

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa

Faculté des Sciences et Technologies

Département d'automatiques et électromécaniques



Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine: *Sciences et Technologies*

Spécialité : *MAINTENANCE INDUSTRIELLE*

Présenté Par : BOUHADDA Abderrahmane

Thème

**Configuration du champ et du potentiel électrique sur un
dépôt des gouttes recouvrant une surface
superhydrophobe**

Devant le jury :

Dr. Fatma BOUCHELGA

Univ. Ghardaïa

Encadreur

Dr. Hemza MEDOUKALI

Univ. Ghardaïa

Examineur

Pr. Skander BOURAGHDA

Univ. Ghardaïa

Examineur

Année universitaire 2021/2020



Remerciements

*Tout d'abord, je remercie le bon Dieu qui m'a donné
la force et la patience pour terminer mon étude.*

*J'adresse ma reconnaissance particulière à ma chère
mère. Pour son soutien moral et son aide sans faille*

qu'elle m'a apportée durant tout le cycle de ma

scolarité. Je tiens à remercier Dr. Fatma

BOUCHELGA Encadreur de ce mémoire qui a

ménagé un grand effort afin de me permettre de

mener à bien mon modeste travail et à qui j'exprime

ma gratitude et mes respects.

*Enfin, je remercie tous ceux qui ont participé de
près ou de loin, à la réalisation de ce travail et que*

l'on pas put les citer.

Merci.



Dédicace

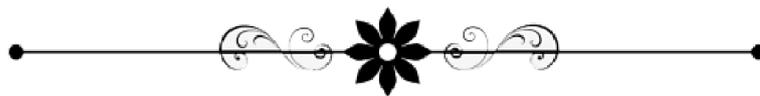
À l'aide de dieu j'ai pu réaliser ce travail que Je dédie

À la mémoire de mon père

*A ma très chère mère Pour sa bienveillance et son
abnégation pour m'encourager à terminer dans de bonnes
conditions mon travail. A mon frère A tout les membres de
ma famille A tous mes ami(e)s chacun a son nom En
particulier les compagnons du long chemin avec tous mes
vœux de succès A Toute la famille universitaire.*



BOUHADDA ABDERRAHMANE



Listes des figures et tableaux

Liste des figures

CHAPITRE I : Généralités sur les isolateurs

- Figure I. 1.** Chaines des isolateurs
- Figure I. 2.** Vue en coupe d'un isolateur rigide en verre
- Figure I. 3** Isolateurs à capot et tige
- Figure I. 4.** Isolateurs à long fût
- Figure I. 5.** Isolateur composite

CHAPITRE II : Matériaux superhydrophobes et leurs caractéristiques

- Figure II. 1.** Eau sur la surface d'une feuille de lotus
- Figure II. 2.** Microstructure de la feuille de lotus montrant des micros et des nantis rugosités
- Figure II. 3.** Comportement d'une goutte sur une surface
- Figure II. 4.** Angle de contact d'une goutte d'eau en équilibre sur une surface
- Figure II. 5.** Angle de glissement
- Figure II. 6.** Modèles de Wenzel et de Cassie
- Figure II. 7.** Gerris sur l'eau
- Figure II. 8.** Images MEB d'un œil de moustique à différents grossissements
- Figure II. 9.** Cigale (a: aile de la cigale, b: images MEB de la nanostructure de l'aile)
- Figure II. 10.** Gecko (A : Photo du gecko, B: patte du gecko, C: Nanostructure de sa peau)
- Figure II. 11.** Ecailles d'un requin
- Figure II. 12.** Canard sur l'eau et goutte d'eau sur sa plume
- Figure II. 13.** Feuille de Lotus et Salvinia Molesta
- Figure II. 14.** Plantes notre Dame et Népenthe
- Figure II. 15.** Films de ZnO sur silicium et d'argent sur du cuivre
- Figures II. 16.** Aluminium avec et sans gravure chimique et de la silice dans une matrice d'époxy
- Figure II. 17.** Béton intelligent et bottes sans et avec traitement ultra-ever dry
- Figure II. 18.** Double fonction pour les revêtements de façade avec effet lotus
- Figure II. 19.** (a) sphère d'aluminium sans revêtement (b): sphère superhydrophobe, Chute d'environ 0,15 m (c): une sphère en aluminium et (d): une sphère superhydrophobe
- Figure II. 20.** Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension
- Figure II. 21.** Rigidité diélectrique transversale et longitudinale (décharge électrique disruptive ou de contournement)
- Figure II. 22.** Résistances volumique, superficielle et d'isolement électrique
- Figure II. 23.** Circuit électrique équivalent série et parallèle

Chapitre III :Résultats de simulation d'un modèle superhydrophobe plan

Figure III. 1. Modèle expérimental et de simulation

Figure III. 2. Maillage du modèle étudié

Figure III. 3. Les forces électriques exercées sur un dépôt de gouttes d'eau sous alternance positive de la tension alternative

Figure III. 4. Répartition du champ électrique sur un nombre variable de gouttes déposées sur une isolation sans couvert

Figure III. 5. Variation de la permittivité relative du couvert diélectrique

Figure III. 6. Polarisation au niveau du couvert diélectrique

Figure III. 7. Distribution du champ électrique en fonction du nombre de gouttes d'eau d'une isolation avec couvert ($\epsilon_r = 20$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

Figure III. 8. Répartition du champ électrique sur 5 gouttes d'eau d'une isolation avec couvert à permittivité variable ($\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

Figure III. 9. Distribution du champ électrique sur une surface superhydrophobe de 2.8 de permittivité relative étudiants

Figure III. 11. Répartition du potentiel électrique sur 5 gouttes d'eau d'une isolation avec couvert ($\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

Liste des tableaux

Chapitre III :Résultats de simulation d'un modèle superhydrophobe plan

Tab. III.1 : Propriétés physiques des matériaux utilisés dans le modèle

Liste des abréviations et des symboles

Liste des abréviations et des symboles

A : surface lavée de la barrière ;

C : carbone ;

C_k : Concentration en kaolin ;

CS : Couche superhydrophobe ;

DDSE : Densité du dépôt de sel équivalent ;

DDNS : Densité de dépôt non soluble ;

d : Densité du fluide ;

d : Distance interélectrode ;

E_e : Champ électrique extérieur ;

E_p : Champ électrique propre ;

E : Champ électrique ;

e_e : Epaisseur ;

F_{ci} : Force de coulomb ;

F_{ai} : Force d'attraction mutuelle ;

F_{ri} : Force de répulsion mutuelle ;

HT : haute tension ;

I : Courant électrique qui traverse l'isolateur ;

HAC : Hystérésis de l'angle de contact ;

l_e : Largeur ;

L_e : Longueur ;

L_c : Ligne de fuite de l'isolation ;

MT : Distance entre le milieu de l'isolation et l'électrode terre ;

MHT : Distance entre le milieu de l'isolation et l'électrode haute tension ; M : Milieu de l'isolation ;

MEB : Microscope électronique à balayage ;

m_f : Masse du papier filtre contenant la pollution après séchage ;

m_i : Masse initiale du papier filtre ;

Na Cl : Chlorure de Sodium ;

n_c : Nombre de couches ;

O : oxygène ;

r : Rugosité ;

R_q : Rugosité moyenne ;

RDT : Rigidité diélectrique transversale ;

RDL : Rigidité diélectrique longitudinale ;

R_v : Résistance transversale ou volumique ;

R_s : Résistance superficielle ;
 R_i : Résistance d'isolement ;
 Si : Silicium ;
 S_a : Salinité de la suspension ;
 S : Surface de l'isolateur ;
 TiO_2 : Dioxyde de titane ;
 t_s : Temps de simulation ;
 T : Terre ;
 UV : Ultraviolets ;
 U_{AC} : Tension d'expulsion des gouttes d'eau en alternatif ;
 U : Tension d'alimentation de l'isolateur ;
 V_d : Volume des gouttes d'eau ;
 V : Vitesse du fluide
 V_i : Volume variable ;
 V : Volume de la solution ;
 θ : Angle de contact sans la rugosité ;
 θ^* : Angle de contact avec la rugosité ;
 γ : Coefficient de tension superficielle ;
 γ_{SG} : Tension superficielle solide-vapeur ;
 γ_{SL} : Tension superficielle solide-liquide ;
 γ_{LG} : Tension superficielle liquide-vapeur ;
 F : Force électrostatique sur la goutte d'eau ;
 φ_s : Fraction de surface occupée par le sommet des créneaux sur laquelle la goutte repose ;
 $(1 - \varphi_s)$: Proportion de surface d'air sur laquelle la goutte est posée ;
 ϵ_r : Permittivité relative ;
 σ_i : Conductivité volumique de la solution polluante ; δ : Conductance superficielle ;
 Θ : Température de la suspension ;
 σ_0 : Conductivité volumique à 0 °C ;
 σ_{20} : Conductivité volumique à 20 °C ;
 μ : Viscosité du fluide ;
 ∇P_{Δ} : Pression exercée sur la goutte d'eau ;
 $\mu_{\Delta^2 V}$: Viscosité sur la goutte d'eau ;
 ρ_t : Charge totale ;
 ϵ : Permittivité absolue ;
 ρ_m : Densité volumique ;

Sommaire

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I: Généralités sur les isolateurs	
I.1. INTRODUCTION.....	4
I.2. FONCTIONNEMENT ET CONSTITUTION D'UN ISOLATEUR.....	4
I.3. QUELQUES DEFINITIONS CONCERNANT LES ISOLANTS.....	5
I.3.1. Courant de fuite critique	5
I.3.2. Tension de tenue (Tension d'essai).....	5
I.3.3. Contournement.....	5
I.3.4. Tension de contournement	6
I.3.5. Contrainte de contournement	6
I.3.6. Courant de fuite	6
I.3.7. Rigidité diélectrique	6
I.3.8. Résistivité diélectrique	6
I.3.9. Conductivité électriques	7
I.4. PRINCIPAUX TYPES D'ISOLATEURS.....	7
I.4.1. Isolateur rigide	7
I.4.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne	8
I.4.2.1. Isolateurs à capot et tige.....	8
I.4.2.2. Isolateurs à long fût.....	9
I.5. MATERIAUX ISOLANTS UTILISES POUR LA FABRICATION DES ISOLATEURS..	11
I.5.1 Céramique.....	11
I.5.2 Verre.....	11
I.5.3 Matériaux synthétiques.....	11
I.6. CHOIX DES ISOLATEURS.....	12
I.7. DEFAUTS DES ISOLATEURS.....	12
I.7.1. Défauts électriques.....	13
I.7.2. Défauts mécaniques.....	14
I.7.3. Défauts dus à la manipulation.....	14
I.7.4 Pollution des isolateurs.....	14
I.8. TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE LA POLLUTION (la maintenance preventive des isolateurs).....	15
I.8.1. Allongement de la ligne de fuite.....	15
I.8.2. Isolateurs plats.....	15

I.8.3. Graissage périodique.....	15
I.8.4. Revêtement silicone.....	15
I.8.5. Les isolateurs composites.....	16
I.8.6. Nettoyage des isolateurs.....	16
I.9. CONCLUSION.....	16

CHAPITRE II : MATERIAUX SUPERHYDROPHOBES ET LEURS CARACTERISTIQUES

II.1 INTRODUCTION.....	18
II.2 DEFINITIONS.....	19
II.2.1 Mouillabilité.....	19
II.2.2. Angle de contact.....	20
II.2.2.1. Classification des surfaces par rapport à leur angle de contact.....	20
II.2.2.2. Effet Wenzel.....	22
II.2.2.3. Effet Cassis.....	23
II.2.3. Non mouillabilité.....	23
II.2.3.1. Surface hydrophobe.....	23
II.2.3.2. Surface Superhydrophobe.....	23
II.3 DIFFERENTS TYPES DE SURFACES SUPERHYDROPHOBES NATURELLES ET ARTIFICIELLES.....	24
II.3.1 Surfaces superhydrophobes naturelles.....	24
II.3.1.1. Insectes.....	24
II.3.1.2. Animaux.....	26
II.3.1.3. Végétaux.....	28
II.3.2. Matériaux superhydrophobes artificiels.....	29
II.3.2.1. Nano tours d'oxyde de zinc sur silicium.....	29
II.3.2.2. Film d'argent sur du cuivre.....	30
II.3.2.3. Gravure chimique de l'aluminium.....	30
II.3.2.4. Nanoparticules de silice dans une matrice d'époxy.....	30
II.4 TECHNIQUES DE PREPARATION DE SURFACES SUPERHYDROPHOBES.....	31
II.4.1 Dépôt par vapeur chimique.....	31
II.4.2 Dépôt électrochimique.....	31
II.4.3 Photolithographie.....	32
II.4.4 Techniques utilisant le plasmal.....	32
II.5 APPLICATIONS DES SURFACES SUPERHYDROPHOBES.....	32
II.5.1 Béton intelligent.....	32
II.5.2 Ultra - Ever Dry.....	32
II.5.3 StoLotusan.....	33

II.5.4 Transport maritime.....	33
II.6 PROPRIETES ELECTRIQUES	35
II.6.1 Permittivité.....	35
II.6.2 Rigidité diélectrique.....	35
II.6.3 Résistance d'isolement.....	36
II.6.3.1 Résistance transversale ou volumique (R_v).....	36
II.6.3.2 Résistance superficielle (R_s).....	36
II.6.3.3 Résistance d'isolement (R_i).....	36
II.6.3 Facteur de pertes.....	37
II.7. CONCLUSION.....	38

CHAPITRE III : RESULTATS DE SIMULATION D'UN MODELE SUPERHYDROPHOBE PLAN

III.1 INTRODUCTION.....	40
III.2 PROCEDURE DE SIMULATION.....	41
III.3 MODELISATION D'ELEMENTS FINIS.....	41
III.3.1 Simulation d'un modèle d'isolateur plan.....	41
III.3.2. Propriétés matérielles.....	42
III.3.3 Maillage.....	43
III.4 PARAMETRES D'INFLUENCE DU CHAMP ET POTENTIEL ELECTRIQUE.....	44
III.4.1 Nombre des gouttes dans le cas d'un modèle sans couvert.....	44
III.4.2 Nombre des gouttes dans le cas d'un modèle avec couvert.....	48
III.4.3 Effet de la variation de la permittivité relative du couvert diélectrique.	49
III.4.4.Influence de la variation de la permittivité relative de la couche superhydrophobe.....	54
III.4.5.Distribution du potentiel électrique sur la surface superhydrophobe....	55
III.5 CONCLUSION.....	58
III. CONCLUSION GENERALE.....	60
Liste des références	

الهدف الرئيسي من هذا البحث هو إجراء دراسة عددية على السلوك الكهروهيدروديناميكي لقطرة ماء ذات موصلية كهربائية ثابتة في الحركة، على طول خط الزحف لعزل شديد المقاومة للماء يتم تنشيطه بالتناوب، ويتم ذلك باستخدام التكوين للمجال والجهد الكهربائي. تم فحص عدة عوامل، مثل، وجود وغياب الغطاء العازل، والسماحية النسبية له، والسماحية النسبية للطبقة فانقة المقاومة للماء. لقد وجدنا أنه يوجد توافق بين النتائج العددية والتجريبية. بالإضافة إلى ذلك، فإن وجود الغطاء ليس له تأثير على اتجاه طرد القطرات من السطح، ومن ناحية أخرى فإنه يؤثر على ترتيب إخلاء الأخير. ويترتب على ذلك أيضًا أن السماحية النسبية للغطاء العازل ليس لها تأثير كبير على طرد القطرات. فيما يتعلق باختبار السماحية النسبية للطبقة الفانقة للماء، فهو فعال للغاية ويعطي نتائج منطقية وأقرب إلى الواقع.

الكلمات المفتاحية: عزل شديد المقاومة للماء ، مجال كهربائي ، قطرة ماء ، جهد متناوب ، COMSOL

Multiphysics

Résumé

L'objectif principal de cette recherche est de mener une étude numérique sur le comportement électro-hydrodynamique d'une goutte d'eau à conductivité électrique fixe en mouvement le long de la ligne de fuite d'une isolation superhydrophobe mise sous tension alternatif, celle-ci est effectuée à l'aide de la configuration du champ et du potentiel électrique. Plusieurs facteurs ont été examinés, tels que, la présence et l'absence d'un couvert diélectrique, la permittivité relative de celui-ci et la permittivité relative de la couche superhydrophobe. Il en découle une conformité entre les résultats numériques et expérimentaux. De plus, la présence du couvert n'a pas une influence sur le sens de l'expulsion des gouttes de la surface, par contre il affecte l'ordre d'évacuation de ce dernier. Il en résulte aussi que la permittivité relative du couvert isolant n'a pas un grand effet sur l'éjection des gouttes. Concernant le choix de la permittivité relative de la couche superhydrophobe est très efficace et donne des résultats logiques et plus proches à la réalité.

Mots Clés : Isolation superhydrophobe, champ électrique, goutte d'eau, tension alternatif, COMSOL Multiphysics

Abstract

The main objective of this research is to carry out a numerical study on the electro-hydrodynamic behavior of water drops, with fixed electrical conductivity in motion along the creepage distance of a superhydrophobic insulation put under ACHV that is carried out using the configuration of the field and the electric potential. Several factors were examined, such as, the presence and absence of a dielectric cover, its relative permittivity and the relative permittivity of the superhydrophobic layer. It follows conformity between the numerical and experimental results. In addition, the presence of the cover does not have an influence on the direction of the drops' expulsion from the surface; on the other hand it affects the evacuation order of the latter. It also follows that the relative permittivity of the insulating cover does not have a great effect on the ejection of the drops. Regarding the choice of the relative permittivity of the superhydrophobic layer is very efficient and gives logical results and closer to reality.

Keywords: Superhydrophobic insulation, electric field, water drop, alternating voltage, COMSOL Multiphysics

Introduction générale

Introduction générale

Les équipements haute tension (câbles, tours, isolants, etc.) existant dans le réseau aérien de transport d'électricité doivent pouvoir fonctionner de manière fiable dans toutes les conditions environnementales. En particulier, les isolateurs, qui représentent relativement un faible pourcentage dans le prix des lignes aériennes, constituent un élément essentiel dans le bon fonctionnement de ces lignes [1]. Les isolateurs ont deux rôles essentiels, le premier est mécanique, ils relient les conducteurs sous tension aux supports, par contre le deuxième rôle est électrique, ils assurent l'isolement électrique entre ces deux parties constitutives de la ligne. En effet, le choix du type de matériau d'isolateur, les contrôles de réception, la surveillance en exploitation doivent être faite avec un maximum de soin, pour assurer le bon fonctionnement de la ligne [2].

Les lignes aériennes et les sous-stations des réseaux de transport d'électricité sont confrontées à diverses restrictions. Parmi eux, la pollution des isolants qui est l'un des facteurs les plus importants affectant la qualité et la fiabilité de la transmission d'énergie. La pollution des isolants peut être considérée comme une décharge continue ou intermittente d'impuretés provenant de diverses sources. Ces impuretés peuvent provenir de la fumée des dispositifs d'évacuation (pollution industrielle ou urbaine), ou de fines particules de sel (pollution marine) situées dans les zones côtières, voire de particules de sable [3].

En fait, par temps pluvieux ou brumeux, le dépôt de contaminants attachés à la surface isolante réduira considérablement la résistivité de la surface isolante, et par la suite il y aura une possibilité de la production d'un contournement de la surface.

Dans notre étude nous allons examiner le comportement électrique d'un matériau isolant superhydrophobe sous tension alternatif, le choix de ce type de matériau est justifier par le fait que ce dernier ne collecte pas de pollution comme dans le cas des autres matériaux hydrophobe et hydrophile. Ce qui implique la diminution de la probabilité de la formation et de la propagation des décharges électriques sur la surface d'isolateur.

Le présent travail comporte trois parties :

Dans le premier chapitre, nous présentons, l'importance des isolateurs, leur utilité et leurs principaux types, profils et matériaux. Et la maintenance préventive des isolateurs.

