

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER EN ELECTROTECHNIQUE
Spécialité : Technique de haute tension

Thème :

**Caractérisation de la constellation de gouttes d'eau
formée sur une surface isolante lors du phénomène de
condensation ou de pluie**

Réalisé par :

M^r.: HADDOUCHE Jugurtha

M^r.: BOUAKKAZ Djillali

Promoteur :

Pr. R. BOUDISSA

Co- Promoteur:

Pr. S. KORNHUBER

2015/2016

En préambule à ce mémoire, on souhaitait adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

On tient à remercier sincèrement Monsieur Rabah BOUDISSA, qui, en tant que Directeur de mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour, sans oublier monsieur Pr. S. KORNHUBER pour son soutien indéfectible.

On tient également à remercier Mr A. LAIFAOUI et Mr M. S. HERZINE qui acceptent de juger ce travail.

Sans oublier les membres de l'équipe du Laboratoire de recherche de la haute tension Génie électrique de Bejaia (LGEBéjaia).

Jugurtha et Djillali

Je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère mère, mon très cher père et ma très chère grand-mère pour leurs soutiens, leurs patiences et leurs confiances.

Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils font pour moi

« que Dieu vous garde et vous bénisse ».

Mes très chers frères

Ma sœur

Toute ma grande famille

A Toute la Promotion Électrotechnique 2015/2016

A mes copains au laboratoire de la haute tension

A Tous mes amis

H. Jugurtha

Dédicaces

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

A ma mère qui à su être toujours à mes côtés dans la joie et la peine, ma mère, que Dieu te garde pour nous.

A mon chère père, qui a été toujours mon appui moral, et qui n'a jamais arrêté de m'encourager et de m'aider dans ma vie et surtout dans mes études, que Dieu te garde pour nous.

« Mon père, ma mère merci pour tout »

A mes chers et adorables frères,

« Mon souhaite est de les avoir réussir dans leurs vie »

A mes chères et adorable sœurs,

« Mon souhaite est de les avoir toujours heureuses et d'avoir une vie plain de joie et de réussite »

A mon cher binôme Jugurtha pour sa patience sa gentillesse et sa générosité tout le long de nos études.

A mes chers amis.

A toute la promotion master 2 électrotechnique 2016, à qui je souhaite un bon parcours professionnel

A tout camarades de l'université qui j'ai côtoyé tout au long de mon cursus.

Djillali bouakkaz



Fig. 1. 1 : Dispositif expérimental de mesure instantanée du dépôt de rosée sur un condenseur PTFE 400 x 400 mm sur balance électronique.....	5
Fig. 1. 2 : Nuit typique de mesure continue de rosée sur la balance (Université de Polynésie Française, 11-12 juillet 2005) ; Irrégularités observées sur la masse dues au vent.....	6
Fig. 1. 3 : Types de condensation de la vapeur d'eau au contact d'une paroi dont $T_c < T_d$. Chaque colonne représente les modèles observés à quatre emplacements différents selon l'angle de contact.....	7
Fig. 1. 4 : Gouttes sur une surface de 1cm x 1cm, a : Condensation hors tension, b: Condensation sous champ électrique, c : Renouveau de la condensation sur le même échantillon à la fin du dixième essai.....	8
Fig. 1. 5 : Augmentation du diamètre de la goutte sur les deux matériaux en présence d'un champ électrique.....	8
Fig. 1. 6 : Représentation schématique du déroulement de température et de tension lors des phases, la charge combinée de condensation cyclique et l'exposition au champ électrique.....	9
Fig. 1. 7 : Expiration d'une période de cycle de l'humidité et de la température.....	9
Fig. 1. 8 : Changement des gouttes de la rosée sur un matériau de classe B exposé dans un milieu chaud à moins de 12 minutes.....	10
Fig. 1. 9 : Résistance de surface du caoutchouc de silicone en fonction du temps d'exposition au brouillard salin non connecté.....	11
Fig. 1. 10 : Résistance surfacique durant la récupération dans l'air après déconnexion du brouillard salin.....	12
Fig. 1. 11 : Variation temporelle de la résistance surfacique du caoutchouc de silicone en présence du brouillard salin et d'une tension AC en fonction du temps d'immersion.....	12
Fig. 1. 12 : Dépendance de l'angle de contact du temps d'immersion du caoutchouc de silicone dans une solution saline, de conductivité (1mS/cm) et de température ($23 \pm 2^\circ\text{C}$).....	13
Fig. 1. 13 : Parties de dessous d'un isolateur en silicone après six jours de vieillissement dans la chambre de pluie.....	14
Fig. 1. 14 : Augmentation du courant de fuite au septième jour du vieillissement de l'isolateur dans une chambre à pluie artificielle et sous tension de 24kV en fonctions du temps d'exposition aux douches.....	14
Fig. 1. 15 : Classification d'hydrophobicité suivant différentes surfaces en silicone de HC1 à HC6.....	15

LISTE DES FIGURES

Fig. 1. 16 : Deux états super-hydrophobes : dans l'état de Wenzel, le liquide épouse la surface solide (a), dans l'état de Cassie, il repose sur le sommet de ses aspérités (b).....	15
Fig. 1. 17 : Gouttes d'eau de différents volumes en chute dans l'air. La barre noire indique 1cm.....	16
Fig. 1. 18 : Longueurs permettant de décrire la forme des gouttes plates.....	16
Fig. 1. 19 : Gouttes d'eau déposées sur une surface en caoutchouc de silicone.....	17
Fig. 1. 20 : a) Mesures d'angles d'avancée et b) Mesures d'angles de recule.....	18
Fig. 1. 21 : Volumes de gouttes en fonction de leurs diamètres d'étalements.....	19
Fig. 1. 22 : Nombre de gouttes en fonction de leurs diamètres d'étalement.....	20
Fig. 1. 23 : Nombre de gouttes en fonction de leurs volumes 14 sept 2006 – 16h25 Exposition 3 secondes – 329 gouttes.....	20
Fig. 2. 1 : Dépôt des gouttes de rosée sur une feuille (a), des gouttes de condensation de vapeur d'eau sur une bouteille sortie du frigidaire (b).....	23
Fig. 2. 2 : Rayonnement terrestre pendant la nuit, par ciel couvert à gauche et dégagé à droite de la légende.....	23
Fig. 2. 3 : Dépôt de la rosée sous les conditions idéales sur le sol (herbe, feuilles Etc.).....	24
Fig. 2. 4 : Condensation d'eau sur une fenêtre l'hiver (a), dépôt de la rosée sur l'herbe (b).....	26
Fig. 2. 5 : Dépôt de rosée suivant la température et l'écoulement du temps.....	27
Fig. 2. 6 : Coalescence de deux gouttes d'eau sur une surface solide.....	30
Fig. 2. 7 : Angle de contact d'une goutte, et les trois surfaces de séparation.....	31
Fig. 3. 1 : Altitude et caractéristiques des différents nuages.....	34
Fig. 3. 2 : Formation de la pluie et le cycle d'eau.....	36
Fig. 3. 3 : Gouttes d'eau à l'intérieur d'un nuage.....	39
Fig. 3. 4 : Gouttes de pluie sur une Feuille de lotus à caractère supère hydrophobe.....	40
Fig. 3. 5 : Appareil de mesure de l'angle de contact d'une goutte d'eau de pluie sur une surface solide.....	41
Fig. 3. 6 : Pluviomètre en forme d'entonnoir.....	42
Fig. 3. 7 : Pluviographe avec son enregistreur automatique en blanc sur la figure.....	43

LISTE DES FIGURES

Fig. 3. 8 : Schéma illustrant l'utilisation des disques en rotation pour séparer les gouttes de pluie.....	43
Fig. 4.1 : Support en bois utilisé pour suspendre les isolateurs à l'air libre	45
Fig. 4.2 : Deux modèles d'isolateurs partiels en silicone	46
Fig. 4. 3: Dessiccateur.....	47
Fig. 4. 4: Gel de silice (silicagel)	47
Fig. 4. 5 : Volumes des gouttes mesurées sur 1cm ² aux secteurs nord et sud des 9 échantillons en silicone en fonction du temps de leur exposition	51
Fig. 4. 6 : Répartition des gouttes de pluie sur une ailette exposée à un taux de précipitation de l'ordre de 2.93l/m ²	51
Fig. 4. 7 : Volume de gouttes d'eau de pluie sur 1 cm ² en fonction du temps d'exposition des échantillons.....	53
Fig. 4. 8 : Constellation des gouttes de pluie déposées sur l'isolateur à une ailette après avoir recueilli 2.07 l/m ² de pluie.....	54
Fig. 4. 9 : Courbes des volumes de gouttes suivant des secteurs de 1cm ² (nord, sud, et dessous, dessus) des échantillons en fonction du temps de leur exposition.....	56
Fig. 4. 10 : Isolateur a trois ailettes sous la pluie du 11/03/2016 après avoir reçue 6l/m ² de précipitations.....	56
Fig. 4. 11 : Courbes de volumes de gouttes de condensation naturelle sur 1cm ² au nord et au sud des isolateurs en fonction du temps d'exposition.....	58
Fig. 4. 12 : Nombres de gouttes en fonction du temps d'exposition de 8 isolateurs a trois ailettes sous la rosée.....	59
Fig. 4. 13 : Gouttes d'eau de rosée sur deux surfaces de 1cm ² aux secteurs nord des isolateurs.....	59
Fig. 4. 14 : Volumes des gouttes sur des secteurs de 1cm ² nord et sud des échantillons en fonction du temps de leur exposition.....	61
Fig. 4. 15: Nombres de gouttes sur chaque surface des isolateurs en fonction du temps d'exposition	62
Fig. 4. 16 : Isolateur à trois ailettes sous la condensation naturelle prélevé après une heure et demie d'exposition.....	62

LISTE DES FIGURES

- Fig. 4. 17 : Volumes des gouttes d'eau sur 1cm^2 aux secteurs nord et sud des ailettes du haut exposé à la rosée en fonction du temps de leur exposition.....64
- Fig. 4. 18 : Gouttes d'eau sur un secteur de 1cm^2 au nord d'une surface prélevée après une heure d'exposition sous la condensation naturelle.....65
- Fig. 4. 19 : Evolution du volume des gouttes d'eau sur une surface de 1cm^2 secteurs nord et sud des isolateurs en fonction du temps de leur exposition dans le frigidaire.....66
- Fig. 4. 20 : Gouttes d'eau sous condensation artificielle, a : Gouttes sur 1cm^2 de la surface du dessus d'ailette d'un isolateur après une heure d'exposition, b : Gouttes sur une surface d'un isolateur prélevé après deux heures d'exposition, c : Gouttes sur le tronc et le dessous d'ailettes d'un échantillon prélevé après une heure d'exposition.....67

Chapitre 01

Tableau 1.1 : les moyennes journalières de dépôt de la rosée en g/dm ²	4
Tableau 1.2 : Paramètres d'essais d'une distribution de gouttes d'eau sur des surfaces en silicone.	17
Tableau 1.3 : Résultats expérimentaux de la pluie du 14 septembre 2006.....	19

Chapitre 03

Tableau 3.1 : types de pluies avec les diamètres et vitesse de leurs gouttes.....	37
-----------------------------------------------------------------------------------	----

Chapitre 04

Tableau 4.1 : Résultats de toutes les mesures sous la pluie et les conditions atmosphériques du après-midi du 06/03/2016 de 11h40 à 15h40.....	54
Tableau 4.2 : Mesure du volume de gouttes sur 1cm ² aux secteurs sud et nord de chaque surface du dessus des échantillons touchée par la pluie du 10/03/2016.....	56
Tableau 4.3 : Résultats et mesures de 5 échantillons sous la pluie du 11/03/2016.....	59
Tableau 4.4 : Résultats de toutes les mesure effectuées lord des essais sous la rosée de la nuit du 12/04/2016 jusqu'au matin du 13/06/2016.....	61
Tableau 4.5 : Mesure du volume de gouttes sur six échantillons sous la condensation naturelle.....	64
Tableau 4.6 : Résultats des mesures effectués sous la rosée du 19 au 20/02/2016.....	67
Tableau 4.7 : Mesures effectuées le 18/05/2016 sur sept isolateurs exposés dans un frigidaire à 10°C puis mit durant 3 minutes de repos dans une chambre chauffée à 35°C.....	69

Chapitre 01

Tableau 1.1 : les moyennes journalières de dépôt de la rosée en g/dm ²	4
Tableau 1.2 : Paramètres d'essais d'une distribution de gouttes d'eau sur des surfaces en silicone.	17
Tableau 1.3 : Résultats expérimentaux de la pluie du 14 septembre 2006.....	19

Chapitre 03

Tableau 3.1 : types de pluies avec les diamètres et vitesse de leurs gouttes.....	37
-----------------------------------------------------------------------------------	----

Chapitre 04

Tableau 4.1 : Résultats de toutes les mesures sous la pluie et les conditions atmosphériques du après-midi du 06/03/2016 de 11h40 à 15h40.....	54
Tableau 4.2 : Mesure du volume de gouttes sur 1cm ² aux secteurs sud et nord de chaque surface du dessus des échantillons touchée par la pluie du 10/03/2016.....	56
Tableau 4.3 : Résultats et mesures de 5 échantillons sous la pluie du 11/03/2016.....	59
Tableau 4.4 : Résultats de toutes les mesure effectuées lord des essais sous la rosée de la nuit du 12/04/2016 jusqu'au matin du 13/06/2016.....	61
Tableau 4.5 : Mesure du volume de gouttes sur six échantillons sous la condensation naturelle.....	64
Tableau 4.6 : Résultats des mesures effectués sous la rosée du 19 au 20/02/2016.....	67
Tableau 4.7 : Mesures effectuées le 18/05/2016 sur sept isolateurs exposés dans un frigidaire à 10°C puis mit durant 3 minutes de repos dans une chambre chauffée à 35°C.....	69

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------------	----------

Chapitre 01

L'ETAT D'ART

1. 1 Introduction.....	3
1. 2 Synthèses des travaux de recherches sur l'effet de la constellation des gouttes d'eau de la condensation sur des surface hydrophiles et hydrophobes, sous ou hors tension.....	3
1. 2. 1 Aitken.....	3
1. 2. 2 Maxwell.....	3
1. 2. 3 Première mesure de la rosée dans l'histoire.....	4
1. 2. 4 Mesure de la quantité de rosée déposée au Dakar	4
1. 2. 5 Mesure de la condensation de rosée.....	4
1. 2. 6 Guyer et autre.....	6
1. 2. 7 Guyer, Beysens, et autres	6
1. 2. 8 T. Braunsberger, A. Dziubek, M. Kurrat	7
1. 3 Synthèses des travaux de recherches sur la constellation des gouttes d'eau de pluie et leurs effets sur des surface hydrophiles et hydrophobes, sous ou hors tension.....	10
1. 3. 1 H. Zhan et R. Hackam	10
1. 3. 2 Simulation de pluie	13
1. 3. 3 Test d'hydrophobie de surface avec un procédé de pulvérisation	14
1. 3. 4 Wenzel, Cassie et Baxter	15
1.3. 5 E. Reyssat	16
1. 3. 6 O. Fujii et autre.....	16
1. 3. 7 Marshall et Palmer	18
1. 3. 8 Laws et Parsons	18
1. 3. 9 Johnson et Dettre	18
1. 3. 10 C. Lagoute et E. Cancellara	19
1. 4 Conclusion.....	21

