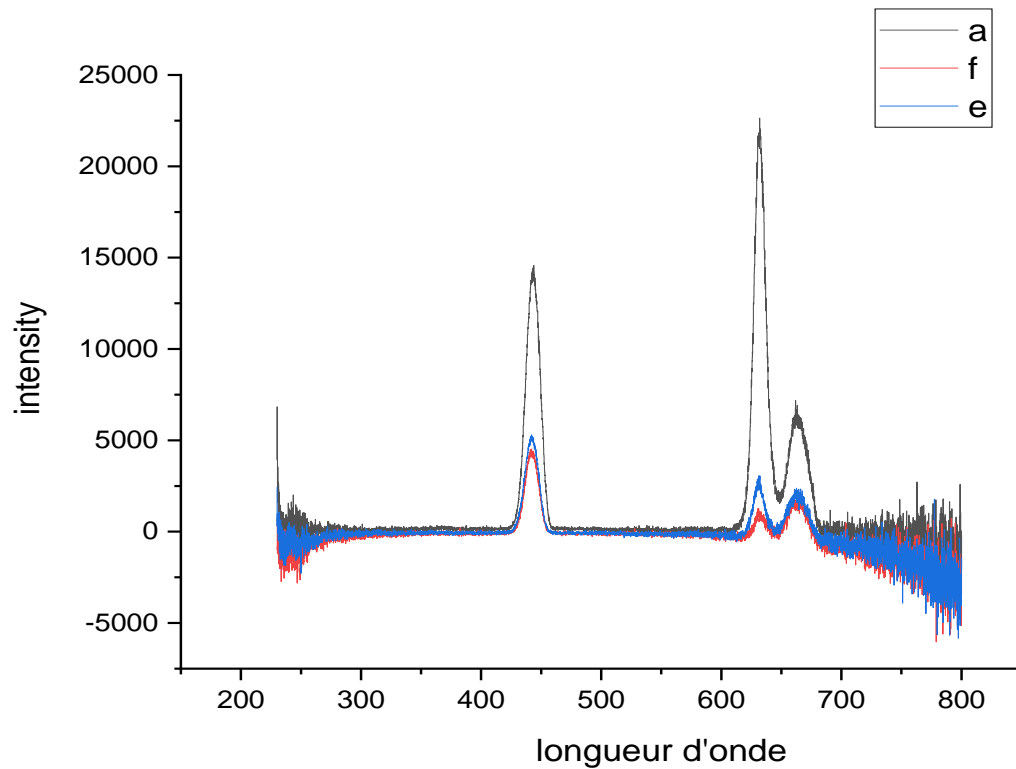


Figure IV-22 spectre d'analyse par photoluminescent.

Les deux pics observés à 440 nm et 660 nm sont des harmoniques de la longueur d'onde d'excitation ($\lambda = 220$ nm). Par contre le pic situé à 630 nm est une réponse Raman de la porcelaine, c'est-à-dire une vibration du réseau cristallin. Contrairement au verre, la porcelaine ne présente aucune émission des défauts de surface dans la gamme visible.

Les trois spectres d'émission montrent clairement que l'intensité Raman émise par l'échantillon vierge, sans vieillissement et sans suie, est nettement élevée par rapport à celles observées avant vieillissement en présence de suie (vierge avec suie) et après vieillissement en présence de suie (vieilli avec suie).

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté et discuté les résultats de notre étude qui porte sur la perte partielle ou totale de l'hydrophile /l'hydrophobie de la porcelaine revêtue ou non d'une couche de suie. Il s'agit de mesurer l'angle de contact θ d'une goutte déposée sur huit états de surface des plaques de porcelaine, avec et sans couche de suie (vierge, vieillie à sec et vieillie sous une pollution humide conductrice à $\sigma=2$ mS/cm et $\sigma=5$ mS/cm), pour différents angles d'inclinaison α de cette surface, et pour différents paramètres mis en jeu tels que : le volume de la goutte, l'état de la surface et la conductivité de la solution polluante.

Les différentes mesures et analyses réalisées au cours de cette étude nous ont permis de faire plusieurs constatations et de tirer certaines conclusions que nous résumons comme suit :

Le volume des gouttes d'eau joue un rôle déterminant dans leur comportement sur la surface isolante.