Le deuxième chapitre nous allons présenter les matériaux superhydrophobes et leurs caractéristiques.

Dans le dernier chapitre nous décrivons le logiciel COMSOL multyphysics et nous présentons le modèle à étudier, lorsque celui-ci est sous tension AC, avec la variation de quelque paramètres d'influence, à savoir, le nombre des gouttes d'eau, la nature de la couche superhydrophobe, la présence et l'absence du couvert isolant et la permittivité relative de celui-ci.

Chapitre I :

Généralités sur les

isolateurs

I.1. Introduction :

Les isolants sont utilisés comme leur nom l'indique pour l'isolement entre deux corps ou deux pièces sous différentes tensions pour empêcher les courts circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution. Les isolants sont des matériaux qui peuvent se trouver sous trois formes; solide, liquide ou gaz, ceux-ci ont une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle [4].

Dans ce qui suit, nous allons présenter la constitution des isolateurs, leur fonctionnement et leurs propriétés électriques.

I.2. Fonctionnement et constitution d'un isolateur :

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents accrochés aux pylônes des lignes aériennes, ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage), ils assurent la transition entre l'isolation interne (huile, SF6) et l'isolation externe, ils permettent de raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles) et ils constituent, également, l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure) .

Les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes prévisibles introduites par l'environnement [5]. Du point de vue électrique, l'isolateur est considéré comme étant deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones constituant trois isolants en parallèle ayant des comportements différents [5].

- L'intervalle d'air.
- Le matériau diélectrique.
- L'interface air-matériau diélectrique (la longueur de l'interface constitue la ligne de fuite, ligne le long de laquelle circulerait le courant de fuite).

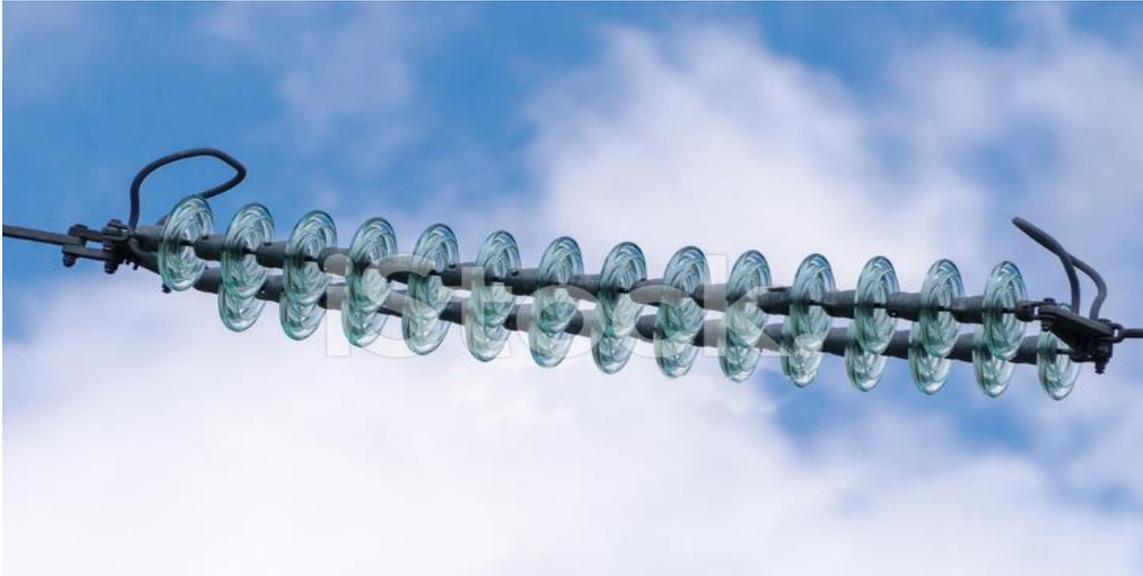


Figure. I. 1. Chaines des isolateurs

I.3. Quelques définitions concernant les isolants

I. 3. 1. Courant de fuite critique

C'est le courant minimum qui provoque une dérivation lorsque l'isolant est contaminé à une tension donnée. Cela n'a rien à voir avec le processus de test et la forme de l'isolant.

I.3.2. Tension de tenue (Tension d'essai)

C'est le niveau de tension le plus important, que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive (contournement dans le cas des isolateur) [6]. La tension d'essai ou de tenue est fixée par les règles nationales ou internationales et permet une coordination correcte de l'isolement.

I.3.3. Contournement

Décharge disruptive le long d'une surface solide dont la trajectoire contourne ce dernier (cas d'isolateur). Le terme contournement est employé pour des décharges disruptives par amorçage dans l'air entourant l'isolateur solide.

I.3.4. Tension de contournement

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas à partir duquel nous constatons la formation et la propagation des arcs en série et en parallèle jusqu'au court-circuit de la surface interélectrode. La tension de contournement dépend de plusieurs paramètres parmi lesquels nous citons [6] :

- La résistivité volumique moyenne de la pollution.
- La répartition de la couche de pollution.
- La longueur de l'isolateur.
- La distance entre les deux électrodes et leur forme.

I.3.5. Contrainte de contournement

La contrainte de dérivation d'un isolant est le rapport de la tension de dérivation à la longueur totale de l'isolant.

I.3.6. Courant de fuite

C'est un courant de faible amplitude qui traverse la couche de pollution le long de la surface de l'isolant, lorsqu'il est proche de la tension de contournement, sa force devient importante [6]. Cela dépend de plusieurs facteurs, tels que la nature de la couche de pollution et la longueur de la ligne de fuite.

I.3.7. Rigidité diélectrique

C'est la propriété d'un diélectrique de s'opposer à la décharge disruptive. Si on augmente progressivement la tension entre les deux armatures de condensateur jusqu'à une certaine valeur (tension disruptive); il se produit une décharge entre ces deux armatures avec l'apparition d'une étincelle (arc électrique). Numériquement, la rigidité diélectrique est le rapport entre le potentiel appliqué et la distance entre les électrodes au moment où la rupture s'effectue [7].

I.3.8. Résistivité diélectrique

Sous l'action du champ électrique, toutes les charges se mettent en mouvement. Dans un diélectrique, ce mouvement est un courant électrique, le mouvement des charges libres bien que leur quantité est très faible constituent un courant de fuite. Ce dernier a deux

chemins possibles : il passe à travers le diélectrique lui-même ou bien il s'écoule par la surface du diélectrique. On aura donc un courant de fuite surfacique et un autre volumique. Chacun d'eux développe une résistance surfacique (R_s) et une autre volumique (R_v) [7].

I.3.9. Conductivité électriques

Comme la plupart des métaux et des solutions ioniques, la conductivité est la capacité d'un matériau à laisser passer et conduire le courant électrique.

I.4. Principaux types d'isolateurs

On peut distinguer deux principaux types d'isolateurs : les isolateurs rigides et les éléments de chaîne

I.4.1. Isolateur rigide

Un isolateur rigide (Figure I. 2) 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 [8]. Il peut, dans certains cas, être placé horizontalement, voire oblique.

Ce type d'isolateurs est utilisé pour les lignes aériennes qui ne dépassent pas le niveau de tension de 60 kV.



Figure. I. 2. Vue en coupe d'un isolateur rigide en verre

I. 4. 2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne

Ils sont constitués par le matériau isolant et d'une pièce métallique qui sert à réaliser la liaison entre deux isolateurs et à donner une certaine flexibilité à la chaîne d'isolateurs. La chaîne d'isolateurs est montée sur le pylône en suspension soit verticalement (chaîne d'alignement), soit d'une façon horizontale (chaîne d'ancrage) [8].

Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne :

- les isolateurs à capot et tige;
- les isolateurs à long fût.

I. 4. 2. 1. Isolateurs à capot et tige

Chaque élément est constitué d'un capot, d'une partie isolante en forme de jupe et d'une tige. La coupe d'un tel isolateur est schématisée sur la (Figure I. 3) [9]. La forme de la tête est dessinée de sorte que les efforts de traction appliqués à l'isolateur se transforment, autant que possible, en compression des diélectriques sur lesquels apparaissent, toutefois, inévitablement certaines contraintes de cisaillement [8,9].



Figure. I. 3 Isolateurs à capot et tige

I. 4. 2. 2. Isolateurs à long fût

A) En céramique

L'isolateur à long fût (Figure I.4) est composé de tiges cylindriques en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques et équipées de dissipateurs thermiques. Des connecteurs métalliques sont fixés aux deux extrémités du dissipateur thermique. Ils sont utilisés pour les lignes à haute tension [10]. Leur avantage est qu'ils sont plus légers que les capots moteurs et les isolateurs de tige, et ils ont l'inconvénient d'être sensibles aux chocs mécaniques.



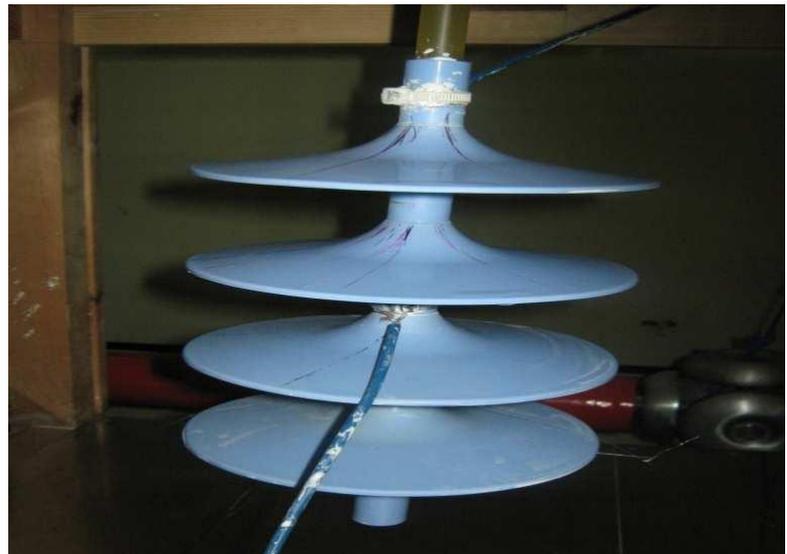
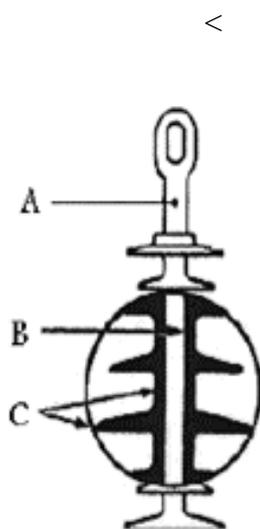
Figure. I. 4. Isolateurs à long fût

B) En matériaux synthétiques

L'intérêt principal de tels isolateurs est leur meilleure tenue à la pollution, leur faible encombrement, leur résistance au vandalisme et leur légèreté, en particulier lorsqu'on les compare aux chaînes d'isolateurs pour les lignes de tension électrique élevée [10]. Concernant

leur constitution, ces isolateurs sont appelés composites. Ils sont constitués de trois parties ayant des rôles différents (Figure. I.5) :

- Un noyau en fibre de verre, imprégnées de résine, capable d'assurer l'isolement et de supporter les efforts mécaniques générés par les conducteurs ;
- Un revêtement en élastomère en EPDM (Ethylène Propylène Diène Monomère), vulcanisés à chaud qui donne le profil et la ligne de fuite tout en protégeant le noyau contre toute attaque des agents extérieurs en assurant l'étanchéité au raccordement avec les pièces métalliques d'extrémités. Son profil à ailettes alternées permet d'accroître la tenue sous pollution ;
- Des pièces métalliques, en fonte malléable ou acier forgé galvanisé à chaud, sont nécessaires au montage de l'isolateur et à la transmission des efforts mécaniques [11].



A : Pièces d'accrochage métallique.

B : noyau en fibre de verre résine.

C : Revêtement à ailettes en matériaux synthétiques

Figure. I. 5. Isolateur composite

I.5. Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs

Il existe plusieurs isolants solides qui peuvent être utilisés pour fabriquer des isolants haute tension, tels que le verre, la céramique et la porcelaine. Mais ces dernières années, la porcelaine a été de plus en plus abandonnée en raison de deux défauts majeurs: le poids de l'isolant est très lourd et il est difficile de détecter un incendie. Ces dernières années, il y a eu un intérêt croissant pour l'utilisation d'isolants en matériaux polymères.

I.5.1 Céramique

Le développement et la fabrication des céramiques datent depuis longtemps à cause de leurs performances [10]. Pour les isolateurs qui vont être utilisés dans des lieux où il y a des contraintes mécaniques très importantes, on utilise de préférence des céramiques à grains très fins. Souvent on trouve les céramiques dans les postes: isolateurs supports, couverture isolante des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel, des bornes de traversées des transformateurs de puissance.

I.5.2 Verre

En Algérie, les isolateurs utilisés dans les lignes de moyenne et haute tension sont en verre. Parmi les avantages que présente ce type, on trouve ; le bas prix et l'observation des défauts sont très facile [11]. Il existe deux types de verre pour la fabrication des isolateurs: le verre trempé et le verre recuit [12].

I.5.3 Matériaux synthétiques

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont composés d'un centre en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Leur avantage est qu'ils sont légers et présentent une grande résistance mécanique [12]. Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères. L'inconvénient de ces isolateurs est le vieillissement sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électriques, mécaniques, atmosphériques...).

I.6. Choix des isolateurs

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne moyenne tension. Cependant, ils sont un élément essentiel qui dépend de la sécurité d'exploitation, de la qualité et de la continuité de service [10].

Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluants le moins élevé, c'est-à-dire ceux qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage.

Même bien choisie, une isolation n'est jamais à l'abri d'un incident:

- La variation de la sévérité de la pollution d'un site.
- L'apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste.
- La construction d'un ouvrage routier voisin ou plus simplement, un événement météorologique exceptionnel peuvent augmenter, durablement ou temporairement, la pollution d'un site, alors qu'un poste ou une ligne y sont déjà en exploitation.

Le dimensionnement initialement correct des isolateurs peut alors devenir insuffisant et il faut pouvoir protéger les installations existantes contre les nouvelles sources de pollution éventuelles [11].

I.7. Défauts des isolateurs

Les isolateurs composites des générations précédentes ont présenté comme principaux problèmes l'érosion, l'acheminement, la décharge de couronne...etc. Ces problèmes ont été éliminés par le bon choix des matériaux et le développement de nouvelles techniques de fabrication. L'inconvénient des isolateurs composites est la difficulté d'identifier l'isolateur défectueux de l'isolateur sain, d'où la nécessité de développer une méthode de diagnostic pour différencier entre un isolateur défectueux et un isolateur sain [13]. On peut distinguer deux types de défauts: défauts électriques et défauts mécaniques. Ces deux types de défauts sont mutuellement dépendants.

I.7. 1. Défauts électriques

Le vieillissement des isolateurs est causé par les conditions climatiques auxquelles l'isolateur est exposé ainsi que son profil. Un profil qui permet l'accumulation des agents polluants favorise l'apparition des décharges locales menant à l'érosion et par la suite au cheminement.

L'effet de couronne est considéré comme agent principal de vieillissement des Isolateurs. Cet effet se caractérise par la réduction de l'hydrophobie dans le cas des isolateurs en silicone, la décoloration de la surface de l'isolateur ainsi que l'érosion sous l'effet des gaz de décharge.

Les gouttelettes d'eau sur la surface de l'isolateur affectent la distribution du champ sur cette surface (la permittivité relative de l'eau est élevée ce qui augmente l'intensité du champ aux voisinages des gouttelettes), les gouttelettes se déforment dans la direction du champ.

Un excellent isolateur est caractérisé par son hydrophobicité, cette hydrophobie peut être perdue suite à l'accumulation des agents polluants sur la surface de l'isolant, ou même après avoir subi des chocs électriques (arcs locaux) ; certains isolateurs peuvent réacquérir leurs états hydrophobes après immigration des molécules de faible poids (LowMolarWeight) du centre de l'objet jusqu'à la surface [13].

Le mouillage de la surface favorise l'apparition de l'effet couronne dans les régions de forte intensité de champ, d'où la perte locale de l'hydrophobie; une quantité de pollution se dissout et forme une couche plus ou moins conductrice, par conséquent une nouvelle distribution du champ s'établit. Ce processus se poursuit et le chemin conducteur mouillé se développe à travers l'isolateur, par la suite le courant circulant à travers ce chemin cause l'assèchement des régions à forte densité de courant ce qui conduit au développement d'un arc local; celui-ci provoque d'avantage de perte d'hydrophobie, d'érosion de surface et augmente l'amplitude du courant de fuite. Dans le cas d'un isolateur en polymère, le séchage de sa surface lui permet de réacquérir ses propriétés hydrophobes [14].

Dans le cas des isolateurs en verre ou en porcelaine, le mécanisme de décharge est différent de celui des isolateurs en polymère, le mouillage de la pollution accumulée sur la surface des isolateurs en verre ou en porcelaine conduit à l'apparition d'un film d'eau continu, donc l'arc peut se développer directement. Le séchage de la partie restante et l'élongation de l'arc causent le contournement de l'isolateur. Les premières étapes sont similaires à celles des

SIR. De plus, la couche de pollution développée est souvent mince, ce qui limite l'intensité du courant de fuite et par la suite, la tension de contournement augmente [14].

I.7.2. Défauts mécaniques

Les défauts mécaniques d'un isolateur peuvent mener à des conséquences fatales. Dans le cas des isolateurs en SIR, la plupart des défauts sont d'ordre mécanique.

I.7.3. Défauts dus à la manipulation

Les isolateurs en porcelaine peuvent être endommagés facilement mais le taux de tels endommagements est toujours faible. Les isolateurs composites ne sont pas fragiles mais marquent un taux relativement élevé d'endommagements.

En effet, un nombre d'endommagements plus ou moins important a été constaté dû des manœuvres durant le transport et l'installation. Pour prendre en charge ces problèmes, le groupe CIGRE (Conférence International des Grands Réseaux Electriques) prépara un guide de manipulation qui contient des recommandations relatives aux méthodes de manipulation de ce type d'isolateurs, en commençant de l'endroit de fabrication jusqu'à sa mise sous tension [14].

I.7.4 Pollution des isolateurs

Même bien choisie, une isolation n'est jamais à l'abri d'un incident. La sévérité de la pollution d'un site peut changer. L'apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste, la construction d'un ouvrage routier voisin ou plus simplement, un événement météorologique exceptionnel peuvent augmenter, durablement ou temporairement, la pollution d'un site, alors qu'un poste ou une ligne y sont déjà en exploitation. Le dimensionnement initialement correct des isolateurs peut alors devenir insuffisant et il faut pouvoir protéger les installations existantes contre les nouvelles sources de pollution.

I.8. Techniques de Lutte contre La pollution (La maintenance préventive des isolateurs)

L'augmentation du degré de pollution représente un risque immense pour les installations électriques. Pour cela plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont utilisées [9]. Ce qui implique la diminution du risque de court-circuit des isolateurs et par la suite assure la continuité de service.

I.8.1. Allongement de la ligne de fuite

Elle permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution. Deux techniques sont employées [15] :

- Le changement de type d'isolateur (pour rallonger la ligne de fuite) c'est une technique très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.
- L'utilisation de prolonger de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants.

I.8.2. Isolateurs plats

Les isolateurs sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'autonettoyant très bien sous l'effet du vent [16].

I.8.3. Graissage périodique

Par mesure économique, seuls les isolateurs de postes sont concernés. On utilise des graisses silicones. Grâce à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement les isolateurs [9].

I.8.4. Revêtement silicone

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Ce revêtement protège les isolateurs et améliore leurs tenues sous pollution [16].

I.8.5. Les isolateurs composites

Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères [17]. Cependant, ces isolateurs, revêtus d'un polymère voient leurs caractéristiques changer au cours du temps ; ils peuvent vieillir sous l'effet des différentes contraintes (électriques et climatiques) auxquelles ils sont soumis en service.