Chapitre 02

PHENOMENE DE CONDENSATION NATURELLE

2. 1 Introduction.....	22
2. 2 Phénomène de la condensation (rosée).....	22
2. 2. 1 Définition simple du dictionnaire sur la rosée.....	22
2. 2. 2 Condensation (rosée)	22
2. 2. 3 Formation de la rosée.....	23
2. 2. 4 critères favorisant le dépôt de la rosée sur une feuille.....	24
2. 2. 5 Autres définitions de la rosée.....	25
2. 2. 6 Formation de rosée et estimation de sa durée.....	25
2. 2. 7 Origine de la rosée.....	26
2. 2. 8 Réchauffement et refroidissement du sol.....	27
2. 2. 9 Facteurs nuisibles au dépôt de la rosée.....	27
2. 2. 10 Couche de transition.....	27
2. 2. 11 Dépôt de la rosée.....	28
2. 2. 12 Rosée suivant les saisons.....	28
2. 2. 13 Durée de la rosée.....	28
2. 2. 14 Point de rosée.....	28
2. 2. 15 Condensations de surface.....	28
2. 3 Gouttes d'eau de la condensation naturelle.....	29
2. 3. 1 Formation des gouttes de rosée.....	29
2. 3. 2 Coalescence de gouttes.....	29
2. 3. 3 Angle de contact d'une goutte d'eau.....	30
2. 4 Méthodes et instruments de mesure de la rosée.....	31
2. 4. 1 Mesure de la quantité de rosée dans le temps.....	31
2. 4. 2 Drosemètre.....	31

2. 4. 3 Méthode gravimétrique.....	32
2. 4. 4 Condenseur radiatif.....	32
2. 5 Conclusion.....	32

Chapitre 03

PHENOMENE DE LA PLUIE

3.1 Introduction.....	33
3. 2 Nuages.....	33
3. 2. 1 Formation des nuages.....	33
3. 2. 2 Types de nuages.....	33
3. 2. 3 Pluie suivant les types de nuages et les diamètres des gouttes.....	35
3. 3 Précipitations.....	35
3. 3. 1 Deux conditions pour générer des précipitations.....	35
3. 3. 2 Pluie	35
3. 3. 3 Formation de la pluie	35
3. 3. 4 Régime des précipitations par leurs noms et caractéristiques.....	36
3. 3. 5 Différents types de pluies.....	37
3. 3. 6 Notion d'averses et d'intensités.....	37
3. 3. 7 Types de pluies.....	38
3. 3. 7. 1 Averse.....	38
3. 3. 7. 2 Orage.....	38
3. 3. 7. 3 Pluies acides.....	38
3. 4 Gouttes de pluie.....	38
3. 4. 1 Évolution des gouttes de pluie à partir des nuages	38
3. 4. 2 Taille d'une goutte de pluie.....	39
3. 4. 3 Nombre de weber d'une goutte de pluie.....	39

3. 4. 4 Goutte de pluie sur une surface hydrophobe.....	40
3. 4. 5 Evaporation d'une goutte de pluie.....	41
3. 5 Méthodes et appareils de mesures de la pluie.....	41
3. 5. 1 Mesure de l'angle de contact d'une goutte d'eau de pluie sur une surface solide	41
3. 5. 2 Mesure de la hauteur d'eau précipitée.....	42
3. 5. 3 Pluviomètre.....	42
3. 5. 4 Pluviographe.....	43
3. 5. 5 Spectromètre.....	43
3. 6 Conclusion.....	44

Chapitre 04

PARTIE EXPERIMENTALE

4.1 Introduction.....	45
4.2 Dispositif expérimental.....	45
4.2.1 Support en bois installé en plein nature.....	45
4.2.2 Modèle expérimental.....	46
4. 2. 3 Dessiccateur.....	47
4. 3 Nature des travaux.....	48
4. 3. 1 Exposition des échantillons sous la pluie.....	48
4. 3. 2 Exposition des échantillons sous la condensation naturelle.....	48
4. 3. 3 Simulation de la condensation artificielle à l'aide d'un réfrigérateur.....	48
4. 4 Procédés de mesure.....	48
4. 4. 1 Exemples de calculs.....	49
4. 5 Résultats et discussions.....	49
4. 5. 1 Résultats des mesures sous la pluie.....	49
4. 5. 1. 1 Résultats des mesures sous la pluie du 06/03/2016.....	49

4. 5. 1. 2 Résultats des mesures sous la pluie du 10/03/2016.....	52
4. 5. 1. 3 Résultats des mesures sous la pluie du 11/03/2016.....	54
4. 5. 2 Résultats des mesures sous la condensation naturelle (Rosée).....	57
4. 5. 2. 1 Rosée durant la nuit du 12/04/2016 jusqu'au matin du 13/04/2016.....	57
4. 5. 2. 2 Résultats et mesures sous la condensation du 28 au 29/03/2016.....	60
4. 5. 2. 3 Résultats et mesures sous la condensation naturelle de la nuit du 19/02/2016 au matin du 20/02/2016.....	63
4. 5. 3 Résultats et mesures de la simulation de la condensation artificielle à l'aide d'un réfrigérateur.....	65
4. 6 Conclusion.....	67
CONCLUSION GENERALE.....	69

INTRODUCTION GENERALE

La ligne à haute tension est l'une des principales formes d'infrastructures énergétiques et le composant principal des grands réseaux de transport d'électricité.

Elle transporte l'énergie électrique des centrales électriques au consommateur. Les lignes à haute tension aériennes sont composées de câbles conducteurs, généralement en alliage d'aluminium, suspendus à des supports, pylônes ou poteaux et de chaînes d'isolateurs.

Les isolateurs sur les lignes aériennes et les postes des réseaux de transport d'énergie électrique sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la mouillabilité. Elle constitue l'un des facteurs importants dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie. En effet par temps de pluie ou de forte condensation naturelle, les gouttes d'eau se fixent sur l'isolateur et peuvent le mouiller complètement.

L'influence des gouttes d'eau sur le mécanisme de contournement de la surface des jupes de l'isolateur est largement déterminée par la forme des gouttelettes et leur constellation sur celles-ci. Sous l'influence d'un champ électrique les gouttelettes peuvent se déformer et peuvent perturber le champ électrique à travers un champ local de forte intensité.

Ce champ local conduit à un allongement des gouttelettes et réduit la distance d'isolement entre l'électrode de terre et celle de haute tension. À partir de là, des décharges partielles entre les gouttes prennent naissance et se développent en un arc électrique pouvant conduire au contournement de l'isolateur.

L'objectif de ce travail est d'examiner la caractérisation de la constellation des gouttes d'eau de pluie et de condensation naturelle sur une surface en silicone hydrophobe hors tension.

Les paramètres qui influent sur la pluie et la rosée sont souvent les conditions climatiques, tel que, le vent, l'humidité relative et la température, ainsi que la pression atmosphérique.

Le premier chapitre sera destiné à des synthèses de travaux antérieurs sur les performances d'une surface en silicone hydrophobe recouverte de gouttes, et l'influence de ces gouttes d'eau de pluie ou de condensation naturelle et artificielle, sous et hors tension sur des surfaces hydrophobes ou hydrophiles.

Le deuxième chapitre contient les définitions sur le phénomène de condensation naturelle et l'évolution des gouttes d'eau sur des surfaces hydrophobes ou hydrophile. Ainsi que les méthodes et appareils qui permettent de mesurer cette précipitation.

Le troisième chapitre porte les définitions de la précipitation liquide (pluie) avec les procédés de sa formation depuis les nuages, et l'évolution des gouttes dans l'air jusqu'à leur contact sur des surfaces hydrophobes ou hydrophiles. Les appareils mis en œuvre pour la mesure des taux de précipitation, les volumes et nombres de gouttes de pluie ont été présentés.

Le quatrième chapitre sera consacré principalement à l'étude expérimentale de l'effet de la constellation de gouttes d'eau et leur capacité à humidifier des surfaces hydrophobes en silicone hors tension, exposées à l'air libre sous les précipitations naturelles (pluie et rosée). Les résultats expérimentaux issus de cette enquête seront suffisamment interprétés. Et pour finir une conclusion générale permettant la synthèse du travail réalisé achèvera cette analyse.

1. 1 Introduction

Les lignes aériennes et les isolateurs haute tension de postes des réseaux de transport d'énergie électrique sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la mouillabilité des isolateurs qui constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie.

En effet par temps de pluie ou de condensation, les gouttes se fixant sur les surfaces isolantes réduisent considérablement la résistivité superficielle et le contournement peut alors survenir.

Ce chapitre d'état d'art est de faire une synthèse des travaux réalisés sur la formation et la répartition des gouttes d'eau de rosée et de pluie sur une surface en silicone hydrophobe mise sous ou hors tension.

1. 2 Synthèses des travaux de recherches sur l'effet de la constellation des gouttes d'eau de la condensation sur des surfaces hydrophiles et hydrophobes, sous ou hors tension

1. 2. 1 Travaux d'Aitken

En 1886 Aitken a démontré que la rosée vient d'en bas. Il donne l'exemple de l'objet placé au-dessus d'un morceau de terre. Il remarqua que l'objet est mouillé à sa partie inférieure tandis que le bout de terre a perdu du poids. Le sol a une température plus élevée que les objets, d'où la présence de la rosée sous les cailloux. Pour finir, il affirme qu'une partie de la rosée vient de la plante [1].

1. 2. 2 Maxwell

En 1929, Maxwell a suivi l'avis d'Aitken, la vapeur d'eau vient de la terre et se condense sur des surfaces froides près du sol. Cela peut s'apercevoir sur des plantages poussant dans un sentier de gravier. La gravelle perd lentement sa chaleur. L'humidité continue de monter. Les feuilles rayonnent leur chaleur après le coucher du soleil par leur face supérieure et l'humidité se dépose sur leur face inférieure [1].

1. 2. 3 Première mesure de la rosée dans l'histoire

En 1844 à Boussignault sont apparues les premières mesures déductives de rosée. Ils absorbaient l'eau de rosée avec des éponges dont ils déterminaient ensuite l'augmentation de poids. Mais ce procédé manquait de précision [1].

1. 2. 4 Mesure de la quantité de rosée déposée au Dakar (Sénégal)

Des mesures quotidiennes durant plus d'un an au laboratoire de physique climatique de Dakar afin de comparer les résultats obtenus par les différents récepteurs. Parmi ceux-ci se trouve le drosomètre Duvdevani.

Sans tenir compte des journées de pluie, le tableau 1.1 indique les moyennes journalières de dépôt de la rosée en g/dm^2 .

Ils ont conclu d'après le tableau 1.1 que le drosomètre Duvdevani donne des résultats de même ordre que les plaques de Leick (cela est probablement dû à leurs surfaces qui sont vernissées). Par contre, la matière plastique indique une quantité de rosée plus élevée que celle recueillie par les plaques de Leick. Le rapport est approximé à 1,7 [2].

Année	Mois	Nombre D'expériences	Plaques de Leick 1	Récepteur Duvdevani	Récepteur Matière plastique	Plaques de Leick 2	Récepteur matière plastique
1956	Juillet	8	0,87	0,42	1,09	1,74	1,97
1956	Février	13	1,07	0,88	1,49	1,33	1,77
1956	Mars	26	1,2	1,2	1,72	1,43	1,7
1956	Avril	16	1,09	1	1,78	1,71	2,34
1956	Mai	18	0,63	0,69	1,04	0,76	1,19
1956	Juin	29	0,24	0,39	0,42	0,24	0,42

Tableau 1.1 : les moyennes journalières de dépôt de la rosée en g/dm^2 [2]

1. 2. 5 Mesure de la condensation de rosée

Une photographie d'un condenseur placé sur une balance électronique mesurant en continu la condensation de rosée montrée en figure 1. 1. Ce système a été utilisé sur différents sites en France [3].

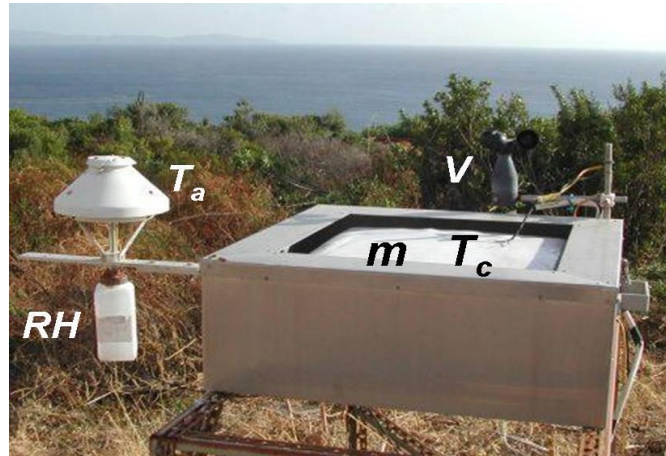


Fig. 1. 1 : Dispositif expérimental de mesure instantanée du dépôt de rosée sur un condenseur PTFE 400 x 400 mm sur balance électronique Acquisition des données $T_a(^{\circ}\text{C})$, RH (%), $V(\text{m s}^{-1})$, $m(\text{g})$ et $T_c(^{\circ}\text{C})$; (installé à Ajaccio depuis 1999, photo M. Muselli) [3]

La masse de rosée condensée (m) est enregistrée au pas de temps de 15 min sur une plaque de référence placée à 1 mètre du sol. Cette surface est une plaque de PolyTetraFluororoEthylene (PTFE, désignation commerciale : Téflon) de surface de condensation $S_c = 0,16 \text{ m}^2$ et d'épaisseur $e = 1,05 \text{ mm}$. La plaque est placée sur une feuille d'aluminium de $12,5 \mu\text{m}$ d'épaisseur (miroir IR) et une plaque de polystyrène expansé de 5 mm pour l'isoler du support comme le montre la figure 1. 1 [3].

Le tout est placé dans une balance électronique connectée à un PC. Dans le cas général, dès que $T_c < T_d$ à la tombée du jour, la balance détecte une lente augmentation de la masse avec une pente $dm/dt < 8 \text{ g h}^{-1}$. Lorsqu'au matin $T_c > T_d$, l'évaporation se manifeste avec une pente dm/dt décroissante [3].

Sachant que, T_a : Température de l'air, T_c : Température de surface du PTFE, T_d : Température de point de rosée [3].

Sur la figure 1. 2, on remarque que si la vitesse de vent et la couverture nuageuse sont faibles, la masse d'eau condensée augmente dès l'instant où la température de surface du condenseur devient inférieure au point de rosée [3].