Les mesures électriques et physiques et les analyses chimiques (FTIR, FRX, DRX et photoluminescence), ont démontré que la présence de suie et de la pollution influence considérablement la structure de la porcelaine. Le vieillissement électrique dans des conditions de pollution sévère (conductivité $\sigma=5$ mS/cm) altère les propriétés électriques de la porcelaine (rigidité électrique E_d , facteur de pertes électrique $\tan\delta$, capacité C_x), mais améliore en revanche son caractère hydrophobe en rendant sa surface rugueuse. Cela entraîne une diminution de l'énergie de surface et une diminution de la zone de contact entre solide et le liquide (porcelaine et goutte d'eau). Cette observation peut être expliquée par la formation de structures nano et microscopiques lors du passage de la décharge électrique.

✓ Effet de la déclinaison α sur l'angle de contact θ :

La porcelaine sans suie présente une surface super hydrophile. Dans ce cas l'angle de contact $\theta=0^\circ$, et la déclinaison α n'a pas d'effet, sauf pour le cas de la porcelaine vieillie à sec où l'angle de contact θ augmente avec l'augmentation de l'angle de déclinaison α .

La couche de suie déposée sur la surface de la porcelaine confère au matériau un aspect superhydrophobe. Contrairement au cas précédent, l'angle de contact θ diminue avec l'angle de déclinaison α . Le matériau perd ainsi son caractère superhydrophobe, mais conserve son aspect hydrophobe, sauf pour le cas de vieillissement de la surface sous pollution humide

conductrice, où θ diminue considérablement en raison du balayage de la suie par les décharges électriques qui laissent des traces de dimensions importantes relativement à la dimension de la goutte (μl) supposée être déposée par phénomène de condensation suite à un changement thermique.

✓ **Le comportement lors de l'éviction de la goutte :**

L'éviction de la goutte se produit à des angles de déclinaison α plus importants pour la porcelaine vieillie à sec. Il est à noter que les angles d'éviction sont plus petits lorsque la couche de suie est présente.

Conclusion générale

V. Conclusion générale

L'objectif de notre étude consiste à comprendre le comportement de l'isolateur en porcelaine sous les contraintes de service, par sa caractérisation physico-chimique. Il s'agit de suivre l'évolution de son état d'hydrophile/ hydrophobie, en fonction de l'angle de déclinaison α de la surface du matériau, sous l'effet des paramètres mis en jeu, à savoir l'état de surface des échantillons de la porcelaine (vierge, vieilli à sec, vieilli sous pollution conductrice à $\sigma=2\text{mS/cm}$ et $\sigma=5\text{mS/cm}$) revêtue ou non d'une couche de suie, le volume de la goutte d'eau qui y est déposée et la conductivité de la solution polluante. Les résultats des mesures électriques (rigidité diélectrique longitudinale, facteur de perte, capacité du matériau) et physique (angles de contact) et des analyses chimiques (FTIR, FRX, DRX et la photoluminescence) sont corrélés pour atteindre notre objectif.

Des conclusions intéressantes sont tirées et sont résumées comme suit :

La porcelaine présente un aspect de surface super hydrophile. Le vieillissement à sec atténue ce caractère super hydrophile ; la décharge rend la surface rugueuse, et les nano structures formées empêchent la goutte de s'y étaler, augmentant ainsi l'angle de contact.

Le revêtement avec une couche de suie confère à la surface de la porcelaine un aspect super hydrophobe. Ce caractère est atténué lors d'un vieillissement sous pollution conductrice, car l'effet thermique qui accompagne la décharge est intensifié, et cette dernière balaye la suie sur son passage en laissant des traces plus larges sur cette surface, ce qui diminue l'angle de contact.

L'hydrophobie est améliorée avec l'augmentation du volume de la goutte d'eau dans le cas des surfaces revêtues de suie vieilles.

L'éviction de la goutte s'opère à des angles de déclinaison α petits, de la plaque de la porcelaine revêtue de suie, et à des angles plus importants pour la porcelaine vieillie à sec.