I.8.6. Nettoyage des isolateurs

Le nettoyage manuel et le lavage périodique hors tension sont fréquemment utilisés à travers le monde [9]. Néanmoins, l'application de ces méthodes pose des problèmes majeurs à cause des interruptions de service, parfois assez longues. Pour éviter ces coupures, un lavage sous tension des isolateurs est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans les deux cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau du lavage, le processus du lavage et les distances de sécurité, et ce afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage.

I.9. Conclusion

La pollution des isolants est un facteur important qui doit être pris en compte dans la conception des lignes à haute tension. Afin de mieux déterminer la taille de l'isolant, il est important de comprendre le degré de sévérité de la pollution à l'endroit concerné. Connaître cette gravité implique d'étudier différents paramètres qui définissent l'état de dégradation de l'isolant. Il n'en demeure pas moins qu'il faudra au moins trois ans pour déterminer la gravité du site. La tension de dérivation d'un isolant contaminé dépend principalement de la conductivité (degré de contamination) du dépôt de contaminant et de la répartition de la couche contaminée sur la surface isolante. Par conséquent, connaître le degré de pollution est une condition préalable et nécessaire pour évaluer la classe d'isolation thermique du projet installé sur site afin de déterminer de manière appropriée la classe d'isolation thermique.

Chapitre II :
Matériaux
superhydrophobes et
leurs caractéristiques

II.1. Introduction

Le contournement des isolateurs par un arc électrique, dû à la pollution, est l'une des causes principales de l'interruption de l'alimentation en énergie des réseaux électriques. La maîtrise des conditions optimales du fonctionnement de ces réseaux, vis-à-vis de ce type de défaut d'isolement, commence par le choix d'isolateurs qui présentent les meilleures performances sous pollution. A ce titre, plusieurs solutions comme la nature du matériau isolant qui confèreraient à ce dernier des meilleures performances isolantes. Nous citerons à titre d'exemple les isolations hydrophiles, ces dernières se mouillent, deviennent conductrices et entraînent le court-circuit de l'isolation. Par la suite, les chercheurs ont poussé l'étude et découvrent les surfaces hydrophobes sur lesquelles l'humidité se dépose sous forme de gouttes mais reste collée à celles-ci. Certes ces surfaces présentent des zones sèches mais ont une meilleure performance comparativement aux surfaces hydrophiles. Dernièrement la recherche a montré que ces surfaces se dégradent rapidement dans les régions très humides à cause des décharges répétitives qui mènent au contournement de l'isolation et entraîne sa dégradation.

Afin de contourner ce problème, il fallait trouver un matériau qui ne se mouille pas, les chercheurs se sont donc inspirer de la nature et ont fabriqué des surfaces superhydrophobes, celles-ci sont formées d'une couche sous forme de coussins d'air sur lesquels la goutte se pose est arrivé à se libérer facilement de la surface. Cependant, il existe très peu de recherches dans le sens d'intégrer ce type de matériaux dans l'énergie électrique.

Ce présent chapitre a pour but principal la définition et la caractérisation de la superhydrophobie, la présentation des divers types de matériaux superhydrophobes naturels et artificiels, leurs propriétés électrique et spéciales ainsi que leurs domaines d'application.

II. 2 Définitions

II.2.1 Mouillabilité [18]

Les propriétés de mouillabilité avec l'eau des surfaces (métaux, alliages, oxydes, etc.) sont évaluées par les mesures d'angle de contacts que fait une goutte d'eau sur la surface. Lorsque l'angle de contact est inférieur à 90° la surface est appelée hydrophile (aimant l'eau) et pour un angle supérieur à 90° la surface est dite hydrophobe (repoussant l'eau). Récemment, deux nouveaux termes ont été proposés afin de décrire les surfaces : superhydrophile et superhydrophobe. Lorsque l'angle de contact est près de 0° et que le mouillage est presque parfait, où l'eau s'étend complètement formant une mince couche, la surface est décrite comme étant superhydrophile. Inversement, lorsque l'angle de contact sur la surface est plus grand que 150° et que le mouillage est faible ou nul, elle est appelée superhydrophobe.

Les propriétés de non-mouillabilité ou superhydrophobes sont couramment observées sur les surfaces des corps de la nature, comme les plantes ou les insectes. Un des exemples communément cités est la feuille de lotus (Figure II. 1). L'effet lotus est dû à la présence de micro et nano structures rugueuses (Figure II. 2) couvertes d'un matériau cireux possédant une faible affinité chimique avec l'eau résultant d'un angle de contact avec l'eau légèrement au-dessus de 150° [18].

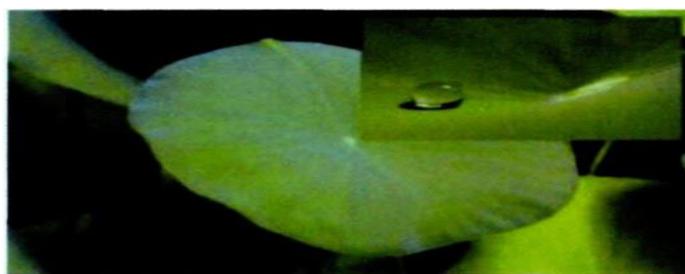


Figure II. 1. Eau sur la surface d'une feuille de lotus



Figure II. 2. Microstructure de la feuille de lotus montrant des micros et des nantis rugosités

II.2.2. Angle de contact [18]

On appelle angle de contact θ , l'angle que forme la goutte d'eau avec la surface sur laquelle elle est déposée. Ses valeurs varient de 0° à 180° , en fonction de la nature de la surface (superhydrophile, hydrophile, hydrophobe, super hydrophobe) avec laquelle elle est en contact.

II.2.2.1. Classification des surfaces par rapport à leur angle de contact

Si l'angle de contact est presque égal à 0° , alors la surface sur laquelle repose la goutte d'eau est dite superhydrophile, elle ne repousse pas l'eau (Figure II. 3a). Si l'angle de contact est inférieur à 90° , alors la surface sur laquelle repose la goutte d'eau est dite hydrophile, elle ne repousse pas l'eau (Figure II. 3b). Si l'angle de contact est compris entre 90° et 150° , alors la surface est hydrophobe et la goutte d'eau sera bombée (Figure II. 3c). Si l'angle de contact est compris entre 150° et 180° , on dit que la surface est superhydrophobe et la goutte d'eau sera presque sphérique (Figure II. 3d) [18]. La forme de la goutte déposée est le résultat de trois tensions différentes (γ_{SL} , γ_{SG} , γ_{LG}) décrites par l'équation de Young [19] comme suit:

$$\gamma_{LG} \cos \theta + \gamma_{SL} - \gamma_{SG} = 0 \quad (\text{II.1})$$

$$\cos \theta = \frac{(\gamma_{SG} - \gamma_{SL})}{\gamma_{LG}} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

γ : Coefficient de tension superficielle;

γ_{SL} : Tension de l'interface Solide Liquide;

γ_{SG} : Tension de l'interface Solide Gaz;

γ_{LG} : Tension de l'interface Liquide Gaz;

La tension superficielle est une propriété des liquides permettant de maintenir en équilibre leur surface libre. Cette grandeur intervient principalement dans la formation des gouttes, ainsi que dans les propriétés de mouillabilité des surfaces par les liquides.

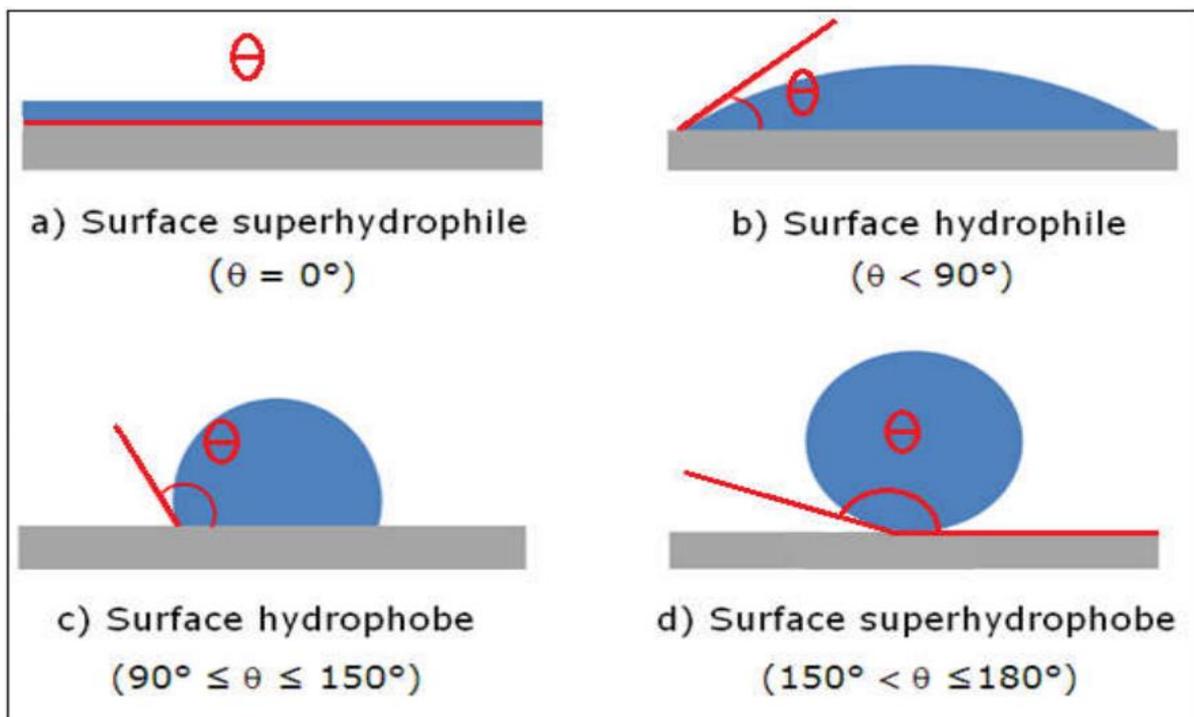


Figure II. 3. Comportement d'une goutte sur une surface [20]

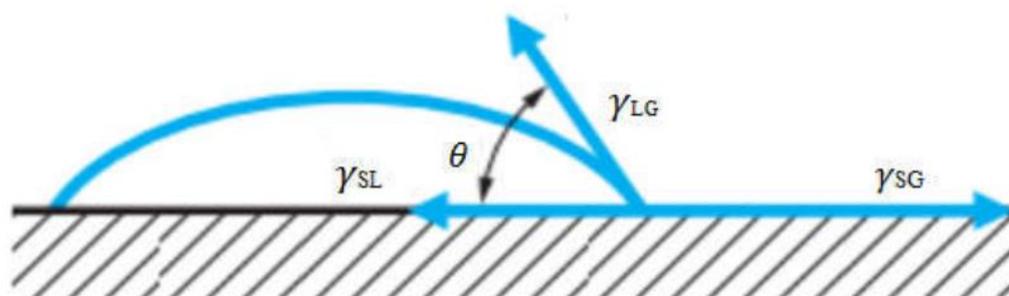


Figure II. 4. Angle de contact d'une goutte d'eau en équilibre sur une surface [21]

Sur la figure II. 4, sont présentés les deux cas, qui peuvent se différencier grâce à l'angle de glissement (A), illustré par la figure II. 5. C'est l'angle limite (cas de superhydrophobie), avant que la goutte ne se mette en mouvement. Si cet angle est inférieur à 10° , on est dans le cas Cassie Baxter et s'il est supérieur à 20° c'est le cas de Wenzel [18].

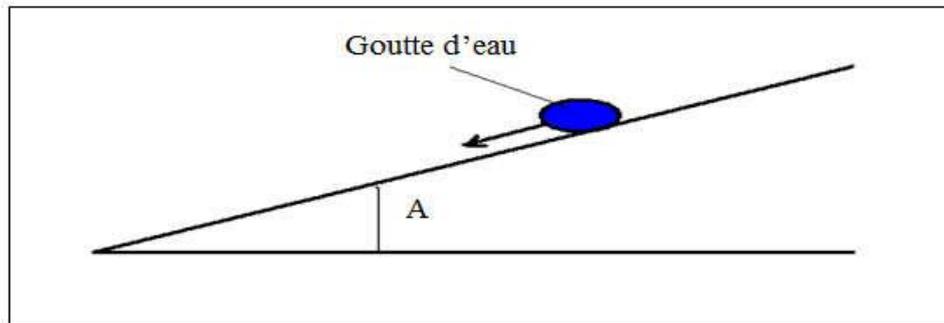


Figure II. 5. Angle de glissement [18]

II.2.2.2. Effet Wenzel [22]

En 1936, Wenzel affirme que lorsqu'on pose une goutte d'eau sur une surface présentant une faible densité d'aspérités, l'épouse, vu que la rugosité s'imprègne et donc retient la goutte sur son support, dans ce cas, le mouillage est partiel. La relation de Wenzel est la suivante:

$$\cos \theta^* = r \cos \theta \quad (\text{II. 3})$$

r : la rugosité ($r > 1$);

θ : Angle de contact sans la rugosité;

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

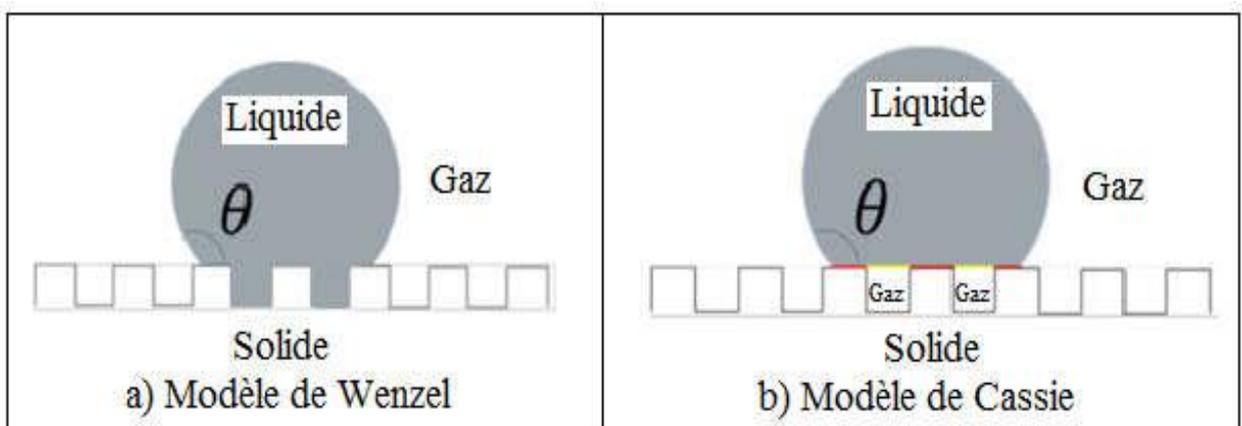


Figure II. 6. Modèles de Wenzel et de Cassie

II.2.2.3. Effet Cassis [23]

Huit ans plus tard, contrairement à Wenzel, Monsieur Cassis Baxter affirme qu'une goutte posée sur une surface ayant un grand nombre d'aspérités n'est en contact qu'avec leurs sommets. Dans ce cas, la goutte ne s'accroche pas voir pas du tout à son support, ce qui crée, des poches d'air entre le solide et le liquide, donc, l'hydrophobie du matériau augmente. Si non, dans le cas où la surface ne contient pas beaucoup d'aspérités, la goutte d'eau s'empalera sur son support comme l'a affirmé Wenzel.

Equation de Cassis est la suivante :

$$\cos \theta^* = \varphi s \cos \theta - (1 - \varphi s) \quad (\text{II. 4})$$

Avec :

θ : L'angle de contact sans la rugosité ;

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

φs : La fraction de surface occupée par le sommet des créneaux sur laquelle la goutte repose ;

$(1 - \varphi s)$: La proportion de surface d'air sur laquelle la goutte est posée.

II.2.3. Non mouillabilité

La non-mouillabilité désigne la capacité de la surface d'un matériau à ne pas pouvoir créer des liaisons d'hydrogènes avec une goutte d'eau, c'est ce qui l'empêche de s'étaler sur la surface [24].

II.2.3.1. Surface hydrophobe

Contrairement aux surfaces hydrophiles, les surfaces hydrophobes ont du mal à créer des liaisons d'hydrogène avec les gouttes d'eau, qui, en les déposants sur celle-ci, se rassemblent afin de minimiser la surface de contact avec le matériau [25].

II.2.3.2. Surface Superhydrophobe

Les matériaux superhydrophobes sont une catégorie des matériaux hydrophobes ayant un angle de contact supérieur à 150° . En y déposant une goutte d'eau, cette dernière a tendance à se rassembler en gardant une forme sphérique [18].

La caléfaction est le degré extrême de la superhydrophobicité, on l'atteint en déposant une goutte d'eau sur une plaque chauffante à 300°. La goutte ne s'évapore pas, ceci est dû au film de vapeur qui se crée entre elle et la plaque chauffante, ce qui explique sa mobilité, longévité et son angle de contact proche de 180° [].

II.3 Différents types de surfaces superhydrophobes naturelles et artificielles

II.3.1 Surfaces superhydrophobes naturelles

La nature est une source de nombreuses espèces superhydrophobes: insectes, animaux et végétaux. Parmi ces espèces, on citera : Le gerris, le canard, le lotus, La salvinia molesta.

II. 3. 1. 1. Insectes

a) Gerris [26]

Le gerris se déplace librement sur l'eau grâce aux micros poiles hydrophobes sur ses pattes qui accentuent l'effet de la tension superficielle (c'est le résultat de l'augmentation de l'énergie à l'interface entre deux fluides) entre ces dernières et la surface de l'eau ; ce qui crée une pellicule suffisante pour supporter le poids de l'insecte sur la surface de l'eau. Les pattes du gerris semblent réaliser le plus grand angle de contact avec de l'eau connu pour les systèmes naturels: $167.6 \pm 4.4^\circ$ (Figure II. 7).

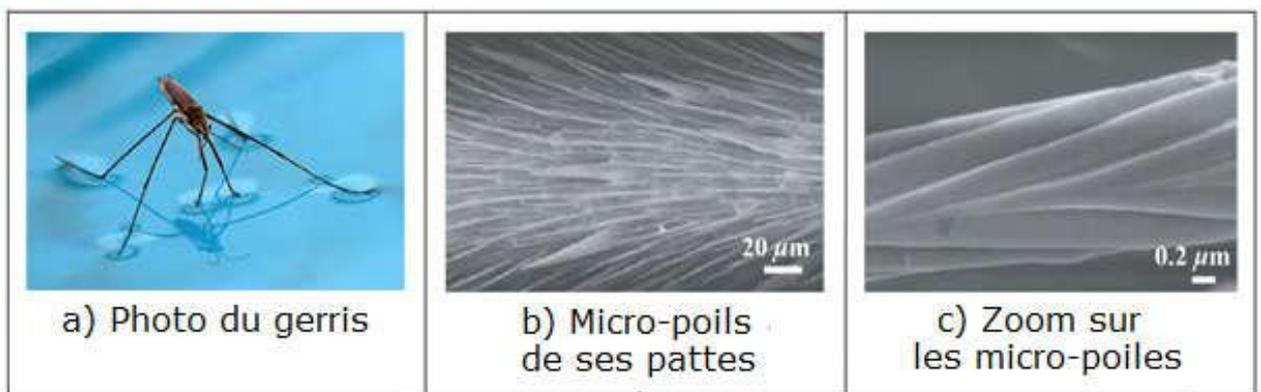


Figure II. 7. Gerris sur l'eau

b) Moustique [27]

Le moustique possède yeux superhydrophobes. Des observations au microscope à balayage électronique (MEB: Figure II. 8a) ont révélé qu'ils étaient dotés de plots, assemblés en réseaux hexagonaux (Figure II. 8b), et eux-mêmes sont recouverts de petits piliers d'une centaine de nanomètres (Figure II. 8c et II. 8d).