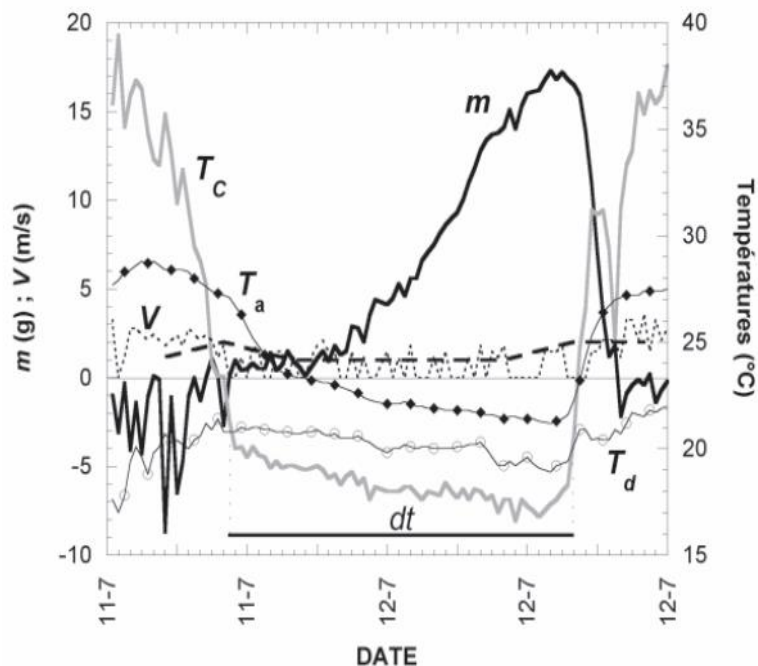


Fig. 1. 2 : Nuit typique de mesure continue de rosée sur la balance (université de Polynésie Française, 11-12 juillet 2005) ; irrégularités observées sur la masse dues au vent [3]

1. 2. 6 Guyer et autre

En 1999 les chercheurs [4] ont montré que la rosée est le résultat d'une transition de phase dans laquelle la vapeur d'eau est transformée en liquide quand elle entre en contact avec une surface. La condition fondamentale pour la formation de rosée est que la température de la surface sur laquelle la condensation a lieu soit inférieure ou égale à celle du point de rosée. Or, la condensation de la vapeur sur une paroi refroidie donne naissance à deux types de phénomènes qui se caractérisent par l'aspect visuel du condensat formé. Dans le premier cas, le condensat recouvre la surface sous la forme d'un film continu et on parle de condensation en film. Dans le second cas, les gouttelettes liquides se forment sur la surface et on parle de condensation en gouttes. Les gouttelettes de rosée s'organisent selon un ordre particulier [4].

1. 2. 7 Guyer et autres, 1999 et Beysens, (1995)

À leur naissance sur une surface, les gouttelettes de la rosée sont de très petites tailles (quelques millièmes de millimètres). Elles grossissent peu à peu en agglomérant les molécules de vapeur autour d'elles. En augmentant de taille, elles vont se toucher et fusionner. Ce phénomène est surnommé de coalescence. Elles forment alors une nouvelle goutte, plus

grosse, de même forme, mais qui occupe moins de place que les gouttes avant fusion. Le support reste ainsi sec sur presque la moitié de sa surface comme le montre la figure 1. 3 [4].

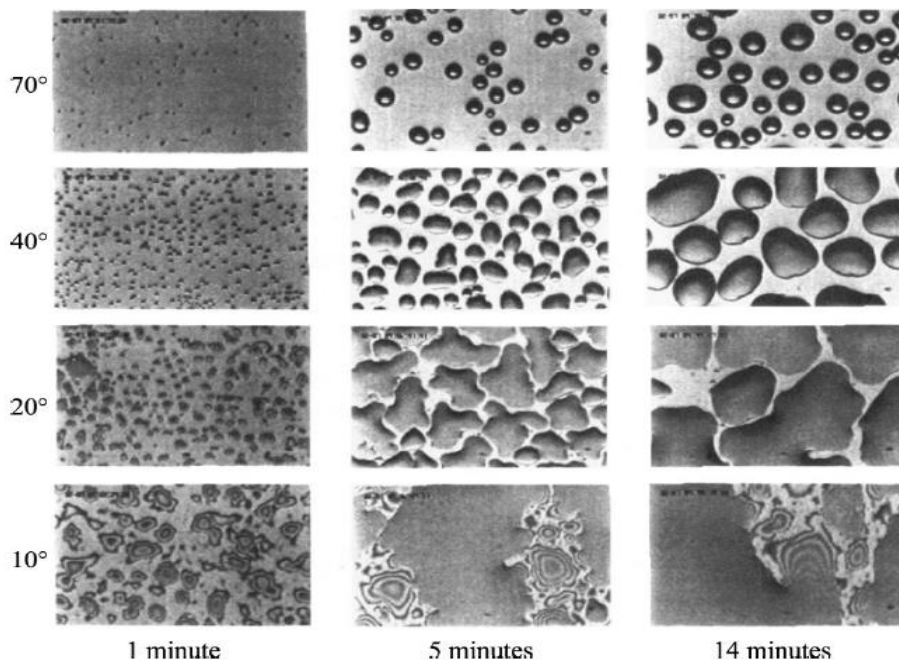


Fig. 1. 3 : Types de condensation de la vapeur d'eau au contact d'une paroi dont $T_c < T_d$. Chaque colonne représente les modèles observés à quatre emplacements différents selon l'angle de contact [4]

1. 2. 8 T. Braunsberger, A. Dziubek, M. Kurrat (2005)

1. 2. 8. 1 Simulation de la rosée sous tension

Sur la base d'une simulation du phénomène de condensation au laboratoire, les auteurs T. Braunsberger et co-auteurs [5] ont pu mesurer le diamètre des gouttes formées sur deux types d'échantillons différents mis sous ou hors tension alternative 50 Hz (Fig. 1. 4) ainsi que le champ seuil de formation de décharges électriques partielles (Fig.1. 5). Il résulte de leurs travaux que :

- Dans le matériau A : il y a formation de gouttelettes ayant un diamètre de 0,4 mm, parfois jusqu'à 01 mm.
- Dans le matériau B : seulement quelques petites gouttelettes avec un rayon qui ne dépasse pas 0,2mm.
- Hors tension : illustré en figure 1. 4. a

- Sous tension : association de simples gouttes pour former des plus grandes, partiellement déformées sur le matériau A pendant la phase 10 [5].

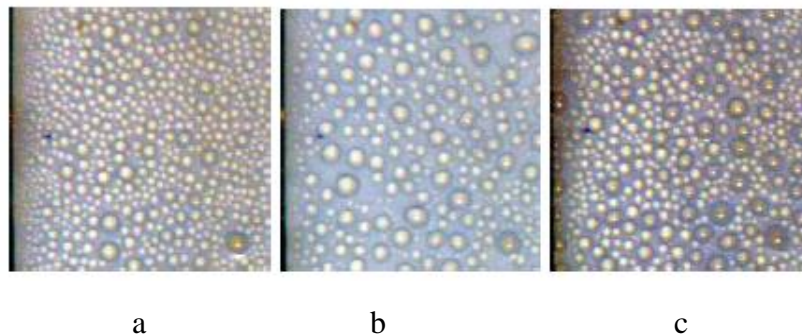


Fig. 1. 4 : Gouttes sur une surface de 1cm x 1cm, a : condensation hors tension, b : condensation sous champ électrique, c : renouvellement de la condensation sur le même échantillon à la fin du dixième essai [5]

Sous champ électrique les gouttes s'allongent et leurs rayons augmentent avec une augmentation du volume des gouttelettes de 30 à 90 μl conduit à une légère diminution de champ comme le montre la figure 1. 5 [5].

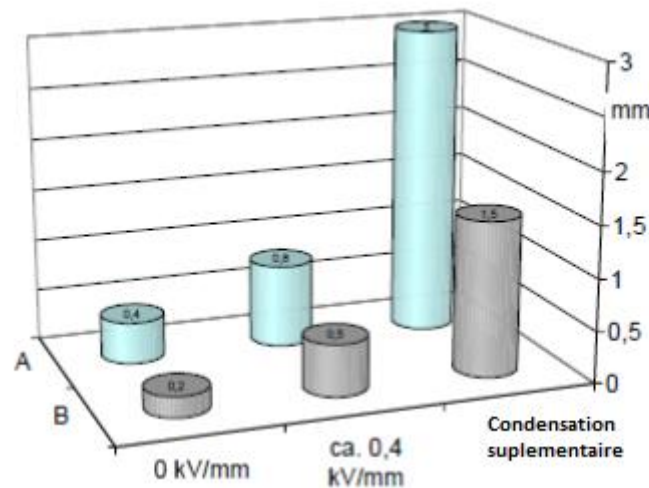


Fig. 1. 5 : Augmentation du diamètre de la goutte sur les deux matériaux en présence d'un champ électrique [5]

1. 2. 8. 2 Leur technique expérimentale

Pour prendre soin des spécimens, (fig.1.6) la chambre d'essai est d'abord refroidie à 10 °C et après une heure, la température est portée à 35 °C ; l'humidité relative est toujours réglée à 98 %. Après une heure, la phase chaude du cycle recommence. Le contrôle et l'enregistrement

des données climatiques chargées via PC. La figure 1. 7, montre la séquence répétée de la température lors de la condensation cyclique [5].

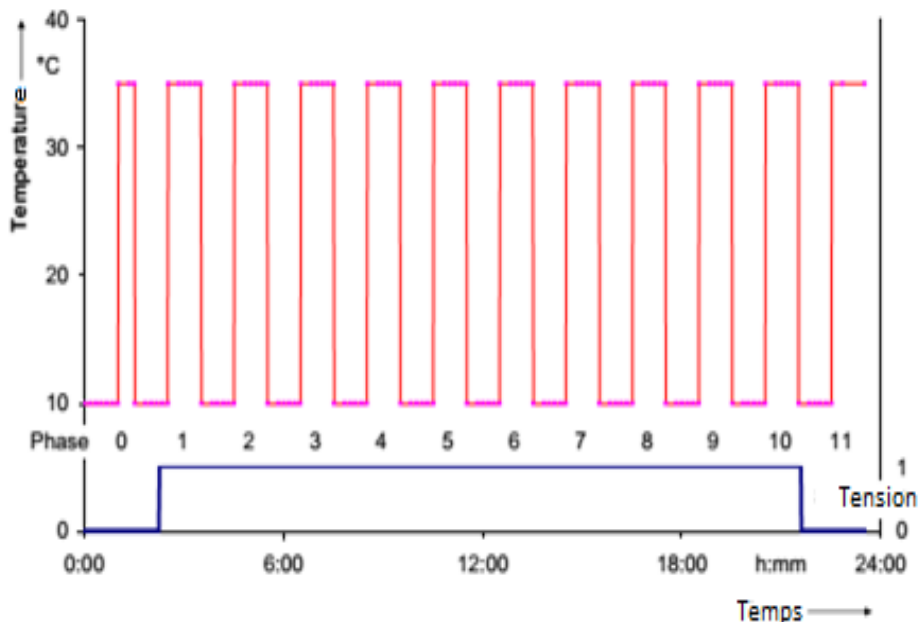


Fig. 1. 6 : Représentation schématique du déroulement de Température et de tension lors des phases, la charge combinée de condensation cyclique et l'exposition au champ électrique [5]

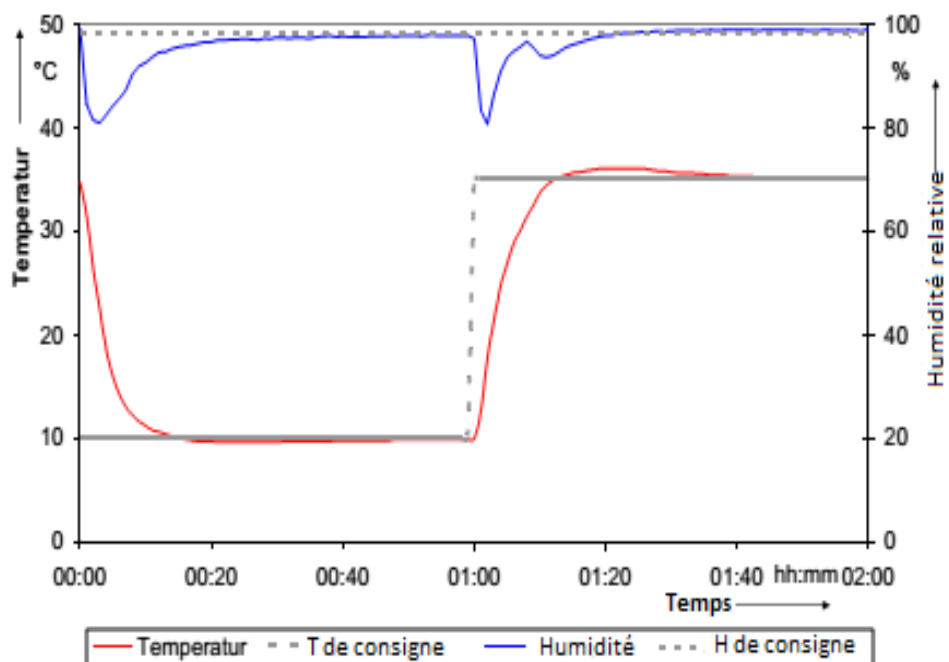


Fig. 1. 7 : Expiration d'une période de cycle de l'humidité et de la température [5]

1. 2. 8. 3 Essai hors tension

Après que la tension a été coupée, il y a une condensation supplémentaire. Ici, un spectacle total de nouveau plus petites gouttelettes, l'état initial ne soit pas atteint comme dans (Figure 1. 4. a et c). L'image possède un plus grand nombre de gouttelettes plus grosses qu'au début, mais on remarque une augmentation de la zone sèche après un temps de repos [5].

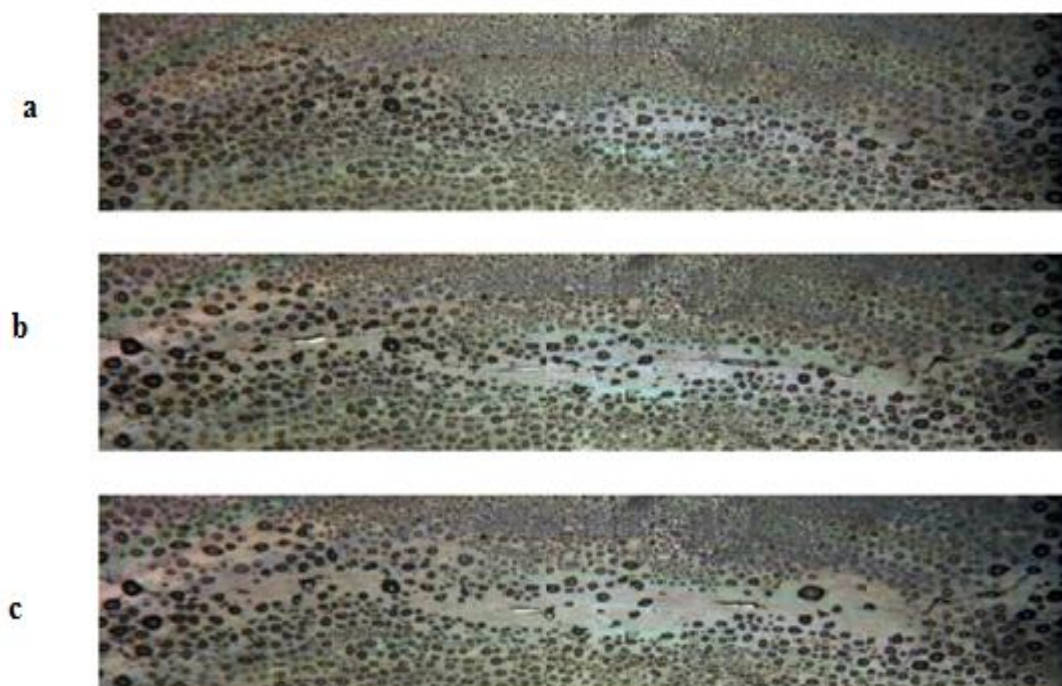


Fig. 1. 8 : Changement des gouttes de la rosée sur un matériau de classe B exposé dans un milieu chaud à moins de 12 minutes [5]

1. 3 Synthèses des travaux de recherche sur la constellation des gouttes d'eau de pluie et leurs effets sur des surfaces hydrophiles et hydrophobes, sous ou hors tension.