Les analyses chimiques ont révélé que la structure moléculaire de la porcelaine est très influencée par la présence de la suie, et l'action d'un champ électrique appliquée ; le vieillissement et la pollution dégrade le caractère super hydrophobe, ainsi que les propriétés électriques tels que la rigidité diélectrique longitudinale E_d et le facteur de perte $\text{tg}\delta$.

Bibliographie

VI. Bibliographie

- [1]. **REMMACHE. Saadi, OUCHENIR. Noureddine**, Mémoire de Fin d'Étude, « Etude de l'angle d'inclinaison de la goutte d'eau sur l'hydrophobicité de la surface d'une plaque de silicone vieillie sous alternative », promotion 2018/2019. U. A. M. Bejaia.
- [2]. Transport Pylône Hydro Québec
- [3]. Technique de l'ingénieur 10 février 2004.
- [4]. **D. Dumora**. « Matériaux isolants céramiques en électrotechnique, technique de l'ingénieur, D 275-1975.
- [5]. **C. Leroy**, les propriétés diélectriques de l'air et des études et recherches d'électricité de France, 1984.
- [6]. **A. CHABLOZ**, « Technologie des matériaux à l'usage des professions de l'électricité », 1986.
- [7]. **A. Simuila, L. Dascalescu et R. Tabazeon**, “breakdown on ionized air gaps in the presence of spherical conductive particle”, session 2143. 9th ISH, Graz 1995, pp. I-4.
- [8]. Site de bluestar silicones “ [http://www. Blustar silicones. Com/ silicones/ lang/ bleustar silicones / histoire](http://www.Blustar.com/silicones/lang/bleustarsilicones/histoire). Consulte le 22/04/2023.
- [9]. **J. Lieault**, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, Saint Étienne, 1999.
- [10]. **E. Carlstrom et R. Carlsson**, A fractographic study of electrical porcelains containing alumina, Journal de physique, 1986.
- [11]. **P. W. Olupot et al**, Characterization of Feldspar and Quartz Raw Materials in Uganda for Manufacture of Electrical Porcelains. Aust. Ceram. Soc, 2006.
- [12]. **P. Ramaswamy et al**, Significance of structure–property relationship in alumina based porcelain insulators to achieve quality, Bull. Mater. Sci, 2005.
- [13]. **I. Stubna et al**, Thermomechanical analysis of quartz porcelain in temperature cycles, Ceramics international, 2007
- [14]. **J. Denape**, Céramiques à usages mécaniques et thermomécaniques, Techniques de l'ingénieur, A 2010.
- [15]. **M. Lavalou**, C.A.R.M.A, Les céramiques industrielles, France 1999.
- [16]. “Characterization and Distribution of Water-repellent, Self-cleaning Plant Surfaces”, Neinhuis, C. Barthlott, W., Ann. Botan. (1997), 79, 667-677.
- [17]. **D. Quéré**, “ Lois du mouillage et de l'imprégnation, “ Tech. Ing, vol. Principe de formulation, no j2140, 2003
- [18]. **Ouadfel Lyes et Ait Abdelmalk Nassim** « Etude du vieillissement sur l'angle de déclinaison optimal d'une surface superhydrophobe » mémoire fine d'étude master 2 promotion 2021/2022.