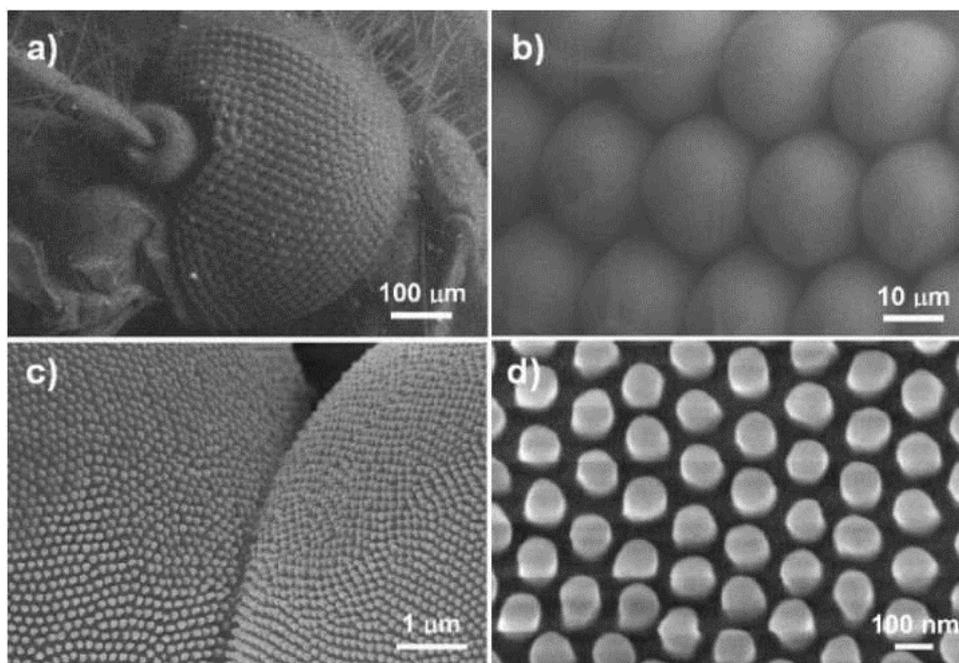


Figure II. 8. Images MEB d'un œil de moustique à différents grossissements (a: vue macroscopique, b: image des micro-plots qui constituent l'œil, c: Zoom sur deux micro-plots, eux-mêmes couverts de plus petits plots d'un diamètre de 100 nm, d: images tirées de [27])

c) Ailes de cigales [28]

Grâce à leur structure nanométrique, les ailes de cigales ont des propriétés d'antireflets. De plus, les textures sont recouvertes d'une cire qui rend ces ailes superhydrophobes. Une goutte d'eau posée sur leur surface possède un angle de contact proche de 160° (Figure II. 9).



Figure II. 9. Cigale (a: aile de la cigale, b: images MEB de la nanostructure de l'aile)

II.3.1.2. Animaux

a) Gecko

Le gecko est l'un des rares espèces de reptile vivant dans le désert possédant une peau superhydrophobe. Celle-ci est constituée de petites bosses recouvertes de poiles [29] microscopiques bien alignés, appelés soies, sur leurs pieds (Figure II. 10). Leur longueur s'étend de 20 à 70 μm et leur diamètre de 3 à 7 μm . Ces poiles rejettent l'eau et donc le gecko s'auto-nettoie [30].

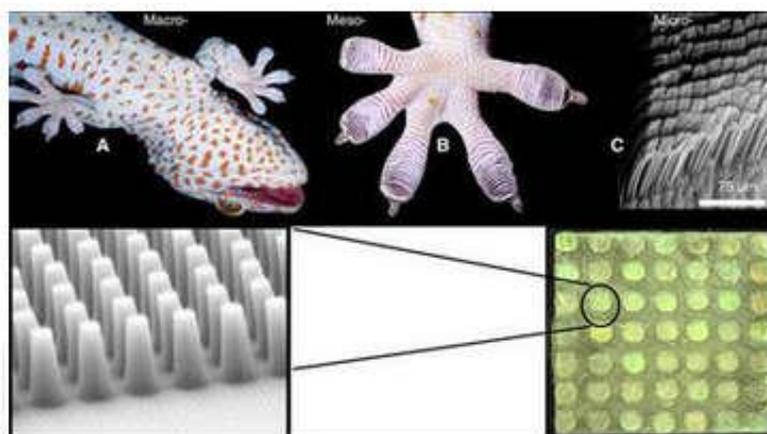


Figure II. 10. Gecko (A : Photo du gecko, B: patte du gecko, C: Nanostructure de sa peau [30])

b) Poissons [31]

Sous l'eau, on ne parle plus de superhydrophobie mais de superoléophobie, une caractéristique qui correspond à un solide, liquide (eau ou huile). Cette propriété protège les poissons et les requins de la pollution marine (Figure II. 11).

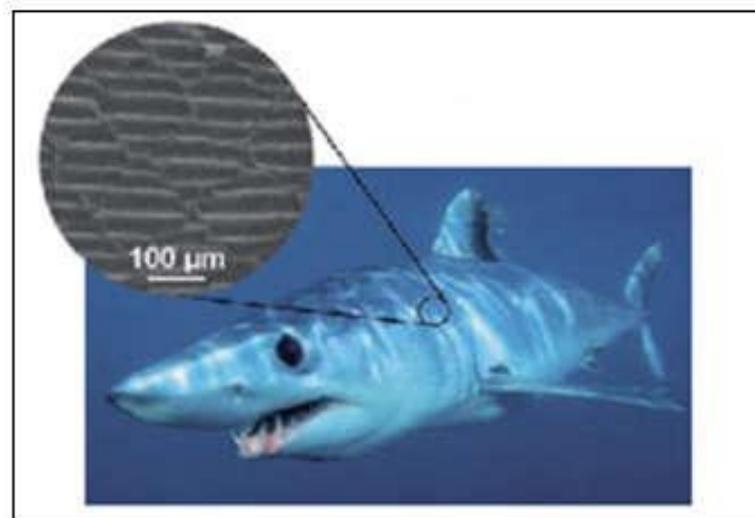


Figure II. 11. Ecailles d'un requin

c) Canard

Les plumes de canard sont recouvertes d'une graisse superhydrophobe sécrétée par son bec, ce qui lui permet de rester sec à la sortie de l'eau (Figure II. 12) [32].



Figure II. 12. Canard sur l'eau et goutte d'eau sur sa plume [33]

II.3.1.3. Végétaux

A l'état naturel, la flore dotée de l'hydrophobie regroupe plusieurs espèces de plantes, incluant notamment les feuilles de lotus, *Salvinia molesta* et Notre Dame.

a) Lotus [34]

La feuille de lotus est une surface superhydrophobe ayant un angle de contact supérieur ou égale à 150° . A l'échelle microscopique, la surface de la feuille de lotus est composée de petites collines micrométriques qui, à leur tour, sont recouvertes de petits cristaux de cire nanoscopiques (Figure II. 13 a). Quand une goutte d'eau tombe sur la feuille de lotus, celle-ci se pose réellement sur les cristaux de cire, ces dernières étant superhydrophobe et autonettoyants permettent à la goutte d'eau de rouler jusqu'au centre de la feuille emportant avec elle toutes les saletés.



Figure II. 13. Feuille de Lotus et *Salvinia Molesta*

b) *Salvinia molesta* [35]

La *Salvinia molesta* est une algue aquatique (fougère) superhydrophobe. Sa surface n'étant pas lisse, mais recouverte de petits fouets hydrophiles qui en contact avec l'eau piègent ses molécules, ce qui crée une barrière d'air entre ces molécules et la surface de la fougère qui reste sèche (Figure II. 14 b).

c) Notre Dame [36]

Est une plante aussi appelée (Lady's Mantel), recouverte de poils flexibles et hydrophiles qui ont pourtant la propriété d'être superhydrophobes (Figure II. 14 a).

d) Népente [37]

La plante peut grâce à sa surface superhydrophobe repousser l'eau de pluie vers son intérieur en entrainant avec elle tous les insectes se déposant sur celle-ci (Figure II. 14 b). Sa périphérie ornée de multiples couleurs sert de surface d'attraction pour les insectes.

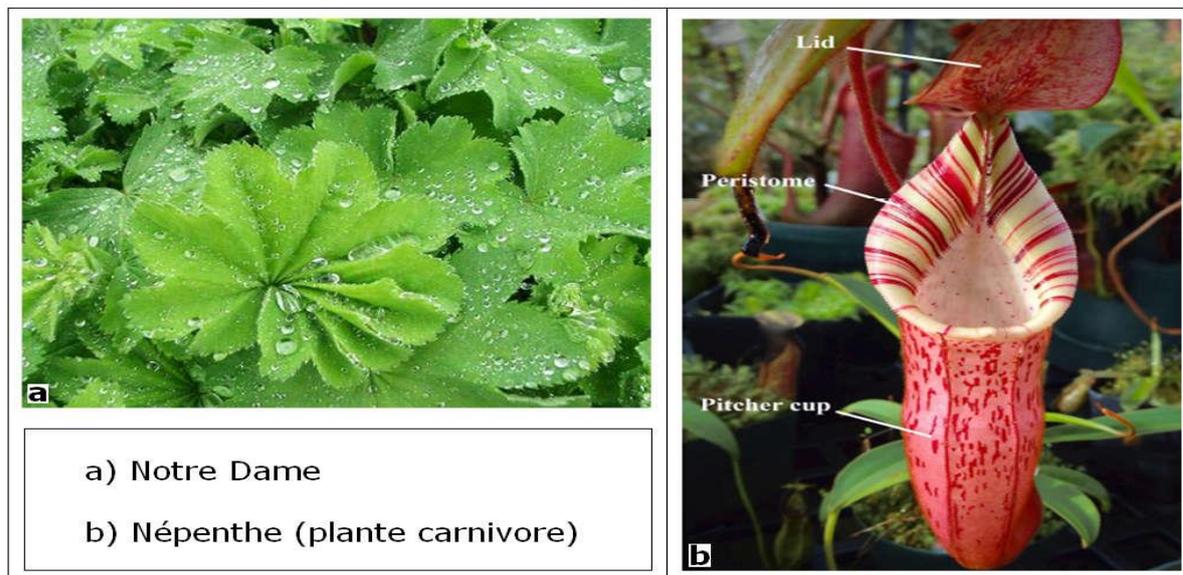


Figure II. 14. Plantes notre Dame et Népente

II. 3. 2. Matériaux superhydrophobes artificiels**II.3.2.1. Nano tours d'oxyde de zinc sur silicium [38]**

Salema et coll. ont obtenu des nano tours d'oxyde de zinc sur du silicium (Figure II. 15 a) par dépôt en bain chimique qui se compose de $Zn(NC>3)^2$ et de NH_4OH à $70\text{ }^\circ C$ dans un four, favorisant ainsi l'accroissement en forme de tours. Les rugosités sont ensuite traitées avec de l'acide stéarique, recouvrant entièrement les rugosités et diminuant l'énergie de surface. A base de cette méthode la surface devient superhydrophobe avec un angle de contact de $173 \pm 1^\circ$ dû à la présence d'une structure binaire réduisant la surface de contact et favorisant l'emprisonnement d'air dans la nanostructure.

II.3.2.2. Film d'argent sur du cuivre [39]

En une seule étape Sarkar et coll. ont obtenu un film d'argent superhydrophobe sur du cuivre. Le film est obtenu en introduisant un coupon de cuivre dans une solution de nitrate d'argent et d'acide benzoïque pour différentes périodes. Les analyses par diffraction de rayon X (XRD) ont montré que le cuivre était recouvert d'oxyde de cuivre et d'oxyde d'argent. En faisant l'analyse à l'aide d'un microscope électronique à balayage on remarque l'arrangement de la micro-nano structure (Figure II. 15b). L'angle de contact sur cette surface est de 162° et a des applications potentielles en réduction de la traînée dans l'eau.

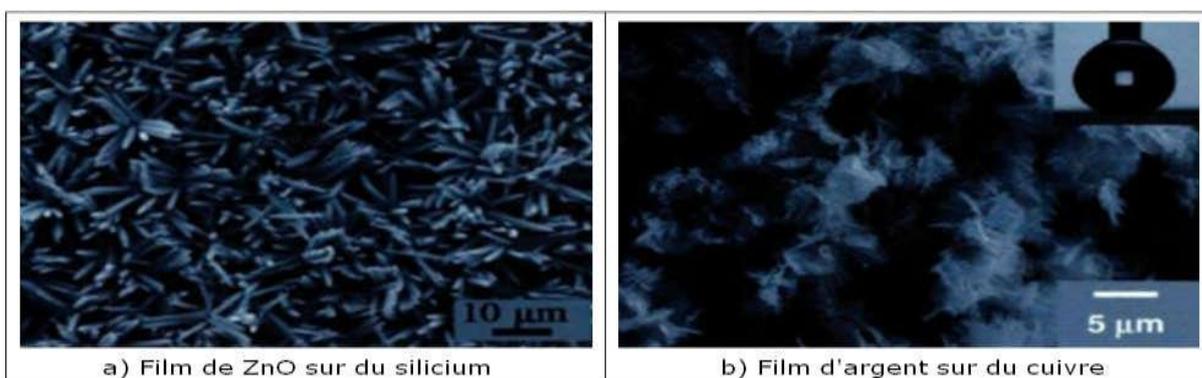


Figure II. 15. Films de ZnO sur silicium et d'argent sur du cuivre

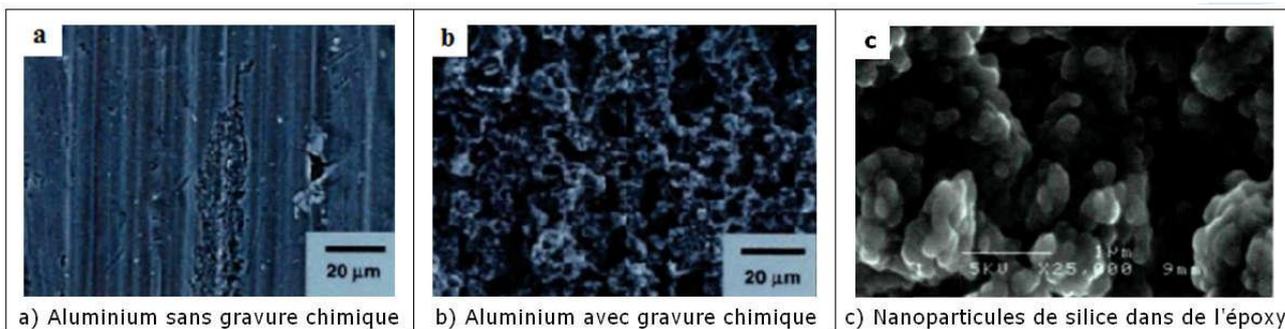
II.3.2.3. Gravure chimique de l'aluminium [40]

Cette méthode a été utilisée par Sarkar et Coll. le procédé consiste à graver de l'aluminium avec de l'acide chlorhydrique (HCl_1) puis le recouvrir de téflon par plasma. la (Figures II. 16a et II. 16b) montre une augmentation de la rugosité avec le revêtement. Les analyses de la surface montrent le dépôt de téflon sur la surface, et l'angle de contact optimal atteint $164 \pm 1^\circ$ avec des propriétés autonettoyantes avec l'écoulement de l'eau. Le procédé utilisé s'avère toutefois coûteux. Il offre des applications potentielles en réduction de l'adhérence de la glace.

II.3.2.4. Nanoparticules de silice dans une matrice d'époxy [41]

Le revêtement superhydrophobe pour les éoliennes était obtenu par Karmouch et coll. A base de mélange des nanoparticules de silice de 15 à 25 nm de diamètre qui servent à donner la rugosité et favoriser l'emprisonnement d'air, avec une résine époxy diluée avec du

toluène qui sert d'agent abaisseur d'énergie et d'élément de résistance à l'usure.. En faisant l'analyse à l'aide d'un microscope électronique à balayage (Figure II. 16c) montre la présence de particules en grappes exhibant une topographie à l'échelle du micro et du nano. En utilisant l'époxy comme agent regroupant permet d'obtenir une résistance élevée à l'érosion allouant le revêtement à être utilisé sous les intempéries. En variant la concentration de silice, l'angle de contact sur cette surface atteint 152° au maximum avec 2.5 % masse de silice.



Figures II. 16. Aluminium avec et sans gravure chimique et de la silice dans une matrice d'époxy

II.4 Techniques de préparation de surfaces superhydrophobes

II.4.1 Dépôt par vapeur chimique [42]

Le procédé de cette technique consiste à exposer un substrat à une vapeur chimique produisant un certain dépôt désiré qui se décompose ou réagit à la surface. C'est une méthode assez coûteuse, du fait qu'elle nécessite une chambre qui contrôle la pression et la température.

II.4.2 Dépôt électrochimique [43]

Cette méthode consiste à déposer deux substrats dans un liquide, l'un est considéré anode tandis que l'autre joue le rôle d'une cathode. Certains composés sont déposés sur les surfaces, leur nature ainsi que leur forme dépendent du substrat (anode ou cathode).

II.4.3 Photolithographie [44]

Ce procédé permet d'obtenir des topographies continues. Il consiste à enduire une surface d'un film mince de photo résine ou de polymère, puis la radier avec un faisceau lumineux de haute précision. Cette méthode est utilisée en électronique.

II.4.4 Techniques utilisant le plasma [45]

Le plasma peut être utilisé comme étant une technique de déposition (les ions déposent ceux pris dans un bain de vapeurs chimiques sur la surface) ou d'arrachement de matière, ce dernier est généralement utilisé en nano-fabrication des surfaces.

II.5 Applications des surfaces superhydrophobes

Les industriels s'intéressent de plus en plus au phénomène de la superhydrophobie car elle répond à de nombreux besoins et problèmes des industriels, ainsi que pour les consommateurs.

II.5.1 Béton intelligent [46]

Des chercheurs américains ont mis au point un type de béton qui résiste à l'eau et aux fissures. Ce béton est intelligent grâce à sa composition moléculaire (une surface "pointue") le rendant presque complètement étanche. En versant de l'eau sur ce type de béton, elle forme des gouttelettes qui roulent hors de sa surface.

II.5.2 Ultra - Ever Dry [47]

Ultra - Ever Dry, est un revêtement super hydrophobe qui, en le pulvérisant sur une surface d'un objet, il crée une barrière d'air sur celle-ci. Comme applications de ce type de revêtement, on peut citer: Anti humidité, anti corrosion, anti gel, anti contamination, anti nettoyant.

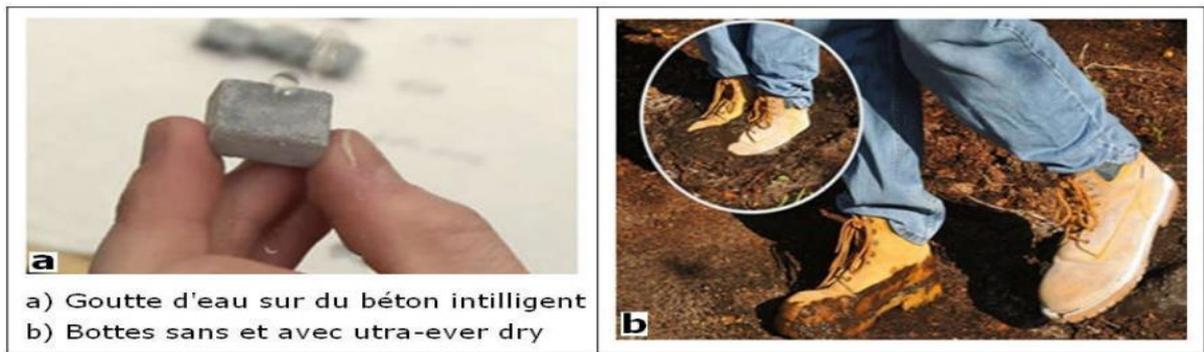


Figure II. 17. Béton intelligent et bottes sans et avec traitement ultra-ever dry

II.5.3 StoLotusan [48]

On peut l'utiliser sous forme de revêtement de façade avec effet lotus (en béton, en ciment).