1. 3. 1 H. Zhan et R. Hackam

1. 3. 1. 1 Résistance de surface en présence de brouillard salin hors tension

En (1998), les chercheurs [6] ont testé la résistance de surface des tiges en caoutchouc de silicone HTV en fonction du temps d'exposition au brouillard salin pendant quatre cycles successifs, sans avoir exposé l'échantillon sous un champ électrique en continue. Seulement 20V / cm (DC) a été utilisé pour une brève période de (1mn) pour déterminer la résistance de surface. Sur chaque cycle, les échantillons ont été exposés à brouillard salin pour $t_1 = 36$ h, puis le brouillard a été mis hors tension afin d'étudier la récupération de la résistance de surface et

l'hydrophobie pour $t_2 = 24$ h. Il sera observé dans la figure que la résistance de la surface diminue en fonction du temps d'exposition au brouillard salin, jusqu'à la saturation. Cette dernière est due au mouillage complet de la surface. La courbe montre aussi que la résistance de la surface diminue avec l'augmentation des cycles d'essais. Après quatre cycles qui équivalaient à une exposition de 144 h d'une conductivité modérée (1 mS/cm) de brouillard salin la résistance de surface diminue à 0,2 M Ω [6].

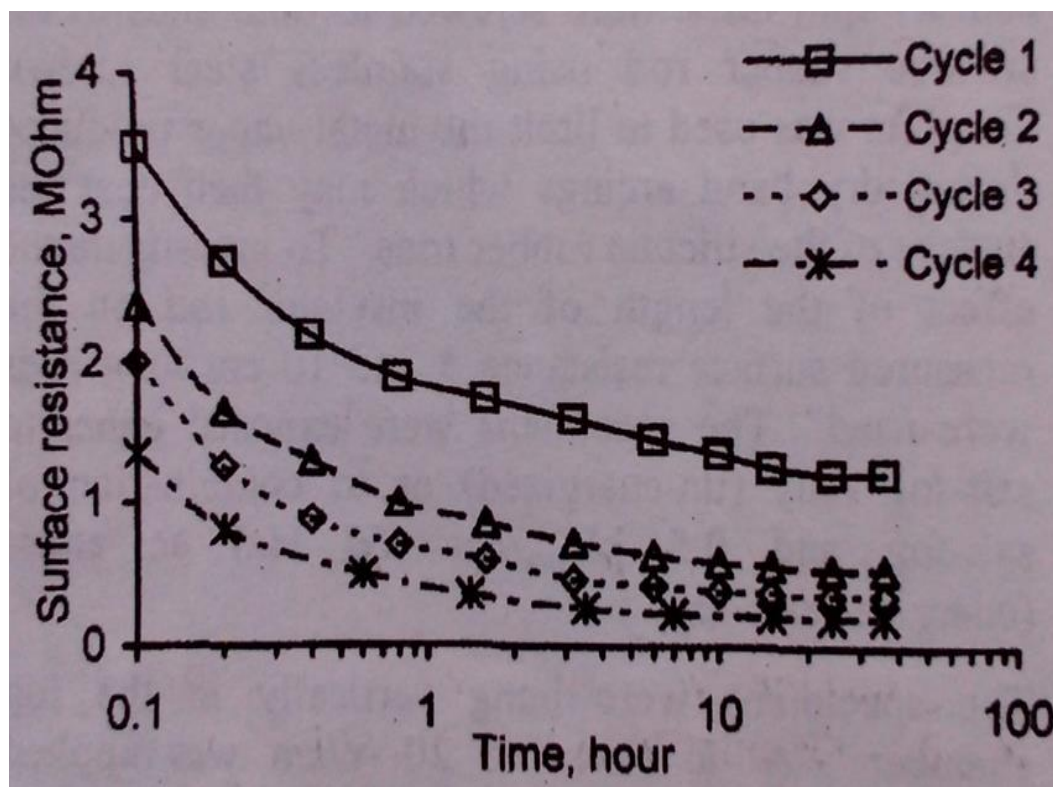


Fig. 1. 9 : Résistance de surface du caoutchouc de silicone en fonction du temps d'exposition au brouillard salin non connecté [6]

Après l'arrêt du brouillard salin, la résistance de surface a commencé à récupérer, la récupération de la résistance était liée au séchage de la surface. La première mesure de la résistance ne peut être déterminée au plus tôt 0,1 h après le retrait du brouillard salin. On observera d'après la figure 1 que la résistance superficielle à 0,1 h dans chaque cycle de test était plus élevée que dans le cycle suivant, mais elle continue à diminuer avec le temps de l'exposition croissante à brouillard salin. Quand le brouillard a été retiré, la résistance de surface a augmenté progressivement jusqu'à qu'une valeur de saturation de 550 M Ω a été atteinte après 24 h de récupération Figure 1. 10 [6].

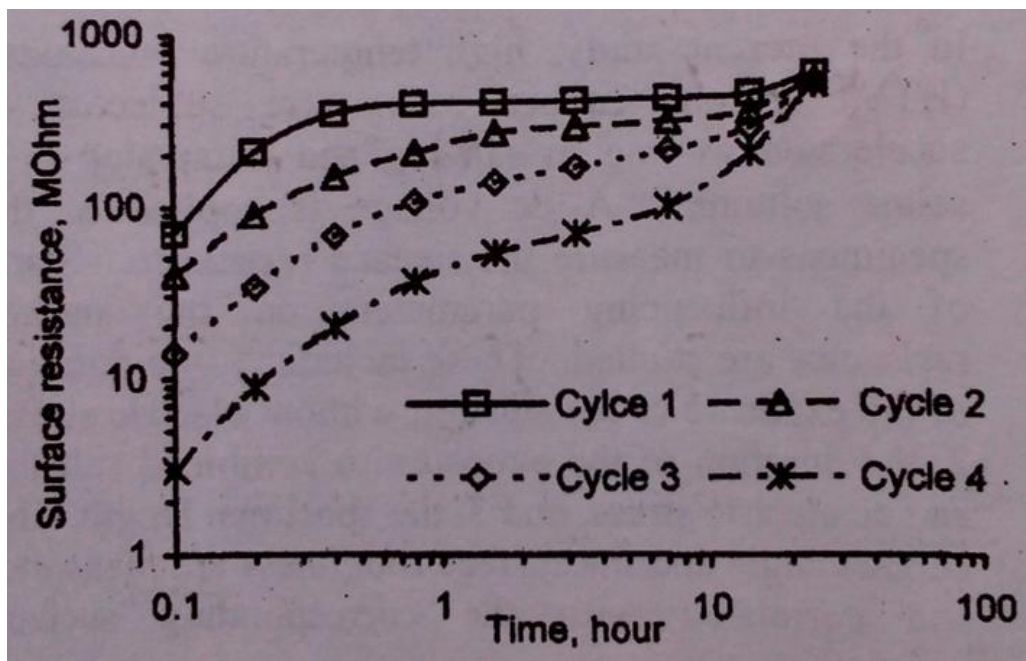


Fig. 1. 10 : Résistance surfacique durant la récupération dans l'air après déconnexion du brouillard salin [6]

1. 3. 1. 2 Résistance de surface en présence de brouillard salin sous tension

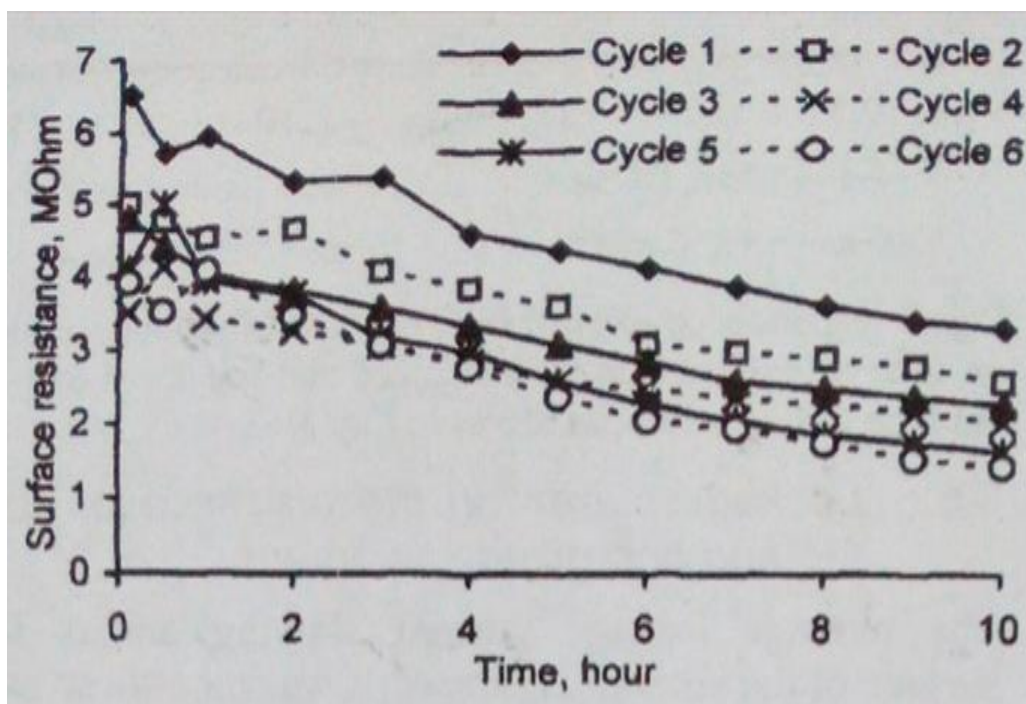


Fig. 1. 11 : Variation temporelle de la résistance surfacique du caoutchouc de silicone en présence du brouillard salin et d'une tension AC en fonction du temps d'immersion [6]

1. 3. 1. 3 Effet de l'immersion dans l'eau salée sur l'hydrophobie

Sur la figure 1. 12, on trouve l'angle de contact en fonction du temps d'immersion du caoutchouc de silicone dans une solution saline ayant une conductivité de 1 mS/cm. On remarquera que, lorsque la surface de l'échantillon n'a pas été lavée avec de l'eau distillée, θ a diminué de 108° dans l'échantillon vierge à environ $56,6^\circ$ après 336 h d'immersion dans la solution saline. Cependant, lorsque la surface de l'échantillon a été nettoyée avec de l'eau distillée ($5 \mu\text{S}/\text{cm}$) dans un bain à ultrasons pendant 2 min environ, l'angle de contact diminue de 108° à une valeur saturée de $92,7^\circ$ [6].

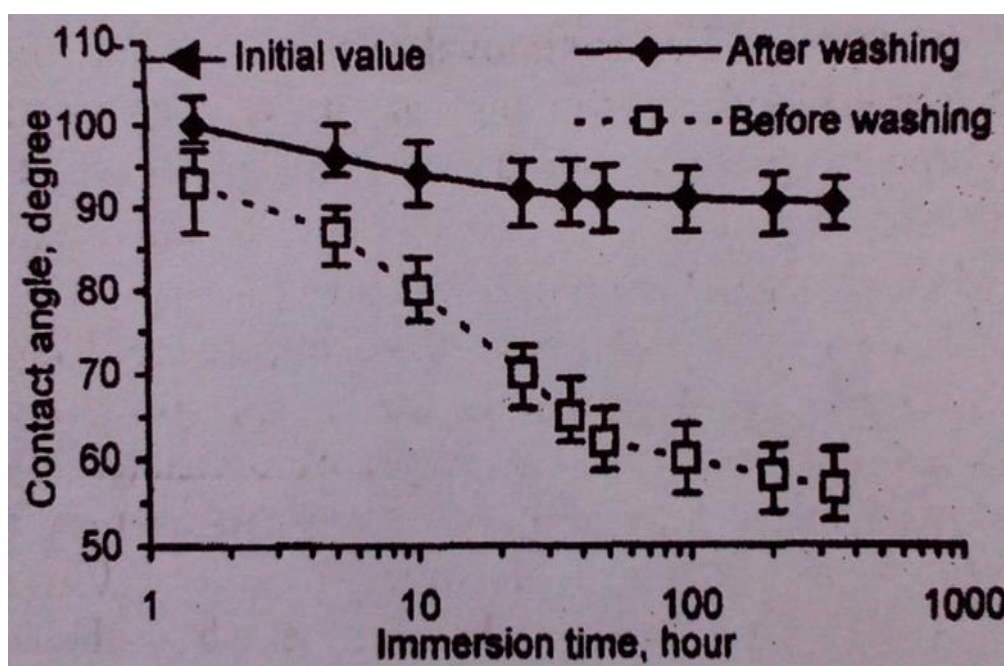


Fig. 1. 12 : Dépendance de l'angle de contact du temps d'immersion du caoutchouc de silicone dans une solution saline, de conductivité (1 mS/cm) et de température ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) [6]

Pour des périodes d'exposition similaires au brouillard salin et à l'eau salée suggèrent que la première exposition présente un effet plus marqué sur la réduction de l'angle de contact et donc sur la perte d'hydrophobie [6].

1. 3. 2 Simulation de pluie

Les tests menés par W. Bretuj, J. Fleszynski, A. Tyman, K. Wiczorek, ont été effectués dans une chambre de pluie haute tension avec un volume de 5m^3 . La chambre est équipée d'un système de six gicleurs d'eau et une pompe à eau, contrôlé par un programmeur de temps. Les 24 heures d'essai sont comme suivants : sept heures de vieillissement sous tension (chaque

heure comprend une période de 30 minutes de pluie artificielle et d'une autre période de 30 minutes sans pluie) et 17 heures de repos, commander par un temporisateur [7].



Fig. 1. 13 : Parties de dessous d'un isolateur en silicone après six jours de vieillissement dans la chambre de pluie [7]

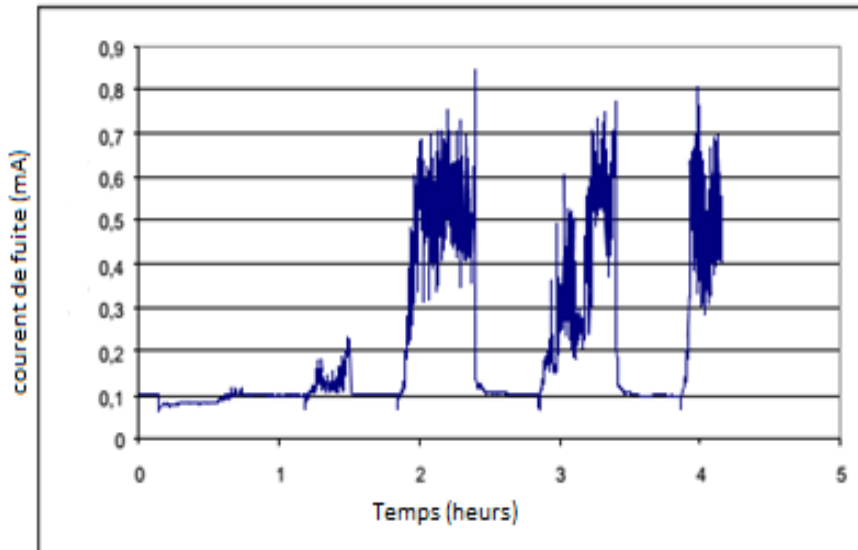


Fig. 1. 14 : Augmentation du courant de fuite au septième jour du vieillissement de l'isolateur dans une chambre à pluie artificielle et sous tension de 24 kV en fonctions du temps d'exposition aux douches [7]

1. 3. 3 Test d'hydrophobie de surface avec un procédé de pulvérisation

En utilisant un dispositif de pulvérisation approprié proposé par Swedish Institut de recherche Transmission (STRI). Environ 10 à 30 ml d'eau distillée doivent être appliquées à la surface de l'isolant sous forme de brouillard à partir d'une distance de $25 \text{ cm} \pm 10 \text{ cm}$ pour une durée de 20 à 30 second. L'inspecteur regarde les surfaces mouillées et les attributs dans l'un des sept niveaux allant de 01 à 06 HC comme dans la figure 1. 15, selon la forme de gouttelettes d'eau et la partie en pourcentage de la surface qui est mouillée [8].