- [19]. http://www.mineralogie.fr/Structure_Matiere.html
- [20]. **R. N. Wenzel**, “Resistance of solid surfaces to wetting by water”, *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 28, no. 8, pp. 988-994, 1936.
- [21]. **A. Cassie and S. Baxter**, “Wettability of porous surfaces”, *Transactions of the Faraday Society*, vol. 40, pp. 546-551, 1944.
- [22]. **Huang, Y.; Sarkar, D.K.**; Chen, X.G., *Mater. Lett.*, “A one-step process to engineer superhydrophobic copper surfaces”, pp. 64, 2722-2724, 2010
- [23]. **K.S. Lau, J. Bico** and all, “Superhydrophobic Carbon Nanotube Forests”, *ACS Publication, Nano Letter*, 3,12, pp 1701-1705, 2003
- [24]. **Lim, H.; Jung, D.H.; Noh, J.H.; Choi, G.R. ; Kim, W.D.** “Simple nanofabrication of a superhydrophobic and transparent biomimetic surface”, *Chinese Science Bulletin*, 54, 3613-3616, 2009
- [25]. **Chen, L; Xiao, Z.; Chan, P.C.H. ; Lee, Y.K.** "Dual-scaled stable superhydrophobic nanoflower surfaces", *TRANSDUCERS 2009 - 15th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems/cm*, 441-444, 2009
- [26]. Superhydrophobie active. Ecole Polytechnique. THEVENIN, 2014
- [27]. **M. Merilhau** « étude de phénomène super-hydrophobie ». Mémoire fin d'étude Lycée Clément Marot CAHORS, 2015.
- [28]. **B.MORTEGNE**, « Vieillissement des composites – Evolution des propriétés et modélisation », *Techniques de l'Ingénieur*, rubrique Corrosion et vieillissement : phénomènes et mécanismes, COR 113, juillet 2005
- [29]. **C. Hudon, N. Amyot, T. Lebey, P. Castelan et N. Kandev**, « Testing of low-voltage motor turn insulation intended for pulse-width modulated applications », *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 7, No. 6, December 2000.
- [30]. <http://www.surprises.ch/HT/annexes/19.pdf>
- [31]. **R. Bouzeroura**, “Etude du développement d'arcs électriques parallèles sur une surface isolante non uniformément polluée sous tension continue”, Thèse de magister, Université de Bejaia, 2009
- [32]. **F. Aouabed**, “contribution à l'étude d'un circuit équivalent des isolateurs synthétiques sous pollution en utilisant l'EMTP”, Thèse de Magister, Université Farhat Abbes Sétif, 2010.
- [33]. **K. Naito**, “insulator pollution. Part 1 : general aspects. Séminaire des isolements des lignes et postes HT”. Casablanca, 1989.
- [34]. **M.A.B. EL-Koshairy et F.A.M. Rizk**, “Comportement des isolateurs des lignes de transport THT dans les conditions de pollution désertiques”, *CIGRE, Rapport 33-05*, 1978.
- [35]. **K. Chrzan**, “Conductivity of Aqueous Dust Solutions”, *IEEE Trans on E.I.*, Vol. EI-22, Issue. 3, pp. 241-244, 1987.

- [36]. **Z. Sahli**, « Etude de la non uniformité de la pollution sur les caractéristiques de contournement des isolateurs réels sous tension continue », Thèse de magister, département d'électrotechnique, Université Abderrahmane Mira de Bejaia. [37].
- [38]. **A. Mekhaldi**, "Etude du développement d'un arc électrique sur des surfaces isolantes contaminées par la pollution désertique", Thèse de Magister, Génie Electrique, ENP 1990
- [39]. **A. Mekhaldi**, "Etude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz ", Thèse de doctorat d'état, Génie Electrique, ENP Alger, 1999.
- [40]. **J. Philibert**. "microanalyse et microscopie électronique" revue de physique appliquée 1968, 3(4), pp343-350
- [41]. **Skoog, Holler, Nieman**, Livre, "Principe d'analyse instrumentale", Edition boeck, 1997
- [42]. **J.Faerber**, livre, Microscopie électronique à balayage, Microanalyse X par sonde électronique, Rapport de l'IPCMS/CM (Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg) ,2004
- [43]. Copyright 2023 - Malvern Panalytical Ltd est une Spectris Enterprise
- [44]. Zurich Instruments AG 2023
- [45]. **C.Darcel, J.Uziel**, "les grands principes, chimie organique", 2ème édition, DUNOD, 2007
- [46]. **C. H. A. Ely, P. J. Lambeth, J. S. T. Looms/cm, D. A. S. Surift, Legb**, "contournement des polymères humides et pollués", L'ailette booster, rapport 15-02 1978.
- [47]. **I. Kimoto, T. Fujimurax**, "performance of isolateurs for direct current transmission line under polluted condition", IEEE, trans, on pas vol pas 92 N3. PP 934 949, may june 1973
- [48]. **Phillippe Jorda N**, Publication ,14 novembre 2008.
- [49]. **W. Reider**, "plasma undlichtbogen", vierwegverlag, brunschweig, pp 128-132, 1967 .
- [50]. **kind, karner**, "hethvoltage, experimental technique", VIEWEG édition, 1978.