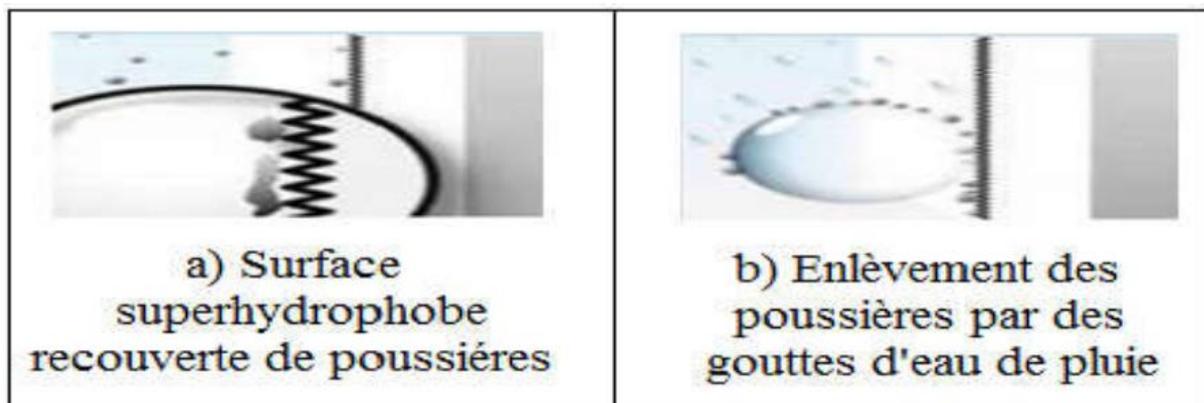


Figure II. 18: Double fonction pour les revêtements de façade avec effet lotus

II.5.4 Transport maritime [49]

Les consommations de carburants fossiles, dans le domaine des transports, ne cessent d'accroître. Dans le but de diminuer ces consommations, plusieurs équipes travaillent à obtenir des alliages plus légers, ou encore des géométries plus aérodynamiques. Toutefois, ces modifications atteignant un apogée, l'utilisation d'un revêtement de surface superhydrophobe offrant une mouillabilité faible, pourrait être la solution. En effet, une surface de contact réduite entre l'eau et le solide en addition à une affinité chimique réduite avec l'eau pourrait diminuer la friction en surface. Plusieurs

techniques permettent d'obtenir des surfaces possédant ces caractéristiques. Lorsqu'on émerge une sphère superhydrophobe dans l'eau, un film d'air se crée autour d'elle (Figure II. 19b) et diminue la friction, ce qui lui permet de se déplacer plus rapidement qu'une sphère ordinaire (Figure II. 19 a) qui au contact avec l'eau, elle se retrouve enduite. Cette propriété reste conservée même lors d'une chute d'environ 0,15 m comme le montrent les figures II. 19c et II. 19d.

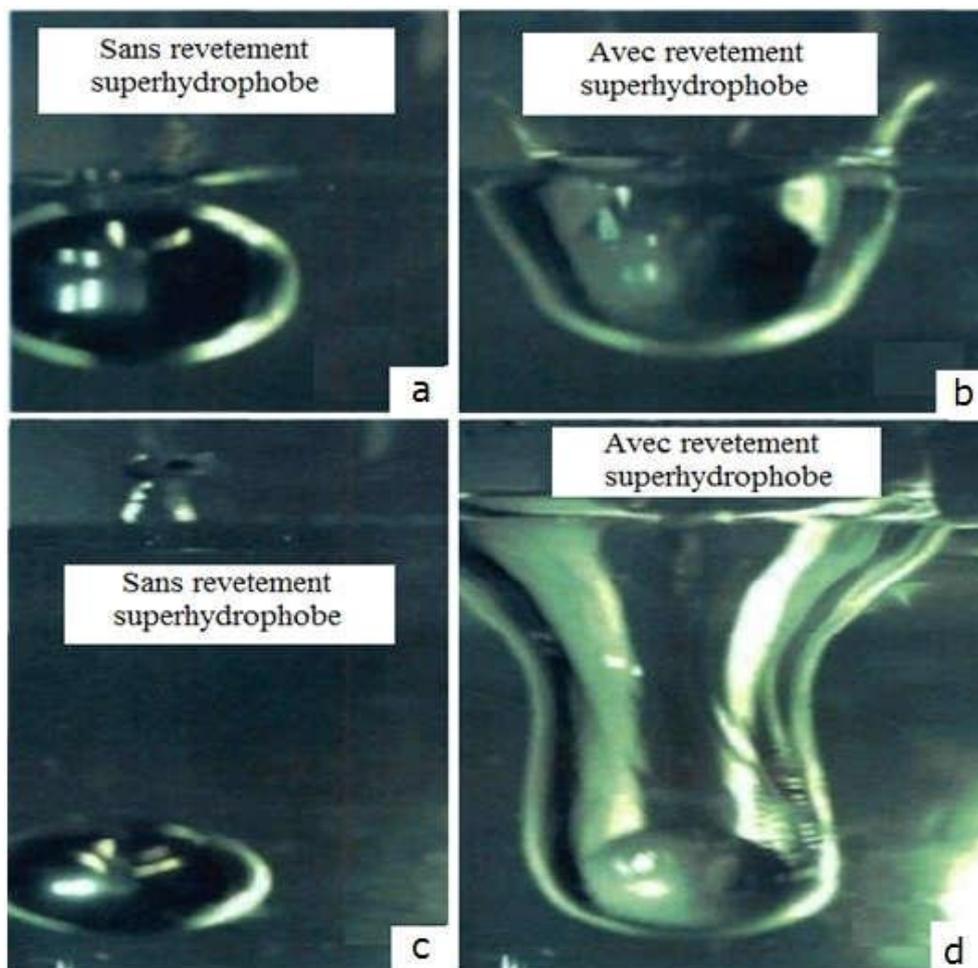


Figure II. 19. (a) sphère d'aluminium sans revêtement (b): sphère superhydrophobe, Chute d'environ 0,15 m (c): une sphère en aluminium et (d): une sphère superhydrophobe

II.6 Propriétés électriques [50]

II.6.1 Permittivité

Lorsqu'un diélectrique est soumis à l'action d'un champ électrique, il se produit à l'échelle moléculaire diverses modifications qui ont pour effet de créer un champ électrique propre E_p à l'intérieur de la substance, s'opposant au champ électrique (E_e) extérieur appliqué (Figure II. 20). Cette caractéristique des isolants solides et liquides porte le nom de la permittivité relative ϵ_r .

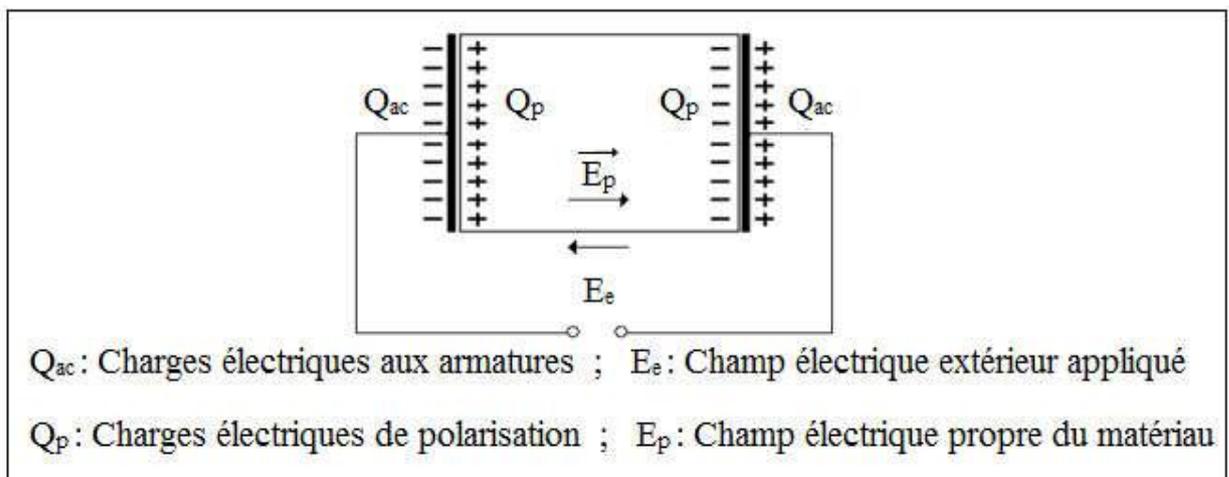


Figure II. 20. Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension

II.6.2 Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un matériau isolant est la valeur du champ électrique auquel il faut le soumettre pour qu'il en résulte une perforation qui le rende inapte à remplir ultérieurement sa fonction. De façon pratique, la rigidité diélectrique est définie comme étant le rapport entre la tension à laquelle se produit une perforation dans les conditions d'essai spécifiées et la distance entre les deux électrodes auxquelles est appliquée la tension. Suivant les positions relatives des conducteurs et de la surface des matériaux on distingue deux types de rigidité :

- On parle de rigidité diélectrique transversale (RDT), lorsque le champ électrique appliqué est perpendiculaire aux surfaces principales du matériau. Par contre la rigidité diélectrique

longitudinale (RDL) est obtenue entre deux conducteurs situés sur une même surface du matériau (Figure II. 21).

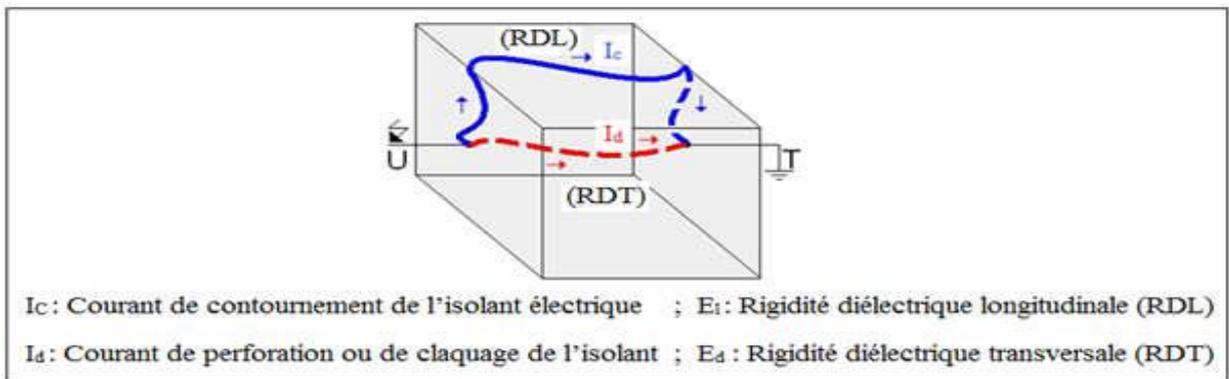


Figure II. 21. Rigidité diélectrique transversale et longitudinale (décharge électrique disruptive ou de contournement)

II.6.3 Résistance d'isolement

On distingue trois types de résistivités (Figure II. 22):

II. 6. 3. 1 Résistance transversale ou volumique (R_v)

Elle est déterminée en appliquant un champ perpendiculaire à la surface d'une éprouvette et en mesurant le courant transversal qui résulte de l'application de ce champ. Elle est relative aux propriétés internes du matériau.

II. 6. 3. 2 Résistance superficielle (R_s)

Elle correspond à celle qui intervient entre deux conducteurs sur une même surface isolante. C'est une notion qui fait intervenir outre la qualité du matériau, le dépôt d'une mince couche conductrice (humidité ou autre) à travers laquelle s'effectue en tout ou en partie la conduction.

II. 6. 3. 3 Résistance d'isolement (R_i)

Elle fait intervenir à la fois la résistance transversale et la résistance superficielle d'un matériau, d'une façon représentative des conditions pratiques d'emploi des matériaux.

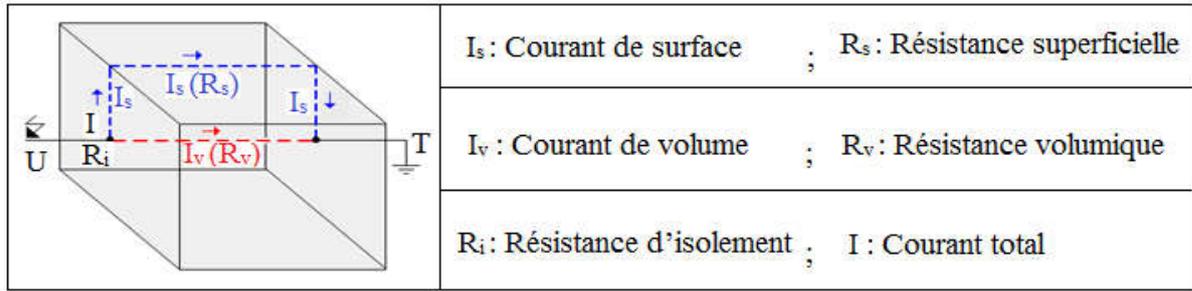


Figure II. 22. Résistances volumique, superficielle et d'isolement électrique

II.6.4 Facteur de pertes

Tout isolant soumis à un champ électrique alternatif est traversé par des courants de conduction et d'absorption qui donnent lieu à des pertes diélectriques. Le diélectrique réel peut être représenté par les schémas équivalents suivants (Figure II. 23).

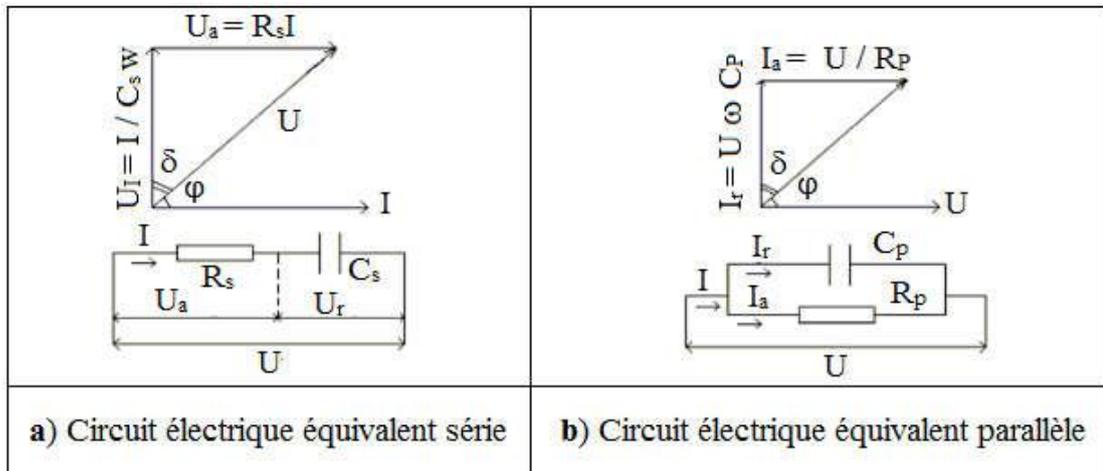


Figure II. 23. Circuit électrique équivalent série et parallèle

II. 7 Conclusion

L'objectif recherché à travers ce chapitre était la caractérisation de la superhydrophobicité des surfaces et sa comparaison à l'hydrophobicité et l'hydrophilité. Différents types d'objets, d'animaux, d'insectes et de plantes possédant cette propriété ont été présentés dans ce chapitre.

Les diverses techniques de fabrication de matériaux artificielles à caractère superhydrophobe ont été aussi décrites. De plus leurs propriétés ainsi que leurs domaines d'applications ont été passés en revue.

Il résulte des applications données dans ce chapitre que la superhydrophobie n'a pas été introduite dans le domaine électrique. Il serait très intéressant d'investir dans ce domaine si l'on désire améliorer la performance électrique des surfaces isolantes de protection des équipements électrique.

Chapitre III :
Résultats de
simulation d'un modèle
superhydrophobe plan

III. 1 Introduction

L'application des surfaces superhydrophobes est importante pour assurer une efficacité opérationnelle de sécurité et d'exploitation des réseaux de transport d'énergie électrique, il n'est donc pas surprenant que ces composants doivent répondre aux exigences particulièrement élevées en matière de fiabilité.

La présence des gouttes d'eau à la surface de l'isolateur est parfois l'origine de perturbations graves sur les réseaux électriques. En effet, la présence de ces gouttes d'eau entraîne la diminution des performances électriques des isolateurs et peut mener, dans certaines circonstances, à l'apparition de l'arc de contournement. La tension de contournement des isolateurs recouverts de ces gouttes d'eau est nettement inférieure à celle des isolateurs propres.

La mesure des champs électriques autour des isolateurs pratiques est difficile et devient de mieux en mieux compliquée. Des configurations expérimentales telles que la sonde électrostatique peuvent être utilisées, mais elles sont sujettes à des erreurs périodiques, bien que cela puisse être amélioré en utilisant un système de détection de champ plus avancé. En variantes, de nombreux chercheurs ont utilisé des techniques de simulation numérique en utilisant un logiciel électromagnétique disponible dans le commerce qui semble plus pratique et moins coûteux, évitant ainsi des expériences de laboratoire coûteuses et complexes souvent difficiles à réaliser.

Dans ce chapitre, la simulation par ordinateur est utilisée pour calculer les distributions de potentiel et de champ électrique le long de la ligne de fuite. Le modèle d'isolateur est développé et simulé dans des conditions de la surface recouverte des gouttes d'eau. L'objectif visé est consisté en la prédiction du sens du mouvement de ces gouttes d'eau au moyen de la distribution de l'intensité du champ et potentiel électrique alternatif résultant au niveau de celles-ci à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics version 5.5.

III. 2 Procédure de simulation

Pour étudier l'influence d'une goutte d'eau sur la distribution du champ et la tension électrique, un modèle de simulation utilisant la méthode des éléments finis (MEF), a été élaborée sous COMSOL Multiphysics. Plusieurs facteurs influençant la distribution du champ et la tension électrique ont été étudiés. Parmi ses facteurs nous citons:

- Nombre des gouttes d'eau ;
- Présence d'un couvert isolant ;
- Permittivité relative du couvert diélectrique ;
- Permittivité relative de la couche superhydrophobe.

III. 3 Modélisation d'éléments finis

Les modèles numériques et les modélisations associées ont été réalisés avec le logiciel commercial d'éléments finis COMSOL Multiphysics version 5.5. La simulation est réalisée en trois étapes consécutives à savoir, les étapes de prétraitement, de résolution et de post-traitement (Visualisations des résultats). Les composants du problème physique tels que la structure géométrique, les propriétés matérielles et conditions aux limites, et les critères de maillage sont présentés comme des entrées dans l'étape de prétraitement. Le modèle mathématique, normalement exprimé sous forme d'équations différentielles qui décrivent le problème physique, est exécuté dans l'étape de résolution. Enfin, dans la phase de post-traitement, le logiciel permet aux utilisateurs de générer un graphique des variables ou paramètres de post-traitement souhaités.

III.3.1 Simulation d'un modèle d'isolateur plane

Le modèle simulé (figure III.1) et adopté dans ce travail est une configuration idéalisée pour l'isolateur extérieur. On s'attend à ce que cette configuration produise la distribution de champ la plus homogène autour des électrodes.

Le modèle géométrique utilisé est composée d'une plaque en verre comme une isolation de base sur laquelle est déposée une couche superhydrophobe et deux électrodes planes en cuivre reposant à ses extrémités. La figure III.1 (a, b) présente le modèle de

simulation. La distance séparant les deux électrodes est prise égale à 10 cm, celle-ci est maintenue fixe durant toute l'étude. La surface du verre a pour dimensions (16 x 0,5) cm², celles de la couche superhydrophobe: (16 x 0,01) cm² et celles du couvert isolant sont: (16 x 0,5) cm². Celles des électrodes planes sont : (3 x 1,2) cm², elles sont suspendues à 1 cm au-dessus de la surface isolante superhydrophobe afin de faciliter la collecte des gouttes dans un récipient après leurs éjection de la surface isolante. Le volume des gouttes est de l'ordre de 100 µl.