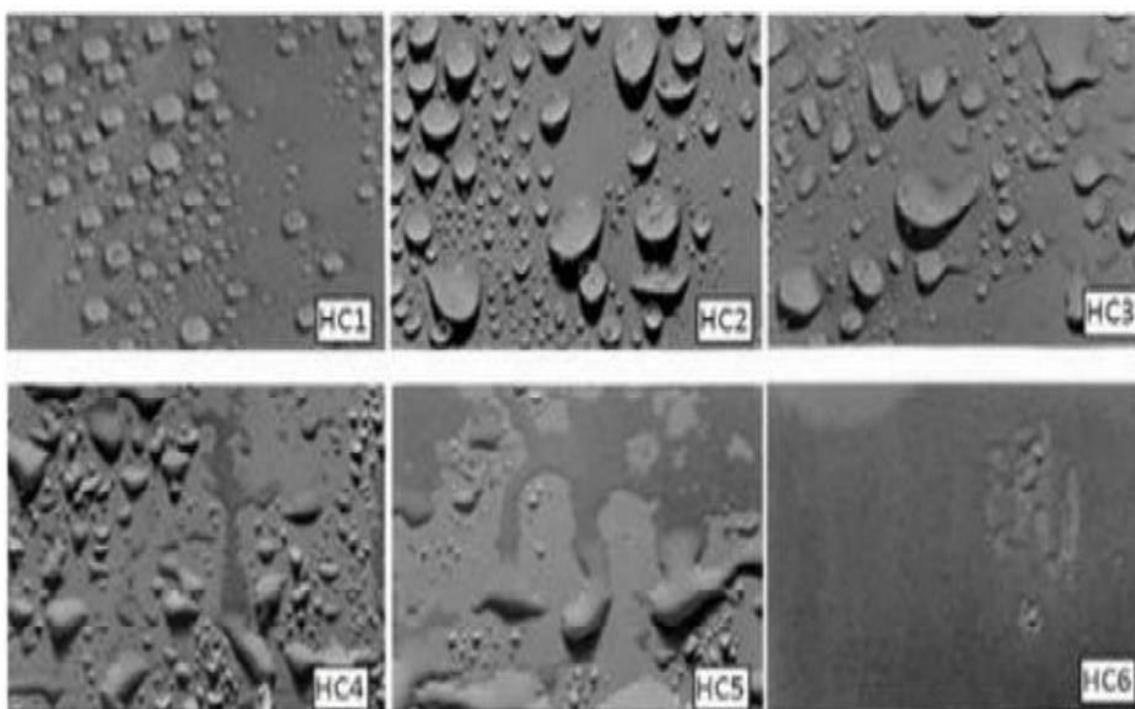


Fig. 1. 15 : Classification d'hydrophobicité suivant différentes surfaces en silicone de HC1 à HC6 [8]

1. 3. 4 Wenzel, Cassie et Baxter

Ils ont décrit de manière simple les variations de l'angle de contact ainsi induite. Dans le premier cas l'aire de contact est augmentée, mais dans le second cas, une goutte repose sur une faible partie de la surface solide, le reste étant de l'air, on appelle aussi cela l'état Fakir.

Les surfaces spéciales ont été développées récemment, imitant la nature et qui permettent d'atteindre des angles de contact proche de 180 degrés, cela a permis le développement d'applications industrielles, mais aussi le développement d'un ensemble d'expériences nouvelles. Le moyen d'atteindre des angles de contact important consiste en fabrication de surfaces qui cumulent hydrophobie de nature chimique et rugosité physique (figure 1. 16) [9].



Fig. 1. 16 : Deux états super-hydrophobes, dans l'état de Wenzel, le liquide épouse la surface solide (a), dans l'état de Cassie, il repose sur le sommet de ses aspérités (b) [9]

1. 3. 5 Etienne Reyssat

En 2007, Le chercheur [10] a fait tomber des gouttes d'eau sur des surfaces solides hydrophiles et remarqué que les "grosses" gouttes prennent une forme aplatie (figure 4. 17. c). La figure c montre qu'elles peuvent même devenir ce qu'il a interprété comme des sortes de galettes, ou de pièces de monnaie.

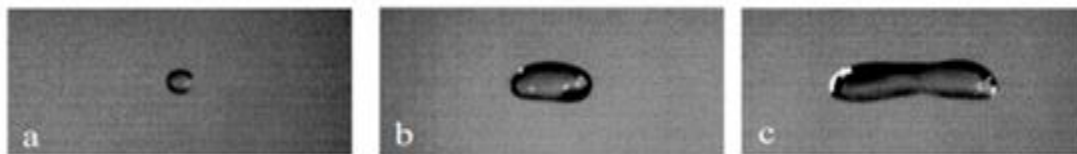


Fig. 1. 17 : Gouttes d'eau de différents volumes en chute dans l'air. La barre noire indique 1 cm [10]

Pour décrire le plus simplement possible la forme de ces gouttes aplaties, il a défini deux Longueurs : leur diamètre équatorial D et leur épaisseur h [10].

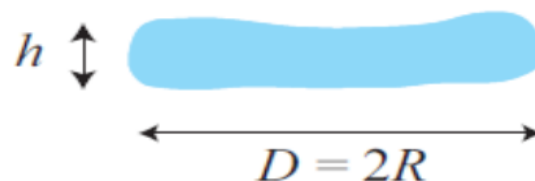


Fig. 1. 18 : Longueurs permettant de décrire la forme de gouttes plates [10]

1. 3. 6 O. Fujii et autre

Dans l'étude présente, seul le caoutchouc de silicone et les conditions idéales sont considérées pour le dépôt. Les principaux spécimens étaient des propres. Plusieurs plaques de 15×15 cm de dimension, et 6 mm d'épaisseur de caoutchouc de silicone ont été préparées

pour les expériences. Ils ont été soumis à divers types de mouillage par (pulvérisation, nébulisation, etc....) sans contrainte de tension. Après un certain temps écoulé, la taille des gouttelettes d'eau sur le caoutchouc de silicone, qui a été placé dans la position horizontale, a été examinée. Le tableau 1.2 montre les paramètres des échantillons avant la formation des gouttelettes [11].

Essai	Prétraitement	Surface	Procédé de formation	Commentaires
1	Aucun	Nettoyer	Flux de brouillard	
2	Aucun	Contaminée	Flux de brouillard	ESDD* de 0,06 mg/cm ²
3	oui	Contaminée	Flux de brouillard	ESDD* de 0,06 mg/cm ² film d'eau continue formé
4	Aucun	Nettoyer	Flux de brouillard	Basculés de 10 degrés
5	Aucun	Nettoyer	Coulée simple	Coulée d'eau comme au robinet
6	Aucun	Nettoyer	Coulée simple	Relocalisés et réduits

ESDD* : Densité de dépôt de sel équivalent.

Tableau 1. 2 : Paramètres d'essais d'une distribution de gouttes d'eau sur des surfaces en silicone [11]

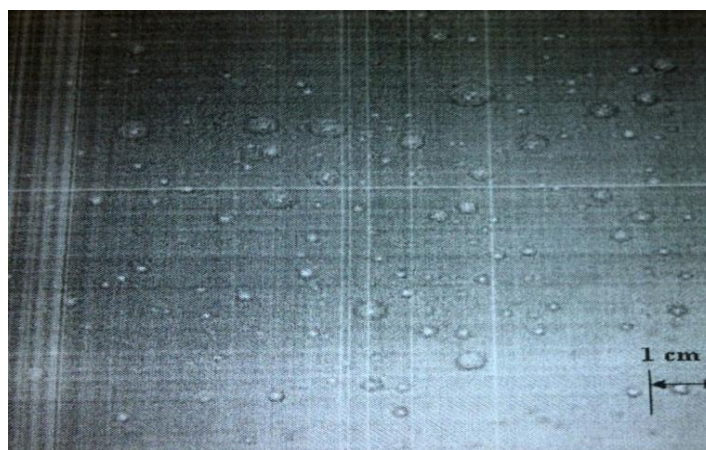


Fig. 1. 19 : Gouttes d'eau déposées sur une surface en caoutchouc de silicone [11]

1. 3. 7 Marshall et Palmer

En (1948) apparaissent Les toutes premières mesures de la taille des gouttes de pluie qui consistaient à exposer à la pluie pendant quelques secondes, des feuilles de papier filtré passées

d'une couche de colorant hydrosoluble. Une formule empirique était utilisée pour relier le diamètre des taches formées par le contact de chaque goutte sur le papier, aux diamètres des gouttes. Les taches sont ainsi utilisées pour obtenir la taille des gouttes de pluie. Or, la méthode est entachée d'erreurs liées à : l'influence de la vitesse de chute des gouttes sur la taille de la tâche, l'humidité du papier et les problèmes d'éclaboussures lors de la chute de grosses gouttes [12].

1. 3. 8 Laws et Parsons

En (1943) les auteurs [12] ont mis un procédé qui consiste à permettre à la goutte de pluie de tomber dans une couche de farine fine. Des grumeaux se forment lors de la chute des gouttes. Ils sont triés par tailles, grâce à un système de tamis, puis pesés. Le diamètre moyen des gouttes est évalué à partir des informations sur la masse des grumeaux [12].

1. 3. 9 Johnson et Dettre

Ils ont mesuré en 1964 l'angle de contact d'une goutte d'eau sur une surface en cire hydrophobe dont la rugosité, très importante au départ, s'atténue progressivement en recuisant le matériau.

Les deux angles de contact En réalité, deux angles sont mesurés pour chaque état de la surface : un angle d'avancer θ_a obtenu lorsque la ligne de contact avance de façon quasi-statique et un angle de recul θ_r mesuré au recul (quasi-statique) de la ligne de contact. Un écart entre ces deux angles est la signature d'une hystérésis attribuée à des hétérogénéités de la surface, de nature chimique ou géométrique (ce qui laisse présager de l'effet complexe de la rugosité). Ces deux angles encadrent un angle de contact θ d'équilibre que l'on mesurerait sur une surface parfaite. Le principe de la mesure de ces deux angles est schématisé sur la figure 1. 20 [13].

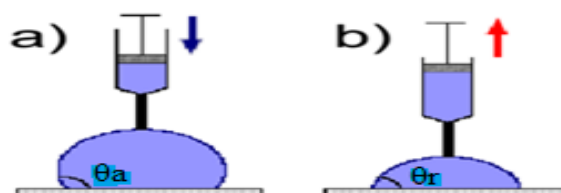


Fig. 1. 20 : Mesure d'angle d'avancé a), mesure d'angle de retard sur une surface b) [13]

1. 3. 10 Travaux de C. Lagoute et E. Cancellara en 2007

En mesurant les diamètres d'étalement des gouttes de différents volumes sur une plaque collectrice, ils ont obtenu les points expérimentaux reportés sur la figure 1. 21. Les points sont dispersés, ils ont essayé d'établir une relation mathématique en remarquant que la courbe obtenue passera par l'origine, étant donné que, lorsque le volume de la goutte tend vers zéro, le diamètre d'étalement également [14].

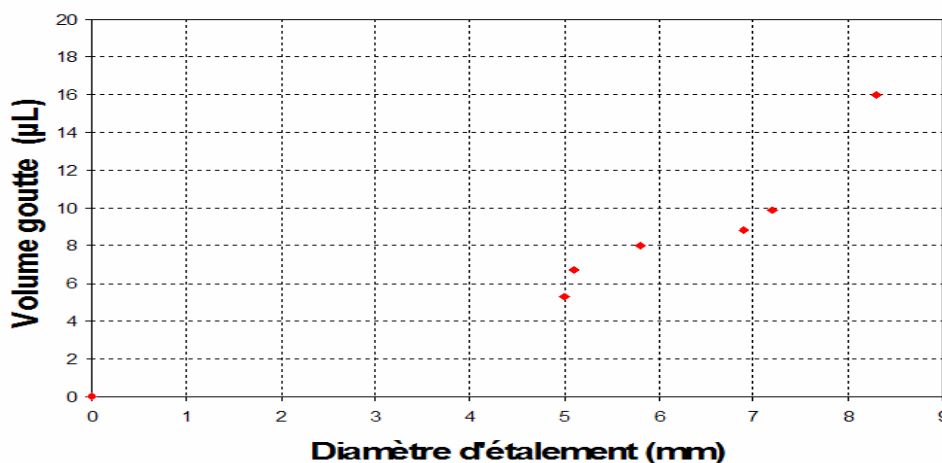


Fig. 1. 21 : Volumes de gouttes en fonction de leurs diamètres d'étalements [14]

	A	B	C	D	E	G	H	I	J
1	Pluie du 14 septembre 2006 à 16h55 - 6 secondes								
2									
3	Pluviomètre :					Plaque collectrice :			
4		Volume tombé (mL)	22,00				Surface recouverte (mm ²)	3137,18	
5		Diamètre entonnoir (cm)	18,00				Vol tombé (µL)	484,85	
6		Surface collectrice (cm ²)	254,47				Vol moyen (µL)	0,64	
7		Durée (min)	10,00				Surface plaque (cm ²)	560,00	
8		Précipitations (µL/cm ² /s)	0,1441				Précipitations (µL/cm ² /s)	0,1443	
9		Précipitations (mm/m ² /h)	5,2				Précipitations (mm/m ² /h)	5,2	
10				erreur (%)	0,14				
11	Plaque de collecte (mm ²) :								
12		Réelle - 280x200		Cubique a=					
13		MEDION 400 % - 952x680			0,0350				
14	Diamètre 400% sur MEDION (mm)	Diamètre étalement (mm)	V = a d ³ Volume (µL)	Diamètre des gouttes (mm)					
15	1	0,29	0,0009	0,12					
16	1	0,29	0,0009	0,12					
17	1	0,29	0,0009	0,12					
18	1	0,29	0,0009	0,12					
19	1	0,29	0,0009	0,12					
20	1	0,29	0,0009	0,12					
21	1	0,29	0,0009	0,12					
22	1	0,29	0,0009	0,12					
23	1	0,29	0,0009	0,12					
24	1	0,29	0,0009	0,12					
25	1	0,29	0,0009	0,12					
26	1	0,29	0,0009	0,12					

Fig. 1. 3 : Résultats expérimentaux de la pluie du 14 septembre 2006 [14]

En utilisant les résultats du tableau, ils ont pu construire les histogrammes des distributions en diamètre d'étalement et en volume des gouttes (figure 1. 21) et (figure 1. 22) [14].

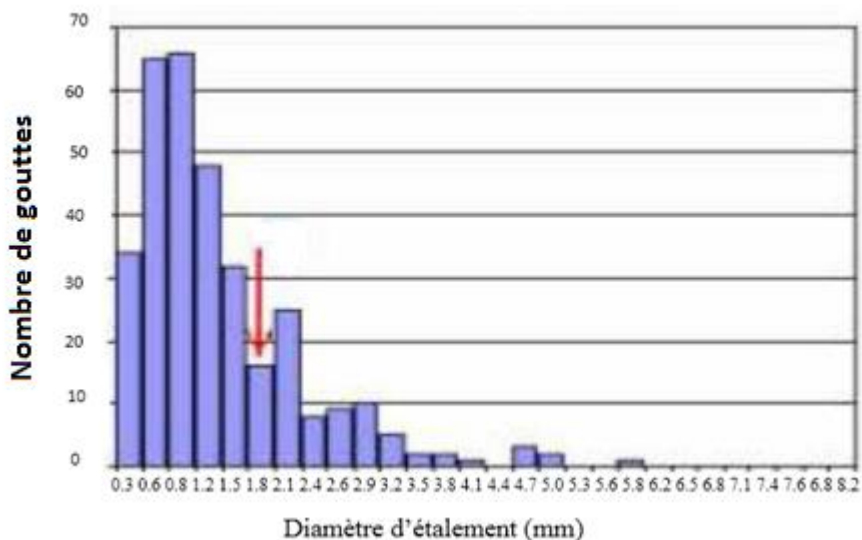


Fig. 1. 22 : Nombre de gouttes en fonction de leurs diamètres d'étalement [14]

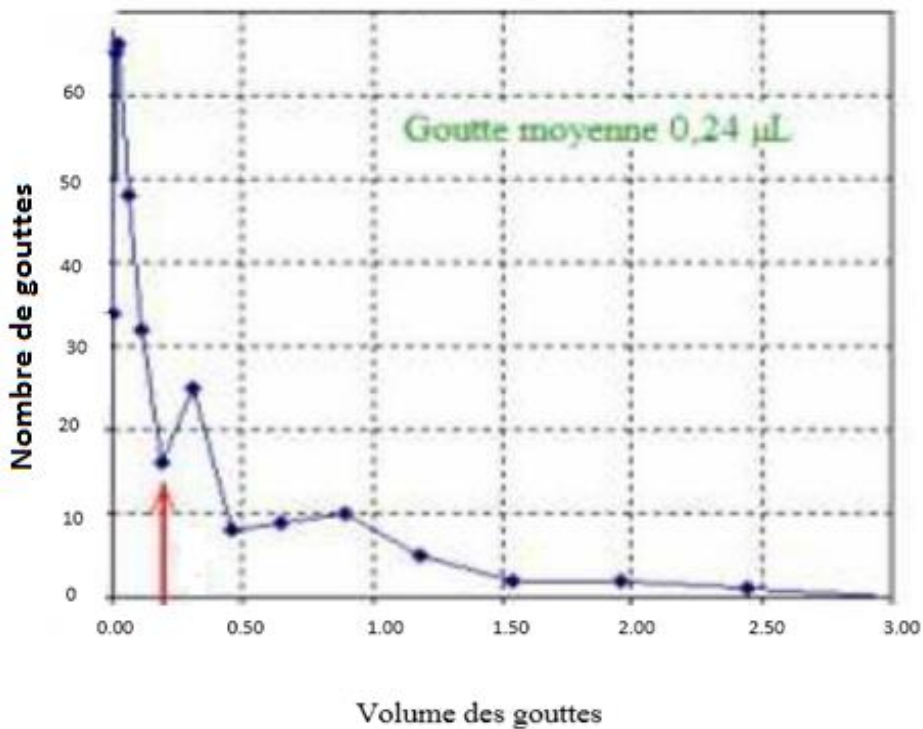


Fig. 1. 23 : Nombre de gouttes en fonction de leurs volumes 14 sept 2006 – 16h25 Exposition 3 secondes – 329 gouttes [14]

1. 4 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre des expériences naturelles et de simulation de pluie et de condensation, dans les chercheurs se sont intéressés à trouver : le nombre de goutte, le volume des gouttes, la vitesse de chute des gouttes et le comportement des surfaces en présence des gouttes (pluie). Pour la condensation ils se sont appliqués à chercher : le volume total recueillie de rosée dans des durées de temps, les répartitions des gouttes sous et hors tensions.

Les travaux réalisés par plusieurs chercheurs sur les effets et la répartition des gouttes d'eau de la condensation et de pluie sur différents matériaux ou objets, ont montré des résultats et des déductions intéressantes surtout sur les surfaces des polymères, où l'hydrophobie est constamment en régénération. Ceci est valable pour les essais sous tension et hors tension.

L'objectif de notre travail est d'étudier la constellation ou la répartition des gouttes d'eau de pluie et de condensation, et leurs formations au cours du temps en exposant des surfaces en silicone hydrophobes sous les contraintes météorologiques. Cela est l'ambition d'aboutir à des résultats fructueux pour les travaux sur les isolateurs polymères en haute tension qui ont continuellement besoin de plus de réponses sur les phénomènes naturels en l'occurrence la pluie et la condensation.

2. 1 Introduction

Une quantité importante d'isolateurs est utilisée sur les réseaux aériens de transport de l'énergie électrique. Cependant ces isolateurs sont employés dans différents environnements tels que tropical, arctique, côtier, atmosphère polluée, etc.

De nos jours, les isolateurs en silicone sont les plus choisis à cause de leurs performances et leur capacité à résister sous diverses pollutions.

Parmi les conditions météorologiques auxquelles sont soumis les équipements des réseaux électriques, ce sont les accumulations de gouttes de pluie et de condensation.

Ce chapitre consiste à définir tous les paramètres liés à la condensation. Ainsi on va s'intéresser aux équipements mis en œuvre par des chercheurs pour mieux étudier ce phénomène.

2. 2 Phénomène de la condensation ou rosée

2. 2. 1 Définition simple du dictionnaire sur la rosée

La rosée est la vapeur d'eau qui se dépose le matin, en gouttelettes très fines sur les végétaux et sur certains corps exposés à l'air libre.

2. 2. 2 Condensation (rosée)

La rosée est un type de précipitations d'eau résultant de la liquéfaction de la vapeur d'eau de l'air. Elle apparaît sous forme de gouttelettes qui se déposent généralement le soir (et parfois le matin) sur les végétaux et autres corps exposés à l'air libre, quand leur température baisse jusqu'au point de rosée de l'air ambiant, ce qui provoque la condensation de la vapeur d'eau contenue dans la couche d'air voisine. De façon plus générale ce phénomène, peut également se produire n'importe quand, lorsqu'un corps froid est placé dans un air ambiant contenant de la vapeur d'eau, par exemple lorsqu'une bouteille d'eau fraîche est sortie d'un réfrigérateur [1].



a) Feuille d'une plante hydrophobe

b) bouteille d'eau sortie du frigidaire

Fig. 2. 1 : Dépôt des gouttes de rosée sur une feuille (a), des gouttes de condensation de vapeur d'eau sur une bouteille sortie du frigidaire (b) [1]

2. 2. 3 Formation de la rosée

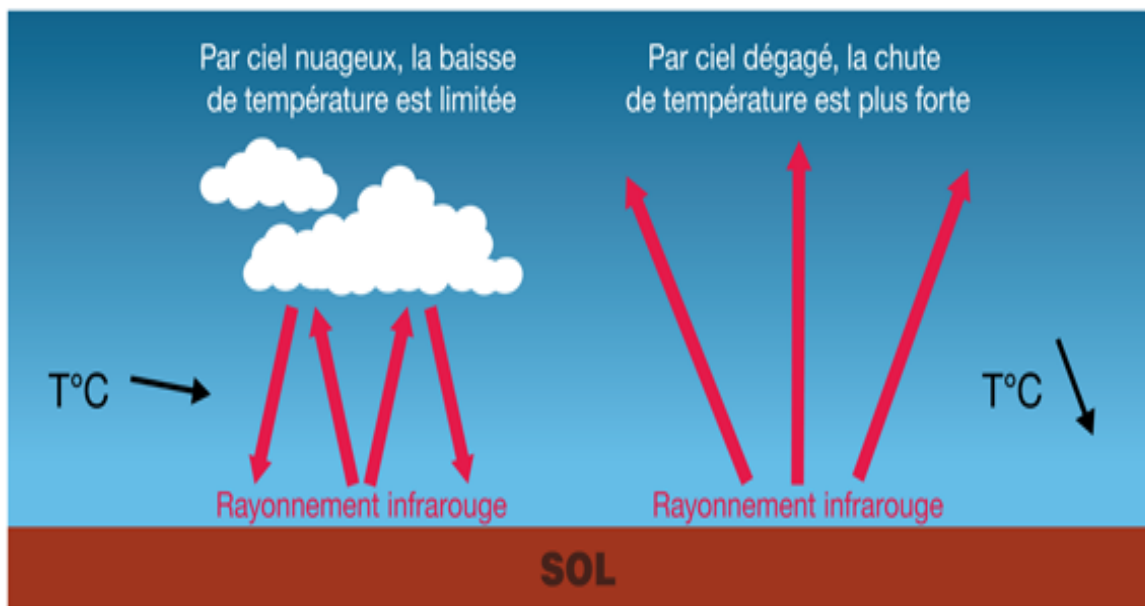


Fig. 2. 2 : Rayonnement terrestre pendant la nuit, par ciel couvert à gauche et dégagé à droite de la légende

De l'eau circule constamment entre les réservoirs qui forment l'hydrosphère ; elle quitte la surface des océans, des lacs, du sol ou de la végétation qui transpire, pour se retrouver dans l'atmosphère où son séjour est bref, en moyen d'une dizaine de jours contre des milliers

d'années pour les océans. Cette eau atmosphérique se déplace d'une zone à l'autre sous forme de vapeur, elle retourne au sol sous forme de précipitation, de brouillard et de rosée.

L'absence de nuage et de vent permet un fort rayonnement et un refroidissement important jusqu'au point où la vapeur d'eau contenue dans l'air se condense. Ce point est dit « point de rosée ». Les gouttelettes de rosée se forment alors sur toutes les surfaces froides. En été, la rosée peut ne pas se former localement, en particulier dans les « îlots de chaleur urbains », quand le refroidissement et/ou l'humidité y sont moindres, et alors insuffisants [1].

2. 2. 4 critères favorisant le dépôt de la rosée sur une feuille

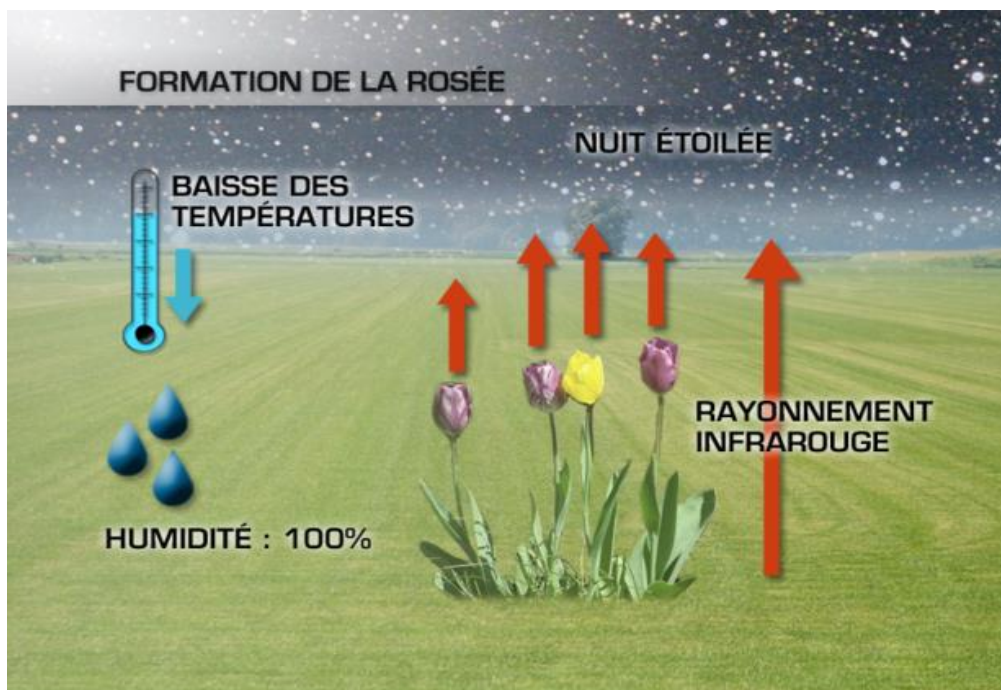


Fig. 2. 3 : Dépôt de la rosée sous les conditions idéales sur le sol (herbe, feuilles Etc.) [15]

- Un ciel clair ;
- Une humidité de l'air élevée au voisinage de la feuille, ainsi la température du point de rosée est plus facilement atteinte ;
- Un vent faible, ce qui limite les échanges convectifs de chaleur entre l'air et la feuille ;
- Orientation de la feuille : Une feuille horizontale aura une surface d'échange radiatif avec le ciel (plus froid que le milieu environnant), plus grande qu'une feuille inclinée. De même, tout obstacle à cet échange nuira au dépôt de rosée, ce sera le cas d'une haie à proximité [15].

2. 2. 5 Autres définitions de la rosée

La rosée est la même chose que la buée qui se dépose instantanément sur une bouteille d'eau qu'on sort du frigidaire. L'eau contenue dans l'air ambiant sous forme de vapeur invisible se condense sous forme d'eau liquide sur un objet très froid, qui crée autour de lui un manchon d'air à température beaucoup plus basse que l'ambiante.

2. 2. 6 Formation de rosée et estimation de sa durée

Le dépôt de rosée se produit chaque fois que la température de la feuille (T_f) est inférieure à la température du point de rosée de l'air, donc que $P(T_f) < P(T_r)$: C'est-à-dire que la pression de vapeur à la température de la feuille est inférieure à la pression de vapeur de l'air au voisinage de cette feuille.

Le début de la formation de rosée sur une feuille sèche peut être déterminé à partir de T_f calculé avec l'équation (2. 1). Ensuite, le taux de dépôt ou d'évaporation d'eau libre est donné par l'équation du flux de chaleur latente (2. 2) [15].

$$LE = n \left(\rho \cdot \frac{C_p}{\gamma} \right) \cdot gb \cdot (P(T_f) - P(T_r)) \quad (2. 1)$$

$$H = n \cdot \rho \cdot C_p \cdot gb (T_f - T_a) \quad (2. 2)$$

Avec

LE : Début de la formation de rosée ;

H : Flux de chaleur latente ;

$n=2$,

ρ : Masse volumique de l'air ;

T_a : Température de l'air ;

$P(T)$: Pression de vapeur à la température T. La pression de vapeur est une façon d'exprimer la teneur en vapeur d'eau dans l'air ;

T_f : Température de la feuille exprimée en Kelvin ;

gb : Coefficient d'échange, c'est une caractéristique de l'échange de chaleur ou de vapeur qui dépend à la fois de la géométrie de la feuille et de la vitesse de l'air au voisinage de la feuille ;

C_p : Chaleur massique de l'air à pression constante. Cela représente la quantité d'énergie à apporter à l'air par échange thermique à une unité de masse de cet air pour que sa température augmente de 1°C ;

γ : Constante psychrométrique qui permet de relier la différence de température sèche et humide à la pression de vapeur.