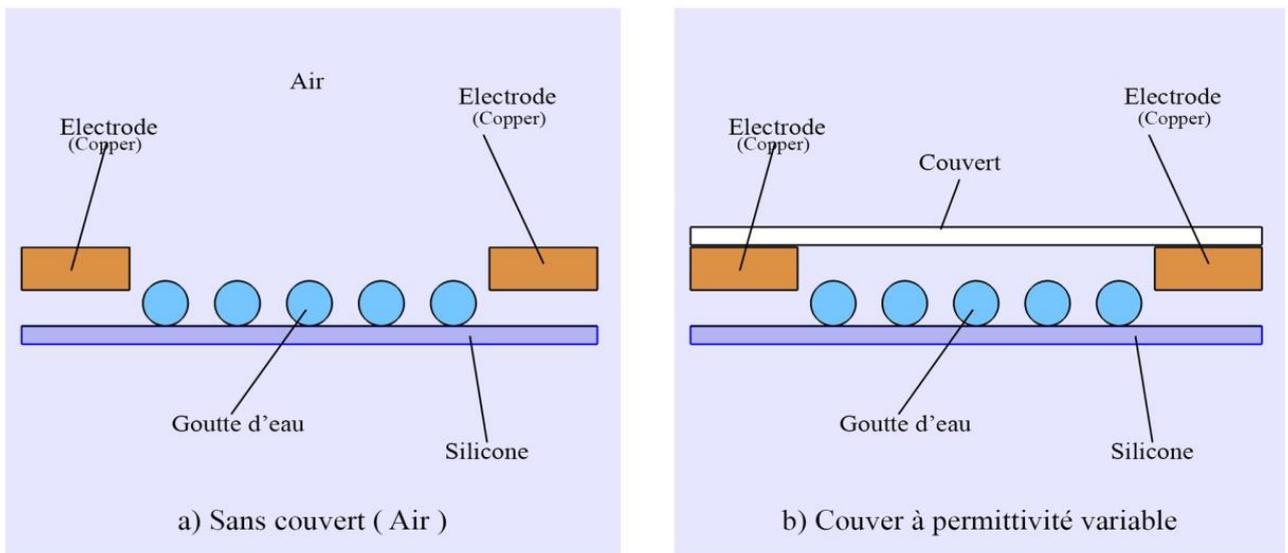


Figure III. 1. Modèle expérimental et de simulation

III.3.2. Propriétés matérielles

Chaque région du modèle a été spécifiée avec les propriétés du matériau appropriées décrites. La permittivité relative des gouttes d'eau a été estimée à 81. La conductivité de la goutte d'eau est de l'ordre de 20×10^{-6} à 20×10^{-3} S/m, une valeur adoptée à partir des mesures de laboratoire. La région de l'air entourant l'isolateur a été spécifiée avec une très faible conductivité $\sigma = 1,0 \times 10^{-14}$ S/m. Les propriétés des matériaux utilisés pour la modélisation de l'isolant dans cette étude sont résumées dans le tableau suivant :

Tab. III. 1: Propriétés physiques des matériaux utilisés dans le modèle

Matériau	Permittivité relative	Conductivité électrique ^(S/m)
Air	1	10^{-14}
Cuivre	1	5.99×10^7
Verre	5.5	10^{-14}
Couche superhydrophobe	1	10^3
Eau	81	20×10^{-6}
Couvert diélectrique	20 à 160	10^{-12}

III .3.3 Maillage

Après avoir terminé l'étape initiale avec la structure du modèle, ainsi que la spécification des propriétés matérielles et des conditions aux limites, le problème de domaine entier est discrétisé en éléments finis de type tétraèdre pendant le processus de maillage. Pour améliorer la précision des résultats de simulation calculés, un raffinement du maillage (figure III.2) est effectuée dans la région d'intérêt pour augmenter le nombre d'éléments de maillage le long de la surface de l'isolant et ainsi améliorer la précision de la solution. Le choix du nombre d'éléments est important et doit être équilibré, car moins d'éléments de maillage peut réduire la précision des résultats de simulation, tandis qu'un grand nombre d'éléments augmente la taille du problème et entraîne un temps de traitement plus long. Ainsi, il est important de trouver un optimum d'éléments qui facilitera un temps de calcul plus rapide sans compromettre la précision du résultat.

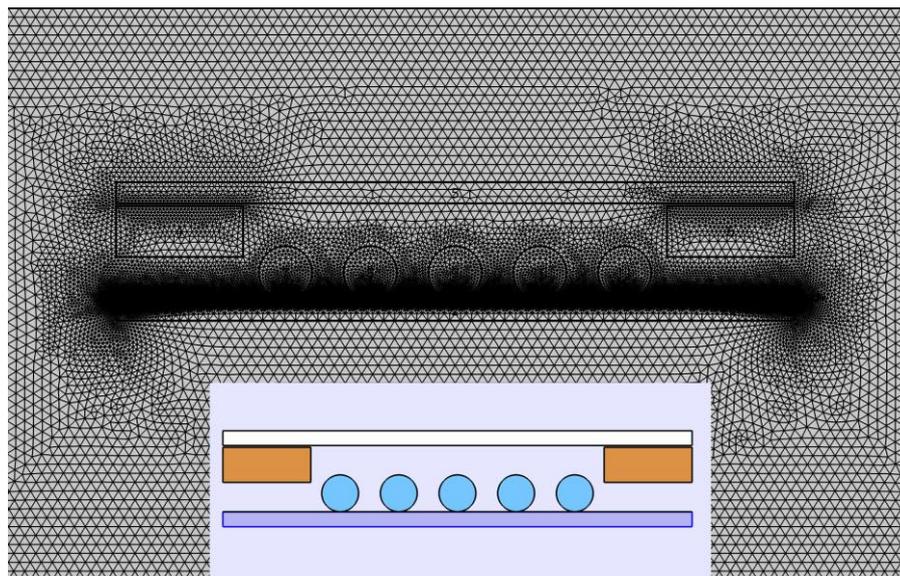


Figure III. 2. Maillage du modèle étudié

III.4 Paramètres d'influence du champ et potentiel électrique

III.4.1 Nombre des gouttes dans le cas d'un modèle sans couvert

Dans notre étude, nous avons déposé cinq gouttes d'eau sur l'isolation superhydrophobe horizontale. Celles-ci sont positionnées en ligne droite perpendiculaire aux électrodes sous tension et terre.

Dans la première étape, nous avons commencé par la simulation de l'effet de présence de cinq gouttes, déposée horizontalement sur la ligne de fuite de notre modèle sans couvert, après l'obtention de la courbe du champ électrique nous avons remarqué que l'intensité du champ est très élevé au niveau de l'électrode terre, ce qui implique l'évacuation de cette goutte en premier lieu (Figure III. 4. a1 et b1). Par la suite, nous signalons l'éviction de la goutte déposée au voisinage de l'électrode HT (Figure III. 4. A2 et b2). Ensuite les gouttes intermédiaires du côté HT puis celle du côté terre (Figure III. 4. A3, b3, a4 et b4). En dernier lieu, nous remarquons l'éjection de la goutte déposée au milieu de la distance interélectrode (Figure III. 4. a5 et b5).

La tension approximative de l'expulsion de la première goutte est de l'ordre de 55 kV ($U = E/d$), 52 kV pour G_2 , 43 kV pour G_3 et 37 kV pour G_4 et vers la fin 35 kV pour la dernière goutte.

En réalité l'évacuation des gouttes d'eau en dehors de la surface isolante est engendré par les forces hydrodynamiques et électriques, sont caractérisées par l'équation de Navier-Stockes. Cette dernière est basée sur la conservation des forces de mouvement par modélisation du déplacement d'une incompressible goutte d'eau selon la formule suivante:

$$-\nabla P_{\Delta} + \mu \Delta^2 V + F = d \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right) \quad (\text{III. 1})$$

Où : d, V et μ caractérisent respectivement la densité du fluide, sa vitesse et sa viscosité;

Les trois termes: ∇P_{Δ} , $\mu \Delta^2 V$ et F représentent respectivement les effets de forces dues respectivement à la pression, la viscosité et la force électrostatique exercées sur la goutte;

Le membre droit de l'égalité III. 1 désigne l'accélération de la goutte sous l'action des trois forces suscitées.

Pour la fréquence $f = 50$ Hz, la goutte garde sa forme sphérique pendant son mouvement [52] et pratiquement la surface de l'isolation est superhydrophobe, la force électrostatique joue un rôle très prédominant sur le mouvement de la goutte sur la surface superhydrophobe de l'isolation [52,53 et 54]. Pour une goutte individuelle, reposant sur cette surface et mise sous l'action d'un champ électrique non nul, l'expression de cette force électrique est de la forme [55]:

$$F = \rho_t E - \frac{1}{2} |E|^2 \nabla \epsilon + \frac{1}{2} \nabla \left(|E|^2 \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho_m} \rho_m \right) \quad (\text{III. 2})$$

Où:

E, ρ_t , ϵ et ρ_m représentent respectivement le champ électrique, la charge totale, la permittivité absolue de l'eau et la densité volumique.

Les trois termes du membre droit de l'équation III. 2 représentent respectivement la force de Coulomb, la force diélectrophorétique et la pression d'électrostriction.

Dans la présente étude, l'évacuation des gouttes d'eau est engendrée par une seule force, qui est la force de Coulomb, les autres forces sont négligés à cause de l'uniformité du champ électrique exercé entre les électrodes planes, de plus à cause de la conservation de la forme sphérique de la goutte d'eau lors de son expulsion de l'isolation.

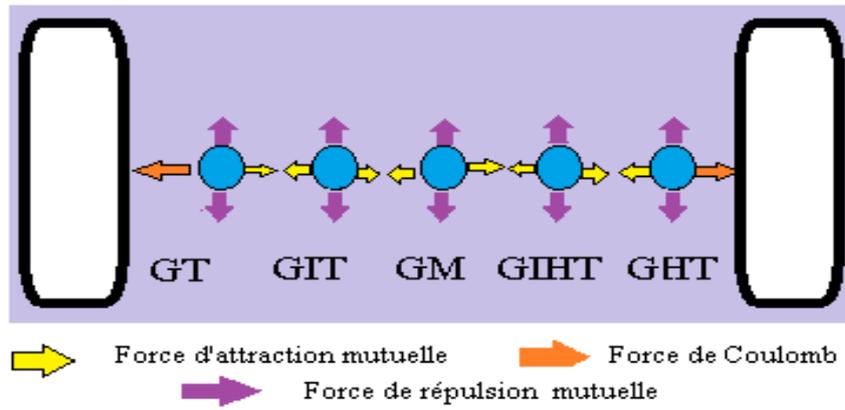


Figure III. 3: Les forces électriques exercées sur un dépôt de gouttes d'eau sous alternance positive de la tension alternative

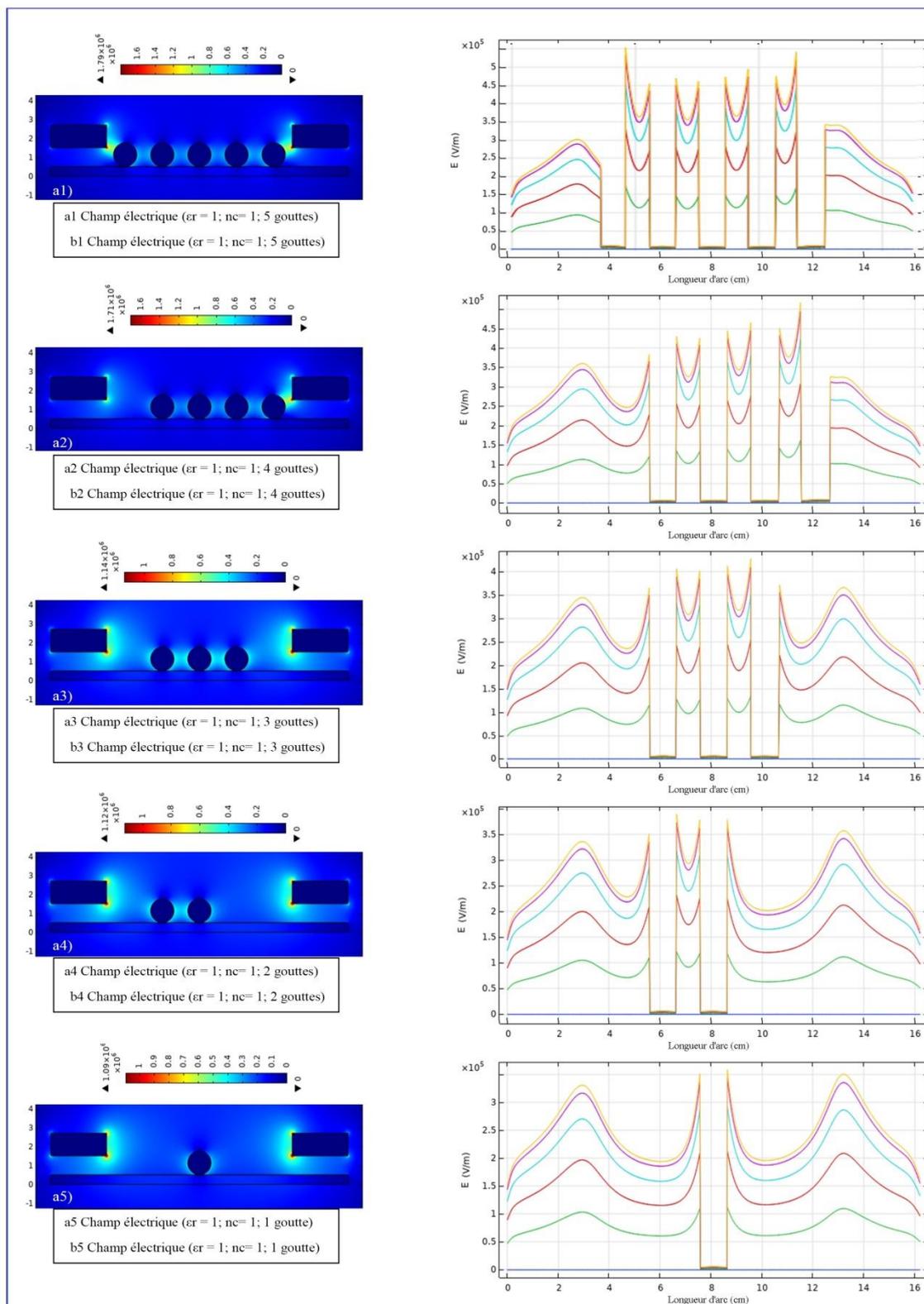


Figure III. 4: Répartition du champ électrique sur un nombre variable de gouttes déposées sur une isolation sans couvert

III.4.2 Nombre des gouttes dans le cas d'un modèle avec couvert

Dans cette partie, nous allons tenter de prophétiser l'ordre et le chemin du déplacement des cinq gouttes d'eau au moyen de la répartition du champ électrique résultant le long de l'isolation superhydrophobe, avec présence d'un couvert isolant de permittivité relative de l'ordre de 20. Les résultats de simulation de la distribution du champ électrique sur un nombre de gouttes d'eau variable recouvrant une isolation avec couvert sont illustrés en figure III. 6.

Il est à signaler que le champ électrique à proximité des électrodes de base est plus intense en présence du couvert isolant par rapport à valeurs obtenues précédemment dans le modèle sans couvert. Il est à constater l'évacuation de la goutte située au voisinage de l'électrode mise à la terre (GT) premièrement avec une tension entre 86 et 50 kV, puis nous remarquons l'expulsion de la goutte du côté HT (GHT) avec une tension entre 85 et 51 kV, par la suite les deux gouttes intermédiaires (GIT) et milieu (GM) avec des tensions presque proches (G_3 : 46 et 45, G_4 : 41 et 35, G_5 : 40 et 35).

D'après ces résultats, nous pouvons dire que le couvert diélectrique affecte l'ordre du mouvement des gouttes, mais ce dernier s'effectue toujours dans le même sens.

L'étude numérique confirme celle expérimentale réalisée auparavant par [Khlaed]. Ils ont constaté que l'expulsion des gouttes d'eau s'effectue en trois modes différents, indépendamment de la configuration des lignes des gouttes d'eau (aligné ou bien en zigzag), ou bien le nombre de rangée déposée dans la distance interélectrode :

- Groupe-individuelle : dans ce cas l'évacuation se réalise en ensemble des gouttes d'eau séparément et successivement en dehors de l'isolation, de plus, il y a une possibilité d'éjection des gouttes individuellement.
- Par groupes : L'expulsion s'effectue en groupe des gouttes d'eau au même temps.
- Individuelle : l'éjection s'effectue par l'éviction des gouttes d'eau une après l'autre, chacune dans un sens.

Concernant le sens d'éjection, il a été signalé le mouvement des gouttes soit du côté HT vers la terre, du côté terre vers HT ou bien dans les deux sens vers la terre et l'électrode HT. Cela s'effectue une fois la tension est appliquée, une force électrique s'exerce sur l'interface liquide / air. Les directions des forces électriques pointaient vers le centre des

gouttelettes. Lorsque la force électrique dépendant du temps agissant sur l'interface air / liquide des gouttelettes était plus grande que celle sur l'interface solide / liquide, les gouttelettes ont été étirées horizontalement en suivant la direction du champ électrique. Dans ce cas, il y aura deux possibilités :

- Soit l'expulsion directe de la goutte ;
- Ou bien, avec la diminution de la distance entre les gouttes, un minuscule pont liquide s'est formé entre celles-ci. La croissance du pont liquide a été tirée par la force de tension superficielle et la force électrique. Entre-temps, l'air emprisonné sous le pont liquide a été expulsé dans la direction perpendiculaire au modèle à deux dimensions jusqu'à la fusion des petites gouttes en une plus grande, la force électrique à la jonction triphasée était la plus élevée. Selon la formule de la force électrique, le point maximum du champ électrique était à la jonction triphasée. Comme la direction de la force électrique en ce point vers le centre du pont liquide, la composante de la force électrique le long de la surface superhydrophobe pourrait favoriser la coalescence des gouttelettes, La nouvelle goutte d'eau générée était étirée verticalement et instable [51].

III.4.3 Effet de la variation de la permittivité relative du couvert diélectrique

Vu l'importance du couvert isolant, nous avons pensé à varier la permittivité relative du diélectrique, la figure III. 7 illustre la distribution du champ électrique sur la surface superhydrophobe, pour cinq valeurs de permittivité relative ($\epsilon_r = 20, 50, 80, 100$ et 160), pour un modèle à cinq gouttes d'eau (Figure III. 5).

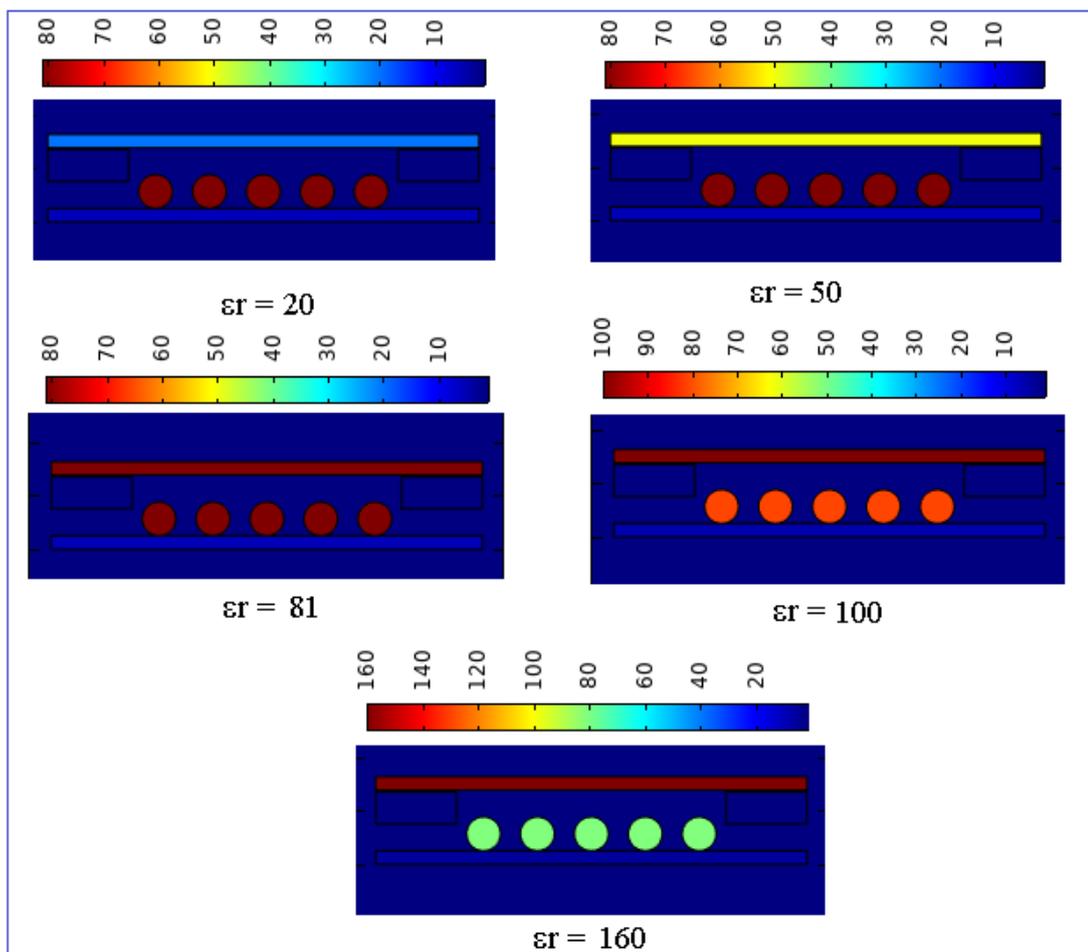


Figure III. 5. Variation de la permittivité relative du couvert diélectrique

Il en résulte une faible diminution de l'intensité du champ électrique aux sommets des gouttes d'eau, avec l'élévation de la valeur de permittivité relative du couvert. Ce qui implique, la similitude de l'ordre et du sens d'expulsion des gouttes d'eau de la surface isolante.

La permittivité traduit l'existence d'un mécanisme de polarisation interne au matériau. La figure III.6 illustre la variation du taux de polarisation en fonction de l'augmentation de la permittivité relative. Une légère diminution du taux de polarisation a été remarqué plus la permittivité du couvert augmente. De plus, il en résulte que la polarisation est plus faible au niveau de la couche superhydrophobe ou la permittivité est plus réduite.

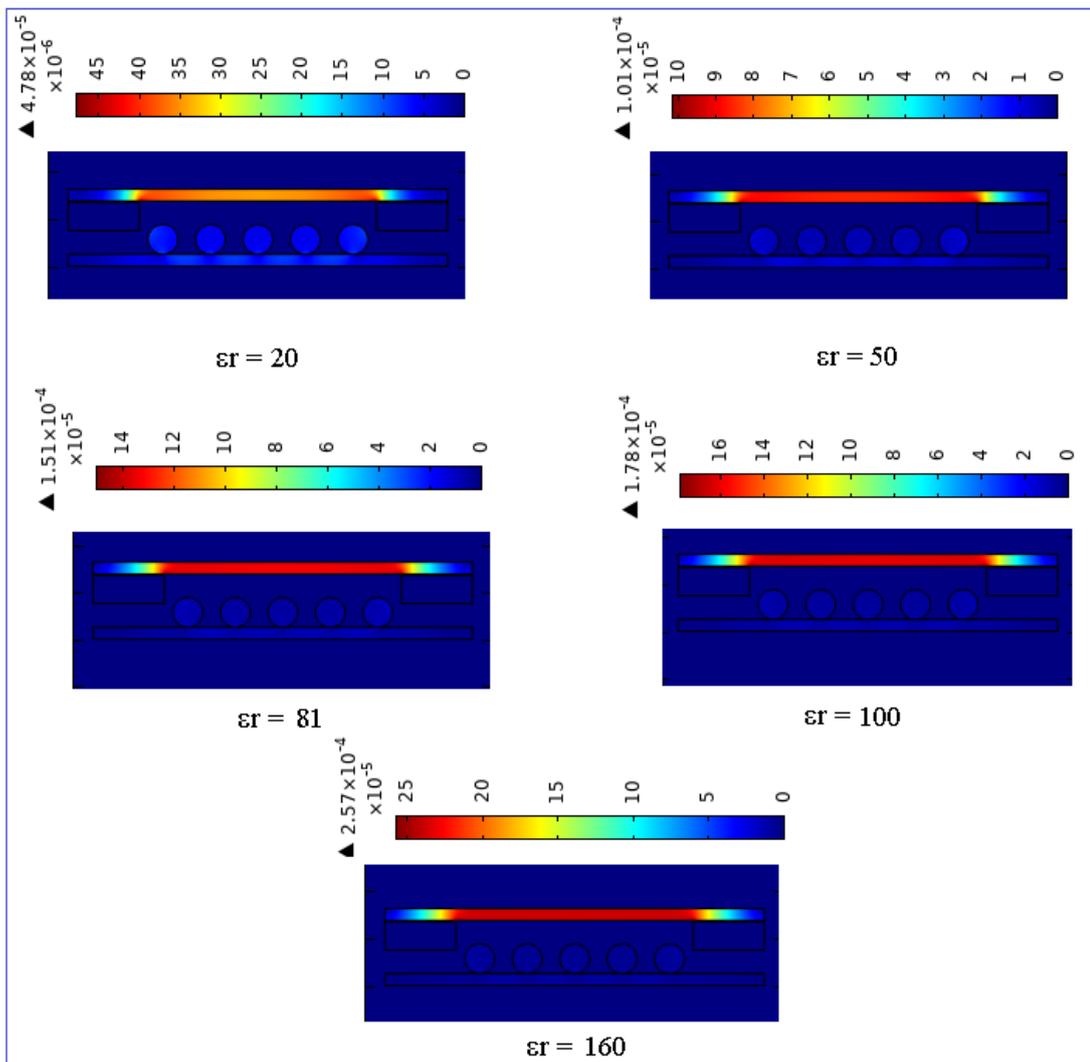


Figure III. 6. Polarisation au niveau du couvert diélectrique

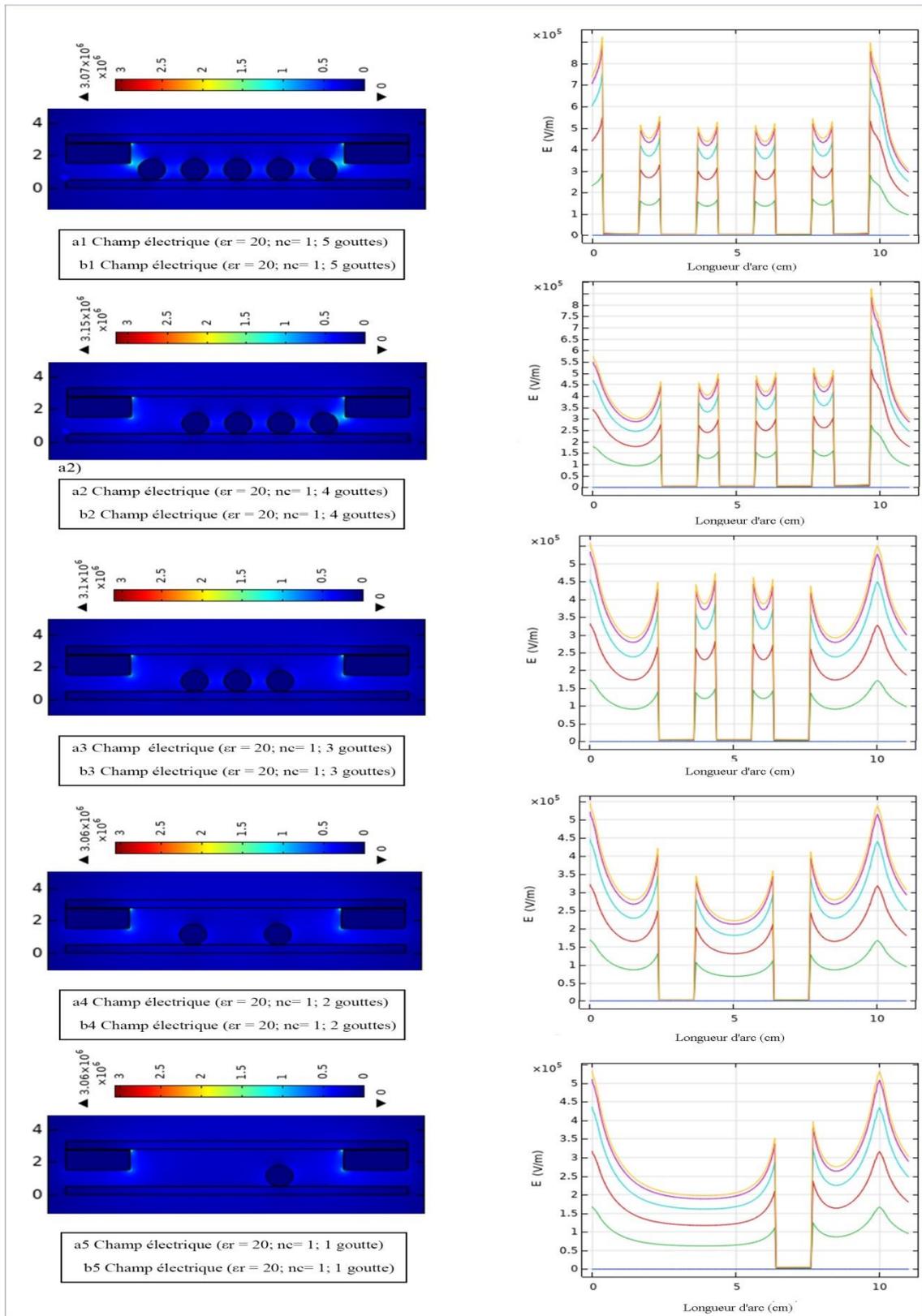


Figure III. 7. Distribution du champ électrique en fonction du nombre de gouttes d'eau d'une isolation avec couvert ($\epsilon_r = 20$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

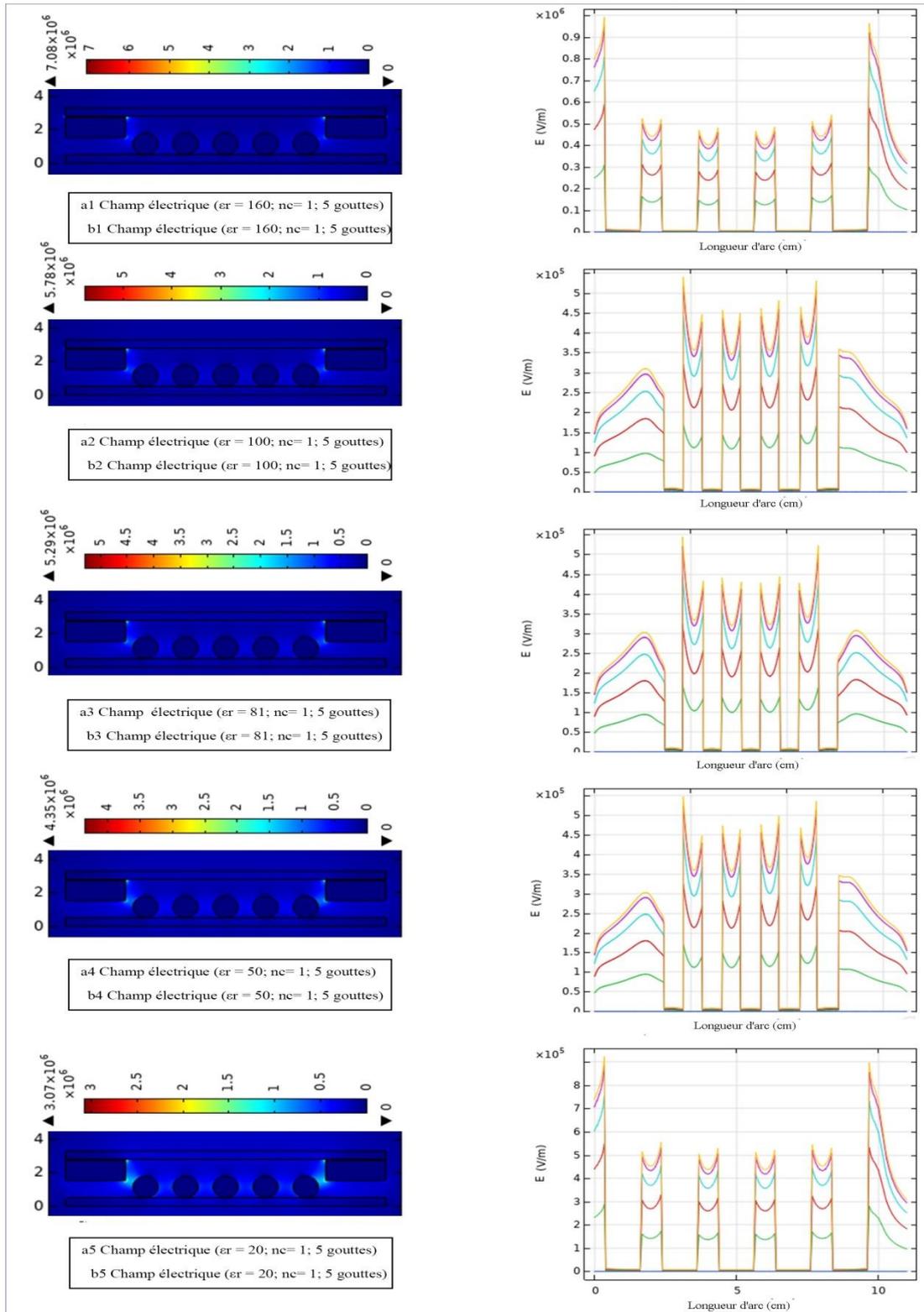


Figure III. 8. Répartition du champ électrique sur 5 gouttes d'eau d'une isolation avec couvert à permittivité variable ($\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

III.4.4. Influence de la variation de la permittivité relative de la couche superhydrophobe

La permittivité joue également un rôle capital dans la répartition du champ électrique à l'intérieur d'une isolation à plusieurs matériaux. En effet, on sait qu'aux interfaces il y a conservation de l'induction électrique ($D_1 = D_2$), ce qui signifie que la répartition du champ électrique s'effectue en raison inverse des permittivités ($\epsilon_{r1}E_1 = \epsilon_{r2}E_2$). En d'autres termes, on peut retenir que le champ électrique est le plus élevé dans les matériaux à faible permittivité.

La figure III.9 montre la distribution du champ électrique dans le cas d'une couche superhydrophobe de permittivité relative de l'ordre de 2.8.

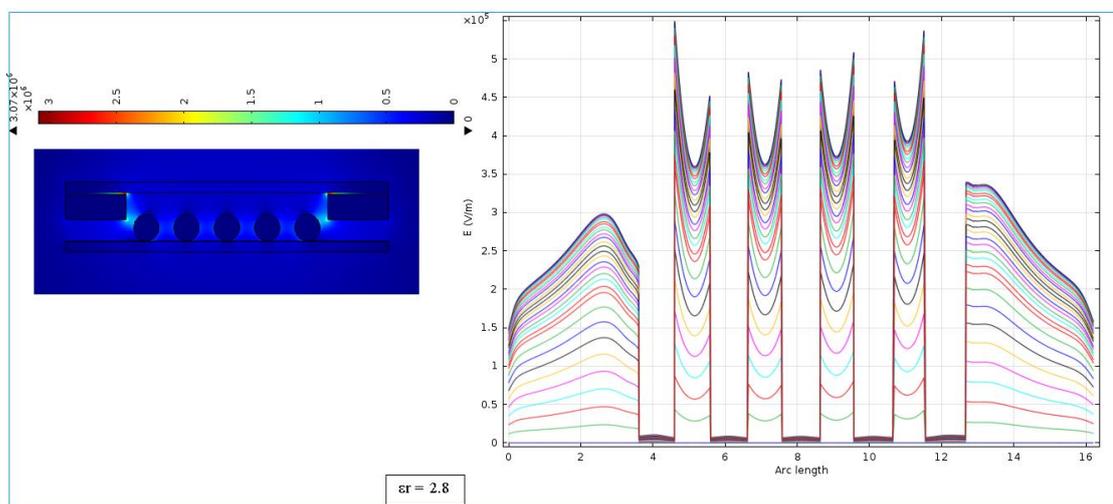


Figure III. 9. Distribution du champ électrique sur une surface superhydrophobe de 2.8 de permittivité relative étudiants

Il est à constater que quoique ce soit la valeur de la permittivité relative de la couche superhydrophobe, l'intensité du champ électrique reste constante, ce qui peut être traduit par le fait que notre modèle avec une couche de permittivité relative de l'ordre de 1 se rapproche plus à la réalité et dans ce cas la goutte garde sa forme sphérique, ce qui facilite leurs glissement en raison de l'effet de la gravité en dehors de la surface isolante avant l'apparition des décharges de contournement. La gouttelette transportait toutes les petites gouttelettes le long de de son chemin, laissant une zone de bande sèche.

Ce qui n'est pas le cas pour l'étude réalisée avec l'hypothèse que la permittivité de la couche superhydrophobe est de 2.8 et la goutte garde une forme sphérique. Cette hypothèse n'est pas juste, dans ce cas les gouttelettes d'eau sont de forme semi-sphérique, elles sont allongées et restent collées sur la surface qui se comporte comme une surface hydrophobe, par la suite un pont liquide s'est formé entre les gouttelettes sous champ électrique. La coalescence des gouttes d'eau qui ont été poussées par la force de tension superficielle et Obliger.

III.4.5. Distribution du potentiel électrique sur la surface superhydrophobe

Les figures III.10 et III.11 illustrent respectivement la variation du potentiel électrique en fonction du nombre des gouttes d'eau déposées le long de la ligne de fuite de l'isolation superhydrophobe, dans les deux cas sans et avec couvert diélectrique. Il en résulte la similitude des valeurs de potentiel au niveau des gouttes d'eau indépendamment du modèle simulé et des paramètres d'influence examinés. Il est à remarquer que les résultats obtenus sont de polarité négative.