2. 2. 7 Origine de la rosée

Par temps chaud, la chaleur de la journée permet à l'air d'emmagasiner une très grande quantité d'eau gazeuse aux moments les plus chauds de la journée. En début d'après-midi quand la température diminue, la limite de saturation de l'air en eau gazeuse diminue et elle condense. Cela se produit surtout aux moments les plus frais de la journée (le matin, 1 heure après le lever du soleil). Cette condensation de l'eau peut prendre plusieurs formes, celle qui nous intéresse est la rosée (figure 2. 4. b) [16].



a) Condensation d'eau sur une fenêtre en hiver



b) Dépôt de rosée sur l'herbe

Fig. 2. 4 : Condensation d'eau sur une fenêtre l'hiver (a), et dépôt de la rosée sur l'herbe (b) [16]

2. 2. 8 Réchauffement et refroidissement du sol

Pendant le jour, la chaleur solaire tend surtout à s'accumuler sur le sol, d'où elle remonte ensuite, et que, pendant la nuit, le refroidissement suit le même chemin, s'attaquant d'abord aux couches les plus échauffées et ensuite à celles qui ont reçu moins de rayons [18].

2. 2. 9 Facteurs nuisibles au dépôt de la rosée

- Vent : Un vent qui se lève pendant la nuit peut nuire à la formation de la rosée sur une surface, en réchauffant cette dernière. De plus, il sèche les gouttes qui se sont déjà posées, et peut aussi les pousser hors du plan où elles étaient formées.
- Température : Une augmentation de la température réchauffe aussi les surfaces, d'où le point de rosée peut ne pas être atteint, donc il n'y aura pas de formation de la rosée.
- Nuages : Un ciel couvert de nuages ne permet pas le dépôt de la rosée, C'est dû au fait que la surface de la terre rayonne de l'énergie dans le domaine infrarouge, ce qui la refroidit par temps clair comme illustré sur la figure 2. 2.

2. 2. 10 Couche de transition

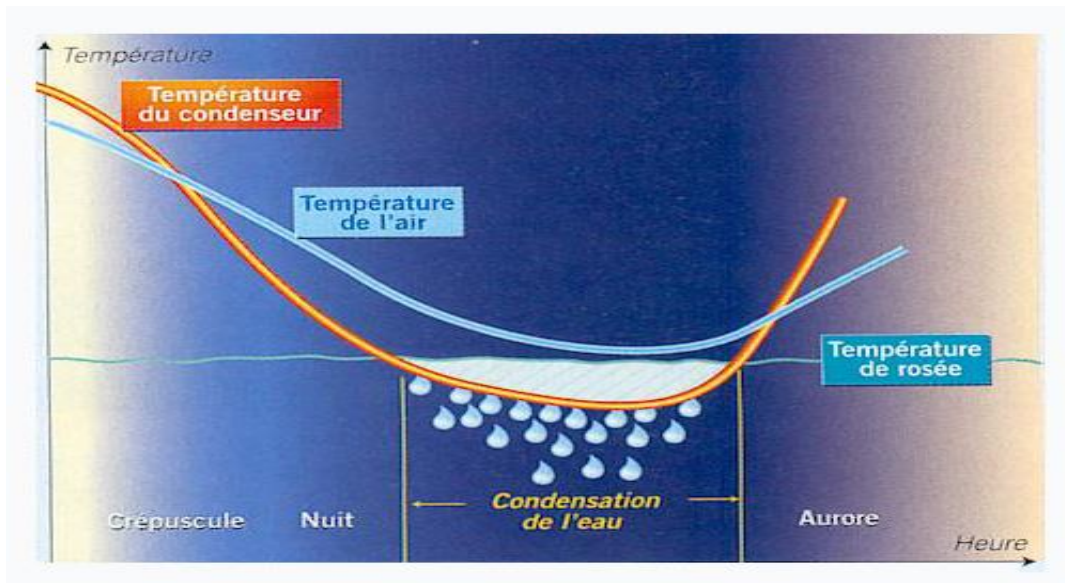


Fig. 2. 5 : Dépôt de rosée suivant la température et l'écoulement du temps

Leick appelle couche de transition la couche d'égalisation des températures des corps et de l'air environnant. Le point de rosée est atteint dans cette couche, il peut même être dépassé et l'eau formée tombe sur les corps. Si l'air est calme, la couche de transition est très petite, il y aura donc incontestablement rosée [1].

2. 2. 11 Dépôt de rosée

D'après Leick et Propp, quelques minutes après le coucher du soleil, la température d'une feuille peut être de 2,9°C inférieure à celle de l'air. Le dépôt de rosée aura donc lieu principalement la nuit [1].

La vapeur invisible contenue dans l'air, bien que, étant un puissant rayonnement, n'est pas refroidi rapidement comme l'herbe, car il a non seulement pour but de décharger sa propre chaleur, mais aussi celle de la grande masse d'air dans lequel il est suspendu. D'où la condensation de la vapeur en contact avec le gazon est la formation de rosée [19].

2. 2. 12 Rosée suivant les saisons

En premier lieu, la rosée est généralement plus abondante en printemps et en automne qu'en été ; la raison en est, qu'une plus grande différence se trouve généralement entre les températures du jour et de la nuit, dans les saisons tempérées, que dans les saisons chaudes [19].

2. 2. 13 Durée de la rosée

Kyriazopoulos nota que dans 50 % des cas, la rosée commence entre 21 h et 23 h, et que dans 67 % des cas, la formation de la rosée se termine entre 6 h et 8 h du matin. D'après le même auteur, le maximum du dépôt de la rosée est entre 4 et 6 heures du matin [1].

2. 2. 14 Point de rosée

Le point de rosée ou température de rosée est la température la plus basse à laquelle une masse d'air peut être soumise, à pression et humidité données, sans qu'il se produise une formation d'eau liquide par saturation [20].

2. 2. 15 Condensations de surface

L'air intérieur ayant une température, une humidité relative et une pression donnée, peut arriver en contact avec une surface de température plus faible. Au contact, l'air se refroidit et la température qu'il atteint dans le voisinage de la surface peut se retrouver en dessous du point de rosée. Il apparaît alors de la condensation dite de surface (la pression de vapeur dans l'air atteint la pression de saturation) [21].

La condensation sur une surface peut présenter deux mécanismes différents, par la formation d'un film ou par la coalescence de gouttes. Dans le premier cas, le condensât mouille la totalité de la surface et forme un film continu qui constitue alors la nouvelle surface de condensation, de grandeur égale à la surface initiale du condenseur. Dans le second cas, la condensation a lieu sur la ligne de triple contact (solide – liquide- gaz) et sur la surface des gouttes de condensât. En régime stationnaire, la surface mouillée occupée par les gouttes est

invariablement voisine de 55 % de la surface développée par le condenseur si sa surface est à caractère hydrophobe [4].

2. 3 Gouttes d'eau de la condensation naturelle

2. 3. 1 Formation des gouttes de rosée

Un objet exposé dans l'air voit d'abord la température de sa surface diminuée et une légère propagation uniformément humide sur elle. L'augmentation d'humidité, se traduit en gouttes plates de forme irrégulière, qui sont dans un premier temps très petites, mais agrandies par la suite en se jetant l'une dans l'autre, formant un ruisseau, au moyen de lequel une grande partie s'échappe du corps qui l'avait reçue.

Dans la production de la rosée, les gouttelettes formées dans l'air n'ont pas les dimensions des gouttelettes dont sont formés les brouillards et les nuages, mais elles sont beaucoup plus grandes. Ces petites gouttelettes se forment à une petite distance du sol ; si cette distance augmente de très peu, les gouttelettes deviennent très propagées.

Les gouttelettes en question parviennent et se déposent séparément sur le sol au début du phénomène de la rosée. Enfin les dimensions et le nombre des gouttelettes déposées dans l'unité de surface du sol et dans l'unité de temps, semblent dépendre de la rapidité du refroidissement, c'est-à-dire de l'unité du rayonnement du sol et de la quantité de vapeur d'eau qui se condense chaque fois pour un même degré de refroidissement [22].

2. 3. 2 Coalescence de gouttes

La coalescence est le pouvoir d'entrer en collision, des gouttelettes qui fusionnent pour former une plus grosse goutte. Si deux gouttes entrent en contact, elles vont fusionner et ainsi former une seule goutte (coalescence), toujours pour minimiser l'énergie totale, produit de la tension superficielle par la surface totale. En effet, la surface totale du liquide est ainsi amoindrie [23].

Exemple

Si deux gouttes de même rayons R , leur volume V est proportionnel au cube de leur rayon R^3 . Le volume $2V$ de la goutte résultante a donc un rayon qui vaut $2^{\frac{1}{3}} \times R$.

Leur surface totale (séparément) est de $8\pi R^2$, par calculs nous trouvons que la surface de la goutte résultante est de $6,3\pi R^2$, donc moindre que celle des deux gouttes initiales [23].

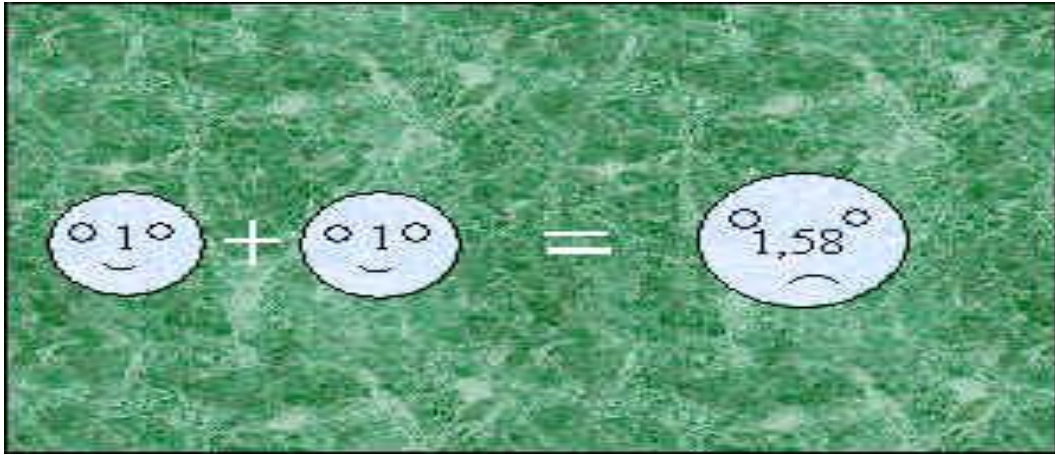


Fig. 2. 6 : Coalescence de deux gouttes d'eau sur une surface solide [23]

2. 3. 3 Angle de contact d'une goutte d'eau

L'angle θ s'appelle angle de contact. Il dépend à la fois du liquide, du solide qui le supporte ou le contient, et du gaz qui environne les deux. Trois paramètres sont donc à prendre en compte :

- La tension superficielle (γ_{sl}) entre le solide et le liquide ;
- La tension superficielle (γ_{lv}) entre le liquide et sa phase vapeur ;
- La tension superficielle (γ_{sv}) entre le solide et la vapeur.

La figure 2. 7, montre les trois forces en présence, représentées par leurs tensions superficielles correspondantes [24].

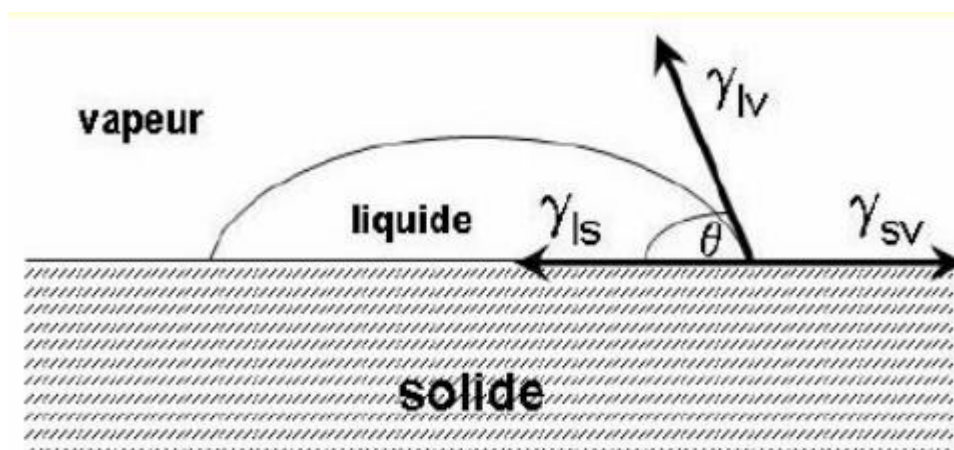


Fig. 2. 7 : Angle de contact d'une goutte, et les trois surfaces de séparation

L'équilibre de la goutte se traduit par l'équation (2. 3)

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta \quad (2. 3),$$

D'où l'équation (2. 4)

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \quad (2. 4).$$

2. 4 Méthodes et instruments de mesure de la rosée

2. 4. 1 Mesure de la quantité de rosée dans le temps

Pour mesurer la quantité de rosée déposée chaque soir, un instrument est utilisé appelé drosomètre. Le procédé le plus simple et le plus utilisé depuis longtemps par les chercheurs, consiste à exposer des organes en plein air dont le poids exact est connu, puis les peser à nouveau après qu'ils sont couverts de rosée [19].

2. 4. 2 Drosomètre

Le drosomètre est un Instrument destiné à mesurer la quantité de rosée qui tombe chaque jour. Il y a deux sortes de drosomètres selon l'usage auquel ils sont destinés. Les uns, perfectionnés et sensibles, seront employés dans les laboratoires. Ce sont des appareils auxquels on peut apporter des modifications.

Les autres indiquent uniquement les quantités de rosée reçues et sont placés partout où des observations sont estimées nécessaires [2].

2. 4. 3 Méthode gravimétriques

C'est celle qui est généralement utilisée. Le principe en est simple. On pèse un récepteur le soir avant de l'exposer en un lieu déterminé. On le pèse à nouveau le matin. La variation de poids indique la quantité de rosée déposée durant la nuit sur la surface considérée [2].

2. 4. 4 Condenseur radiatif

Le condenseur est constitué d'un matériau innovant de faible inertie thermique et de grande émissivité pour le rayonnement IR thermique. Ce matériau est protégé du rayonnement terrestre par plusieurs centimètres d'isolant et il est exposé au ciel nocturne de radiation moindre, avec lequel il est en équilibre radiatif. Il doit donc d'un point de vue radiatif être orienté suivant un angle minimum avec l'horizontale [4].

2. 5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a pu voir différents paramètres liés à la condensation naturelle (rosée), et comment se phénomène opère pendant les nuits claires et sereines, d'où nous avons tiré plusieurs conclusions :

- La rosée est un phénomène aléatoire
- Elle peut affecter la fiabilité des réseaux électriques en l'occurrence la performance électrique des isolateurs haute tension par le biais des petites gouttelettes qui couvrent et humidifie toute leurs surfaces.
- Dans le pire des cas, la condensation couvre presque 55 % de la surface hydrophobe [4].

3.1 Introduction

La météorologie est un vaste domaine que nous côtoyons chaque jour. Il est très difficile de prévoir les aléas atmosphériques, en effet les prévisions, ou plutôt les tendances à long terme, sont souvent laborieuses. Notre étude portera sur une infime partie de ce domaine...

Sur un isolateur exposé sous la pluie, nous observons la multiplication des impacts des gouttes d'eau sur sa surface. Sauf que cette constellation ou répartition de gouttes, ni une autre pluie ni une simulation ne pourra la refaire, d'où on déduit que la pluie est un phénomène aléatoire par nature. Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser dans un premier temps aux nuages, la pluie et aux gouttes de pluie. Ensuite, nous définirons tous les paramètres liés à cette précipitation (pluie), ainsi que les méthodes et appareils utilisés pour mesurer la pluie.