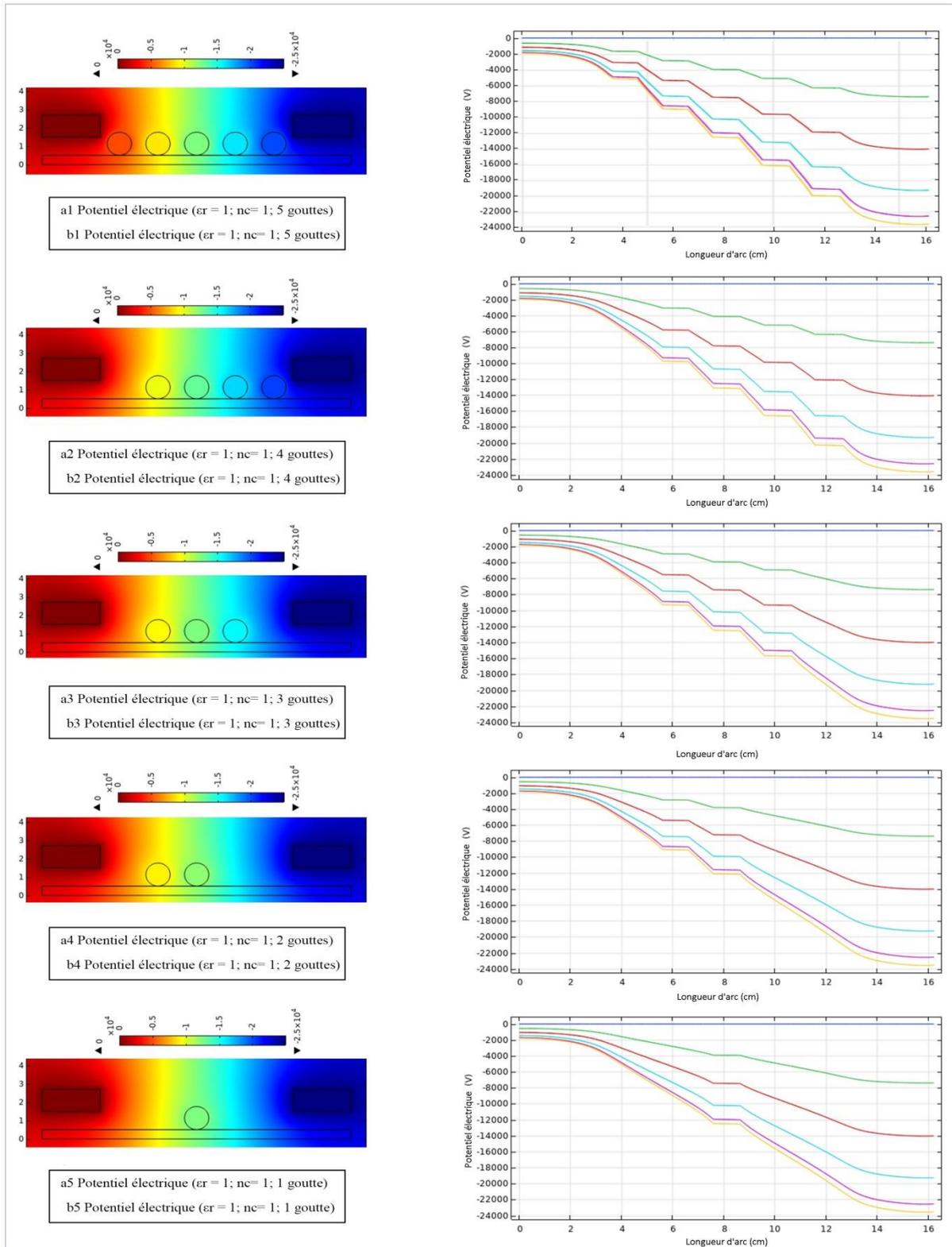


Figure III. 10. Répartition du potentiel électrique sur 5 gouttes d'eau d'une isolation sans couvert ($\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

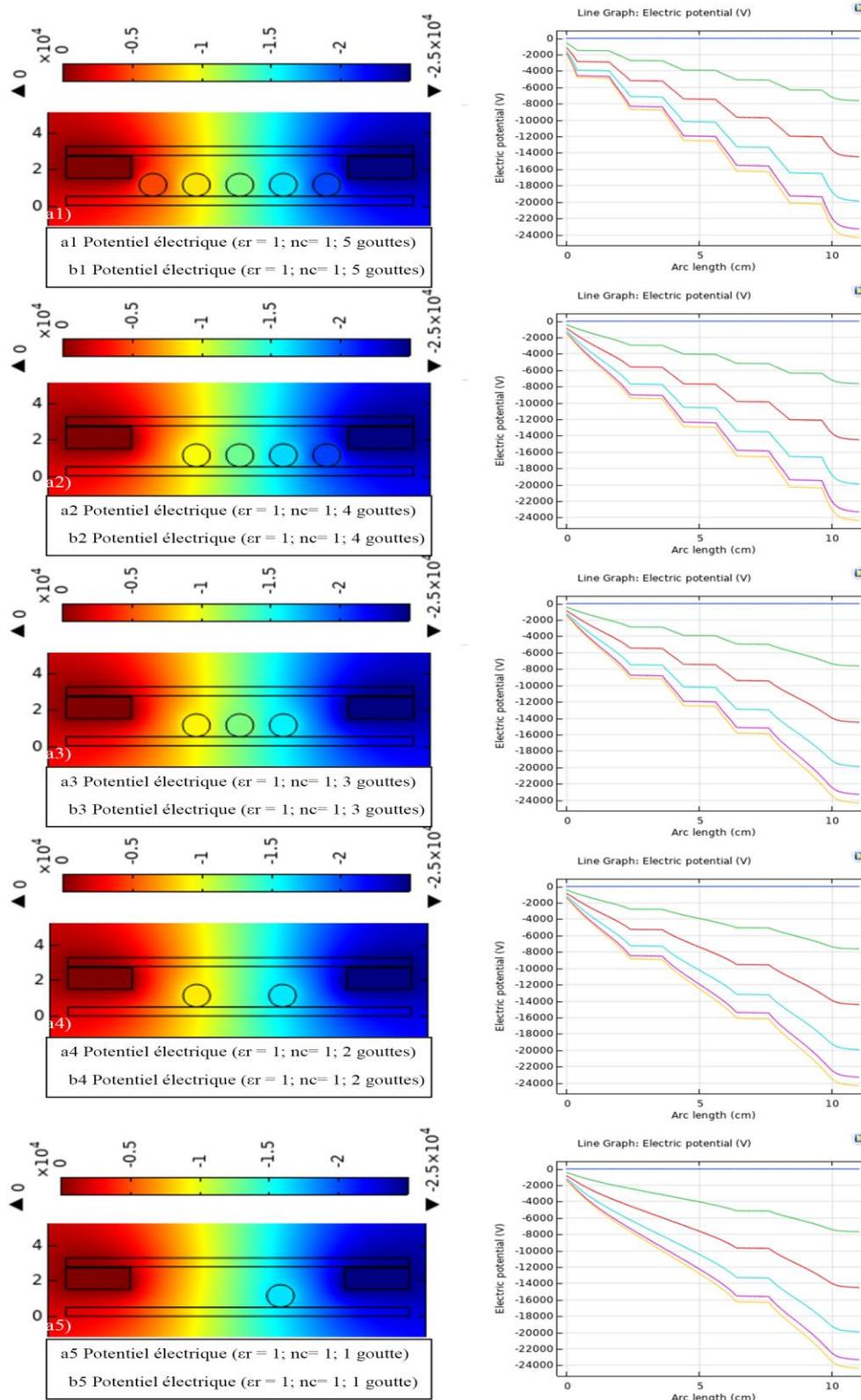


Figure III. 11. Répartition du potentiel électrique sur 5 gouttes d'eau d'une isolation avec couvert ($\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

III.5. Conclusion

Nous avons abordé dans ce chapitre une étude numérique de la dynamique de cinq gouttes d'eau déposées sur une surface diélectrique superhydrophobe en présence du champ et du potentiel électrique, lorsque cette surface est mise sous tension de service alternative. Deux configurations ont été proposées, l'une avec la présence d'un couvert isolant de permittivité relative variable déposé sous les deux électrodes, l'autre sans la présence de celui-ci. Une comparaison entre les résultats expérimentaux réalisés auparavant par d'autre référence et ceux obtenus après la simulation a été effectuée.

Comme principaux résultats, nous pouvons dire que :

- Une conformité entre les résultats numérique et expérimentale a été obtenue dans ce qui concerne la prédiction du sens et du mode d'expulsion des gouttes d'eau en dehors d'une isolation superhydrophobe.
- La présence du couvert n'a pas un grand effet sur le sens de l'évacuation des gouttes d'eau.
- L'ordre d'éviction des gouttes d'eau n'est pas le même dans le modèle sans et avec couvert diélectrique.
- La permittivité relative du couvert isolant n'influe pas la distribution du champ électrique aux sommets des gouttes d'eau.
- Le choix de la valeur de la permittivité relative de la couche superhydrophobe ($\epsilon_r = 1$) dans cette étude est le plus logique, le comportement de la goutte d'eau se rapproche plus à la réalité, et sa forme est sphérique ce qui prouve que pour l'étude avec une permittivité ($\epsilon_r = 2.8$), l'une des hypothèse n'est pas juste, soit la permittivité doit être plus faible ou bien la forme de la goutte est semi-sphérique et pas sphérique.

Conclusion générale

Conclusion générale

D'après les résultats expérimentaux réalisés auparavant par des chercheurs dans le domaine de réseau électrique, il a été constaté que la présence de gouttelettes d'eau sur les surfaces isolantes peut décider de la fiabilité du système d'isolation des réseaux de transmission d'énergie.

De plus, la présence d'un certain seuil du champ électrique sur les surfaces des isolateurs affecte le comportement des gouttes, celle-ci présentent quelques réactions. A savoir, leurs déformations, distorsions et mouvements, et par la suite le contournement de l'isolation.

Le modèle numérique développé dans ce travail nous a permis d'analyser la répartition du champ électrique sur une surface superhydrophobe en présence des gouttes d'eau de nombre et volume fixe. Les résultats concernant aussi bien le modèle sans couvert diélectrique et avec couvert à permittivité relative variable.

Les résultats ont montré des régions sur la surface isolante où la contrainte électrique est très importante notamment au niveau des électrodes, une intensification du champ électrique due à la présence des gouttelettes d'eau notamment aux points de jonction des trois domaines (gouttelette d'eau, air et surface superhydrophobe) où le champ est maximal. Ceci permet d'obtenir des informations utiles sur la prédiction du sens et de l'ordre d'évacuation des gouttes d'eau de la ligne de fuite.

Les résultats démontrent également qu'un facteur tel que la permittivité relative du couvert diélectrique ne présente pas une influence significative sur l'ordre et le sens du déplacement des gouttes d'eau. Par contre, la présence du couvert n'affecte pas le chemin de l'éjection des gouttes d'eau mais elle influe l'ordre de cette expulsion.

De plus, il en résulte que la permittivité relative de la couche superhydrophobe a une incidence notable sur l'amplification du champ électrique à la surface de l'isolation, et la forme de la goutte d'eau.

Enfin, nous recommandant de simuler le phénomène de coalescence des gouttes d'eau afin de mieux comprendre l'influence du champ électrique sur la dynamique de celles-ci.

Références bibliographiques

- [1] S. Tounsi, F. Chikh, « Influence du Sol sur le Comportement d'un Modèle d'Isolateur sous Tension », Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, ENP, Alger, 2008.
- [2] Ahmed Seddik Bouhadjar, Amokrane Mounir, « Caractérisation de l'état de surface d'un isolateur par technique d'ondelettes modélisation », Mémoire d'Ingénieur d'Etat, ENP d'Alger, Juin 2008.
- [3] N. Dhahbi Megriche, « Modélisation dynamique des décharges sur les surfaces d'isolateurs pollués sous différentes formes de tension: élaboration d'un critère analytique de propagation », Sciences de l'ingénieur physiques, Ecole Centrale de Lyon, 1998.
- [4] Bourim Hammoum, Ahmed Kerbouche, «Etude du Phénomène de Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région Electrique du Centre Algérien», Mémoire d'Ingénieur d'Etat ENP, Alger, 2007.
- [5] Satta Samia, «contribution à l'étude de l'influence de la pollution discontinue sur le comportement des isolateurs : expérimentation et simulation », mémoire de magister, SETIF.
- [6] Belhouch et Khaled, « Estimation des paramètres de l'arc de contournement des isolateurs pollués en utilisant l'approche génétique », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas Setif.
- [7] El Bahi Azzag, « problèmes de contournement et perforation des isolateurs de haute tension », thèse doctorat d'état, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2007.
- [8] S. Tounsi, F. Chikh "Influence du Sol sur le Comportement d'un Modèle d'Isolateur sous Tension" Mémoire du projet de fin d'études laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger. Juin 2008.
- [9] G. Talal, «Comportement d'un modèle d'isolateur sous tension impulsionnelle», mémoire de magister en génie électrique, laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger 2007.
- [10] R. Bouzeroura « Etude du développement d'arcs électriques parallèles sur une surface isolante non uniformément polluée sous tension continue », Mémoire de magister, promotion, Université de Bejaia, 2009.
- [11] B. Hammoum, A. Kerbouche "Etude du Phénomène de Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région Electrique du Centre Algérien" Mémoire du projet de fin d'études, école nationale polytechnique d'Alger, Juin 2007.
- [12] X. Ducouret «lignes aériennes : matériels» techniques de l'ingénieur D4423 .
- [13] Adel kara, « contribution à l'étude d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué », Mémoire De magister, Seif, 2013.

- [14] Ahmed Seddik Bouhadjar, Amokrane Mounir, « Caractérisation de l'état de surface d'un isolateur par technique d'ondelettes modélisation », Mémoire d'Ingénieur d'Etat, ENP d'Alger, Juin 2008.
- [15] C. H. A. ELY, P. J. LAMBETH, J. S. T. LOOMS et D. A. SWIFT, C.E.G.B « Contournement des polymères humides et pollués l'ailette BOOSTER », CIGRE, Rapport 15 - 02, Paris, France, 1978.
- [16] A. Cimador, S. Vitet, " La Pollution des Isolateurs" , EDF-Epure, No . 27, Juillet 1990.
- [17] A. Mekhaldi, « Etude des phénomènes de conduction et de décharges électriques sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz », Thèses de Doctorat, ENP, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, Septembre 1999.
- [18] «Characterization and Distribution of Water-repellent, Self-cleaning Plant Surfaces», Neinhuis, C. ; Barthlott, W., Ann. Botan. (1997), 79, 667-677.
- [19] T. Young, «An essay on the cohesion of fluids, » Philos. Trans. R. Soc. London, vol. 95, pp. 65–87, 1997.
- [20] D. Quéré, « Lois du mouillage et de l'imprégnation, » Tech. Ing, vol. Principe de formulation, no j2140, 2003.
- [21] G. Béranger and H. Mazille, « Approche scientifique des surfaces. Caractérisation et propriétés, » Tech. Ing. vol. Traitement de surface des matériaux : contexte et gestion environnementale, no. M1425, 2005.
- [22] R. N. Wenzel, « Resistance of solid surfaces to wetting by water, » Ind. Eng. Chem., vol. 28, no. 8, pp. 988–994, 1936.
- [23] «Wettability of porous surfaces», Cassie, A. B. D. Baxter, S. Trans. Faraday Soc. (1944), 40, 546-51.
- [24] http://www.mineralogie.fr/Structure_Matiere.html
- [25] IEEE Std 957«IEEE guide for cleaning isolators», 1995
- [26] X. GAO and L. Jiang. Water-repellent legs of water striders. Nature, 432:36, 2004.
- [27] Xuefeng Gao, Xin Yan, Xi Yao, Liang Xu, Kai Zhang, Junhu Zhang, Bai Yang, and Lei Jiang. The dry-style antifogging properties of mosquito compound eyes and artificial analogues prepared by soft lithography. Advanced Materials, 19(17):2213–2217, 2007.
- [28] Jari Malm, Elina Sahramo, Maarit Karppinen, and Robin H. a. Ras. Photo-Controlled Wettability. Switching by Conformal Coating of Nanoscale Topographies with Ultrathin Oxide Films. Chemistry of Materials, 22(11):3349–3352, June 2010.
- [29] H.J. Gao, X. Wang, H.M Yao, S. Gorb, E. Arzt , Mater, 2005, 37 , 275-85.
- [30] K. Liu, et al. Nanoscale 4 (3) (2012) 768.

- [31] Y. Cai, et al. *Adv. Funct. Mater.* 24 (6) (2014) 809
- [32] <http://physique.unice.fr/sem6/20142015/PagesWeb/PT/Monomere/page3.html>
- [33] Dossier olympiades de la physique « expériences autour de la goutte », 2006.
- [34] W. Barthlott and C. Neinhuis. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*, 202:1–8, 1997.
- [35] Zdenek Cerman, Boris F Striffler, and Wilhelm Barthlott. Dry in the water: the superhydrophobic water fern salvinia—a model for biomimetic surfaces. In *Functional surfaces in biology*, pages 97–111. Springer, 2009.
- [36] Wilhelm Barthlott, Thomas Schimmel, Sabine Wiersch, Kerstin Koch, Martin Brede, Matthias Barczewski, Stefan Walheim, Aaron Weis, Anke Kaltenmaier, Alfred Leder, et al. The salvinia paradox: superhydrophobic surfaces with hydrophilic pins for air retention under water. *Advanced Materials*, 22(21):2325–2328, 2010.
- [37] M.A.Samaha, M.Gad-el-Hak, «Polymeric Slippery Coatings: Nature and Applications» *Polymers* 2014, 6, pp.1266-1311.
- [38] «Thermal effect on superhydrophobic performance of stearic acid modified ZnO nanotowers», Saleema, N. Farzaneh, M., *Appl Surf. Sci.* (2007), 254, 6.
- [39] «One-step fabrication process of superhydrophobic green coatings», Sarkar, D.K. Saleema, N., *Surf.Coat. Technol.* (2010), 204, 2483-2486.
- [40] «Superhydrophobic properties of ultrathin rf-sputtered Teflon films coated etched aluminum surfaces», Sarkar, D.K.; Farzaneh, M.; Paynter, R.W., *Mater. Lett* (2008), 62, 1226-1229.
- [41] «Superhydrophobic wind turbine blade surfaces obtained by a simple deposition of silica nanoparticles embedded in epoxy», Karmouch, R. Ross, G.G., *Appl Surf Sci.* (2010), 257, 665-669.
- [42] «Superhydrophobic Carbon Nanotube Forests», Lau, K.K.S.; Bico, J.; Teo, K.B.K.; Chhowalla, M.; Amaratunga, G.A.J.; Milne, W.I.; McKinley, G.H. ; Gleason, K.K., *Nano Lett.* (2003), 3, 1701-1705.
- [43] «A one-step process to engineer superhydrophobic copper surfaces», Huang, Y.; Sarkar, D.K.; Chen, X.G., *Mater. Lett.* (2010), 64, 2722-2724.
- [44] «Dual-scaled stable superhydrophobic nano-flower surfaces», Chen, L; Xiao, Z.; Chan, P.C.H. ; Lee, Y.K., *TRANSDUCERS 2009 - 15th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems* (2009), 441-444.
- [45] «Simple nanofabrication of a superhydrophobic and transparent biomimetic surface», Lim, H.; Jung, D.H.; Noh, J.H.; Choi, G.R. ; Kim, W.D., *Chinese Science Bulletin* (2009), 54, 3613-3616.

- [46] <https://www.industrie-techno.com/du-beton-intelligent-qui-dure-plus-d-un-siecle.29538>
- [47] <http://ultraeverdry-tap.com/>.
- [48] STO, | Façades | Revêtements de façade |, Rev.nr. 02/08.2013 Printed in Belgium.
- [49] J.D. Brassard, «revêtements nanostructures superhydrophobes en vue d'application en aérodynamique», mémoire (M. Sc. A.), université du Québec à Chicoutimi, Canada, 2011.
- [50] A. Kuechler, «Hochspannungstechnik: Grundlagen – Technologie – Anwendungen», 3ème édition, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, avril 2009, Germany.
- [51] S. Wei, H. Jin, H. Zhou, K. Yang, N. Gao, and W. Li , «Dynamic behavior of water droplets on wetted superhydrophobic surfaces under a high AC electric field », AIP Advances 9, 065307, doi.org/10.1063/1.5098303. 2019.
- [52] K. Takeda, A. Nakajima, Y. Murata, k. Hashimoto and T. Watanabe, «Control of water droplets on super-hydrophobic surfaces by static electric field», Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 41 (2002), Part. 1, No. 1, pp. 287-291.
- [53] J. Li, Y. Wei, Z. Huang, F. Wang, X. Yan, «Investigation of the Electric Field Driven Self-propelled Motion of Water Droplets on a Super-hydrophobic Surface», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 23, No. 5, pp. 3007 – 3015, 2016.
- [54] A. Torkkeli, J. Saarilahti, A. Haara, H. Harma, T. Souka, and P. Tolonen, «Electrostatic transportation of water droplets on superhydrophobic surfaces», IEEE Conf. Micro electro Mechanical Systems (MEMS), pp. 475-478, 2001.
- [55] H. Morgan and N. G. Green, «AC Electrokinetics: colloids and nanoparticles», Research Studies Press LTD, Baldock, Hertfordshire, England, 2003.