Lorsqu'on étudie la pluie en tant que précipitation, les caractéristiques du phénomène sont :

- la quantité d'eau de pluie (information indispensable à l'établissement du bilan hydrologique)
- la manière avec laquelle cette pluie tombe.

3. 2 Nuages

3. 2. 1 Formation des nuages

Quand une masse d'air est chauffée par le soleil, elle sera sous forme d'air chaud qui va se maintenir en suspension sur une partie de la masse d'eau contenue dans la mer par exemple. Par évaporation, cette eau va se retrouver aussi en suspension sous forme gazeuse non saturée dans l'air, cet air ensuite va être emmené par des courants dominants (vent). À un moment donné, il va entrer en contact avec de l'air froid. L'air chaud contient de la vapeur d'eau, comme il est plus léger que l'air froid, il s'élève en altitude. Du même coup, sa pression diminue et il se refroidit. Ce refroidissement provoque la condensation (point de saturation en humidité de l'air chaud) [25].

Donc l'eau va passer de l'état gazeux à l'état liquide sous forme de gouttelettes, et c'est à ce moment-là qu'apparaissent les nuages [25].

3. 2. 2 Types de nuages

On compte dix groupes principaux de nuages :

- Cirrus (Ci) : 6 000 à 12 000 m d'altitude (aucune précipitation)
- Cirrocumulus (Cc) : 5 000 à 13 000 m d'altitude (aucune précipitation)
- Cirrostratus (Cs) : 5 000 à 13 000 m d'altitude (aucune précipitation)
- Altcumulus (Ac) : 2 000 à 6 000 m d'altitude (aucune précipitation)
- Nimbostratus (Ns) : 2 000 à 6 000 m d'altitude (pluie ou neige)
- Altostratus (As) : 2000 à 6 000 m d'altitude (pluie ou neige)
- Stratocumulus (Sc) : 300 à 2 500 m d'altitude (parfois de la pluie ou de la neige)
- Stratus (St) : 0 à 500 m d'altitude (souvent quelques gouttes de pluie)
- Cumulus (Cu) : 200 à 2 000 m d'altitude (précipitations rares)
- Cumulonimbus (Cb) : 300 à 17 000 m d'altitude (fortes précipitations, souvent avec de l'orage)

Ces nuages sont divisés en deux familles :

- Nuages stratiformes comme (stratus, cirrostratus...)
- Nuages cumuliformes comme par exemple (cumulonimbus, cumulus, altocumulus...) [26].

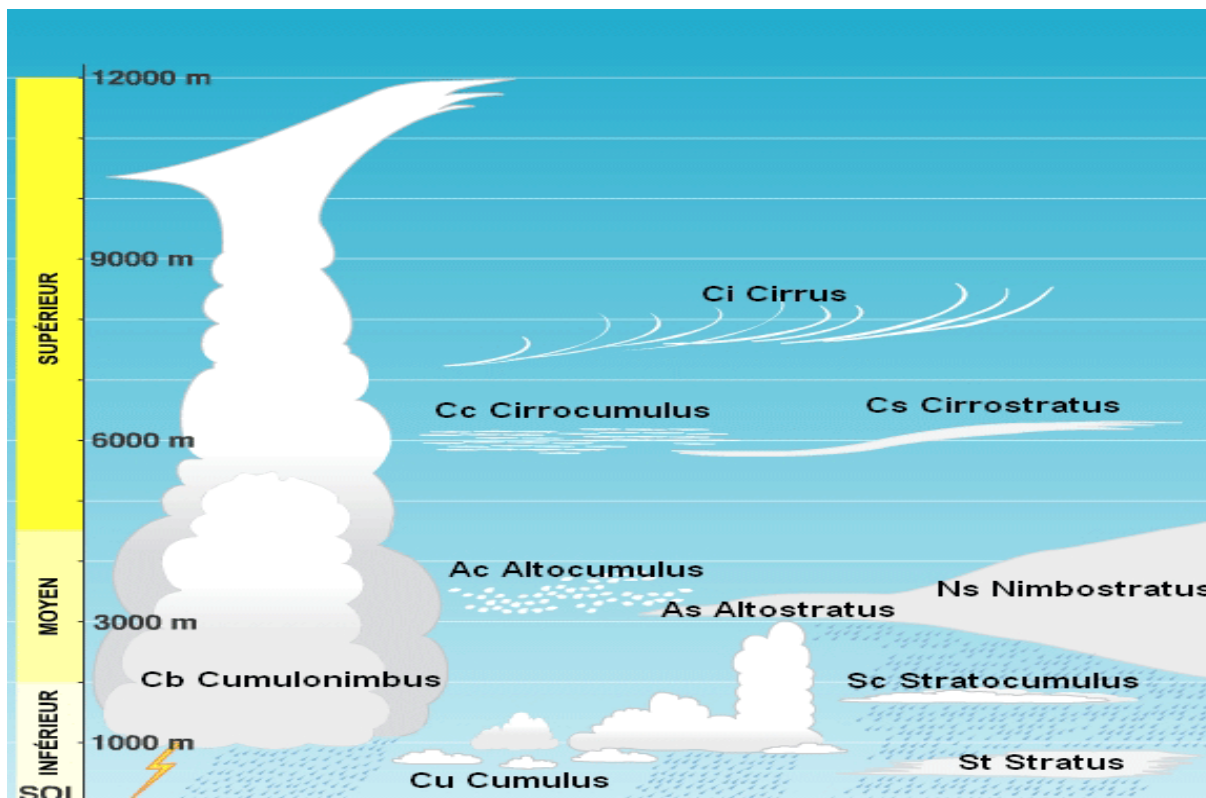


Fig. 3. 1 : Altitude et caractéristiques des différents nuages [26]

3. 2. 3 Pluie suivant les types de nuages et diamètres des gouttes

Le diamètre des gouttelettes d'eau varie entre 0,5 et 5 à 6 mm. Mais dans les nuages, le diamètre des gouttelettes d'eau varie entre 2 et 200 μm [27].

3. 3 Précipitations

Les précipitations désignent tous les météores qui tombent dans l'atmosphère et il peut s'agir de solides ou de liquides selon la composition et la température de la précipitation.

On distingue deux types de précipitations :

- Stratiformes : Ce sont des précipitations pour lesquelles la vitesse verticale de l'air est inférieure à la vitesse de chute des gouttelettes d'eau ou de glace.
- Convectives : Pour lesquelles la vitesse verticale de l'air est supérieure ou égale à la vitesse de chute des gouttelettes d'eau ou de glace [28].

3. 3. 1 Deux conditions pour générer des précipitations

- Condensation de la vapeur d'eau atmosphérique (formation d'un nuage)
- Agglomération des gouttes de pluie (précipitations)

3. 3. 2 Pluie

La pluie est un phénomène naturel par lequel des gouttes d'eau tombent des nuages ou brouillard du ciel vers le sol. Il s'agit, avec la bruine, la neige, le grésil, la grêle, le givre, les grêlons d'orage... d'une des formes les plus communes de précipitations ou d'hydrométéores sur terre. On peut distinguer plusieurs formes (pluies douces à violentes, denses à espacées, fines à grossières, légères à lourdes, froides mêlées de neige ou parfois de grêlons à partiellement gelées, tièdes à chaudes, à grosses gouttes ou à fines gouttes, parfois complètement évaporées avant de toucher la terre). Elle est aujourd'hui localisée par satellite et suivie en animation cartographique en temps légèrement différé par des radars de précipitations. Le cycle de l'eau est un parcours important de la pluie puisqu'il est en boucle [29].

3. 3. 3 Formation de la pluie

L'eau formant la pluie provient de l'évaporation de l'humidité qui existe dans la nature et plus particulièrement des grandes étendues d'eau (lacs, mers, etc.). Cette vapeur d'eau se mélange à la masse d'air. Lorsque l'air s'élève à cause des mouvements de l'atmosphère, il se refroidit par détente. La vapeur d'eau contenue dans l'air se condense autour de noyaux de

condensation (poussières, pollens et aérosols) lorsqu'une légère sursaturation est atteinte. Ces gouttelettes donnent des nuages. La pluie, en réalité initialement la bruine, se forme à partir du moment où l'accrétion des gouttelettes avoisine ou dépasse la taille de 50 μm . L'accrétion amorcée par association collante se poursuit inéluctablement. La taille des gouttelettes peut alors facilement atteindre le dixième de millimètre, voire de manière catastrophique 4 à 5 mm dans les grosses pluies d'orage [29].

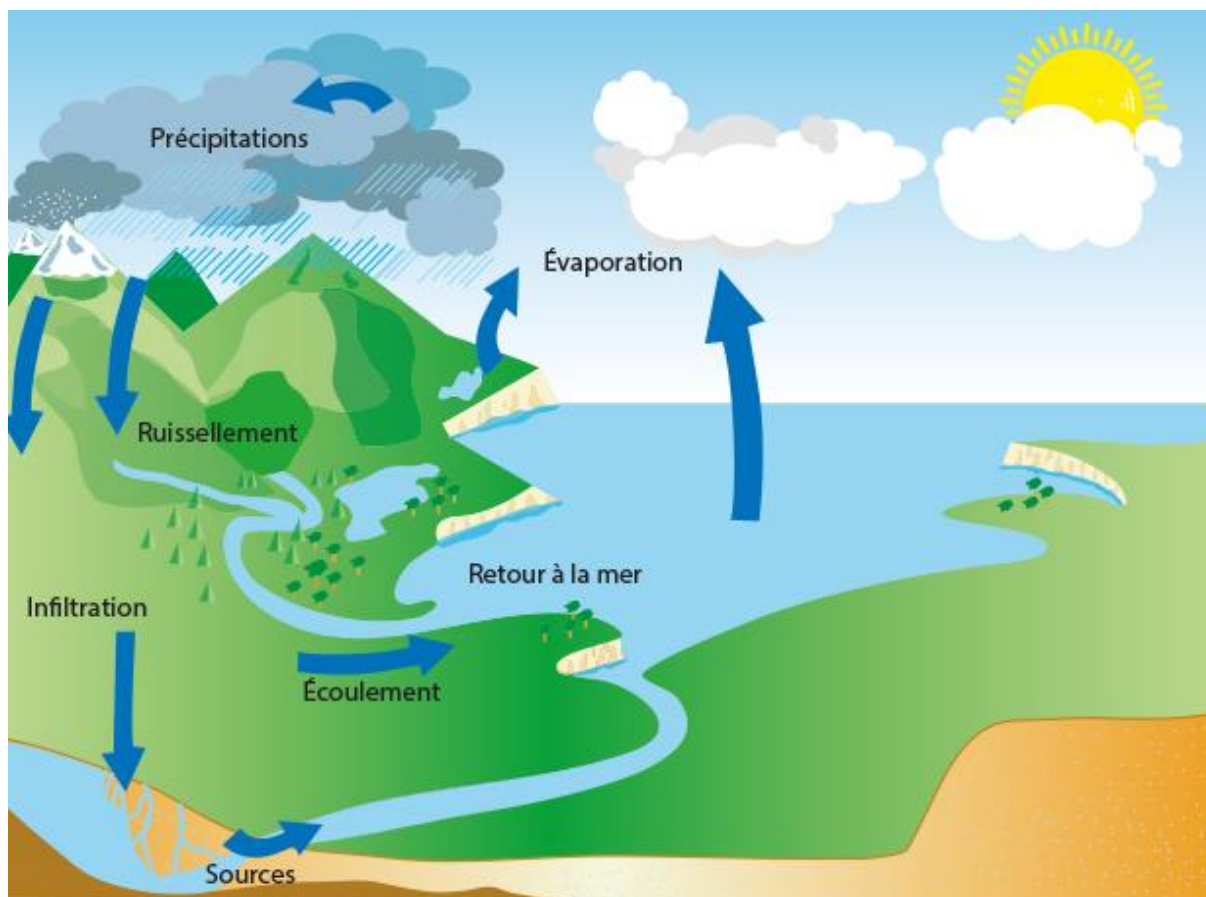


Fig. 3. 2 : Formation de la pluie et le cycle d'eau [43]

3. 3. 4 Régime des précipitations par leurs noms et caractéristiques [27]

• Régime équatorial humide :

- plus de 200 cm de précipitation annuelle moyenne (Exemple : bassin de l'Amazone)

• Régime subtropical humide :

- entre 100 et 150 cm de précipitation annuelle moyenne (Sud-est de l'Amérique du nord)

- Régime subtropical sec :
 - moins de 25 cm de précipitation annuelle moyenne, (sud du Maghreb)
- Régime océanique tempéré :
 - plus de 100 cm de précipitation annuelle moyenne (Europe)
- Régime polaire et arctique :
 - moins de 30 cm de précipitation annuelle moyenne (grand nord Canadien)

3. 3. 5 Différents types de pluies

Dans le tableau 3. 1, nous trouvons les différents genres de pluies avec les diamètres de leurs gouttes et les vitesses auxquelles elles se précipitent [30].

Types de pluie	Diamètre des gouttes	Vitesse de la précipitation
Bruine	0.006 à 0.06 mm	0.10 à 20 cm/s
Pluie fine	0.06 à 0.6 mm	20 à 100 cm/s
Pluie continue (modérée)	1 à 3 mm	150 à 400 cm/s
Averse	4 à 6 mm	500 à 800 cm/s

Tableau 3. 1 : Types de pluies avec les diamètres et vitesse de leurs gouttes [30]

3. 3. 6 Notion d'averse et d'intensité

On désigne par "averse" un ensemble de pluies associé à une perturbation météorologique bien définie. La durée d'une averse peut donc varier de quelques minutes à une centaine d'heures et intéresser une superficie allant de quelques kilomètres carrés (orages) à quelques milliers (pluies cycloniques). On définit finalement une averse comme un épisode pluvieux continu, pouvant avoir plusieurs points d'intensité. L'intensité moyenne d'une averse s'exprime par le rapport entre la hauteur de pluie observée et la durée t de l'averse :

$$I = \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (3.1)$$

Avec :

I: Intensité moyenne de la pluie (mm/h, mm/min)

h : Hauteur de pluie de l'averse (mm),

t : Durée de l'averse (h ou min) [31].

3. 3. 7 Types de pluies

3. 3. 7. 1 Averse

Une averse est un mode de précipitations se caractérisant par un début et une fin brusque et par des variations rapides d'intensité. Souvent forte et de courte durée, elle provient de nuages convectifs comme le cumulus et donne de la pluie. L'origine du mot est liée au terme « verse » qui désigne les cultures couchées au sol à la suite d'une pluie violente, il est dit alors qu'il pleut « à verse » [32].

3. 3. 7. 2 Orage

Un orage est une perturbation atmosphérique d'origine convective associée aux nuages de type cumulonimbus. Ce dernier est à forte extension verticale, il engendre des pluies fortes à diluviennes, des décharges électriques de foudre accompagnées de tonnerre. Dans des cas extrêmes, l'orage peut produire des chutes de grêle, des vents très violents et, rarement, des tornades [32].

3. 3. 7. 3 Pluies acides

Une précipitation acide résulte de la combinaison des gaz rejetés dans l'atmosphère avec l'eau présente dans celui-ci, c'est-à-dire les nuages. Les zones industrielles et à forte activité polluante sont les principaux facteurs qui favorisent ce fléau. Ainsi que les anciens pays miniers tels que le France, l'Angleterre, la Chine et les Etats-Unis [33].

3. 4 Gouttes de pluie

3. 4. 1 Évolution des gouttes de pluie à partir des nuages

Les fines gouttelettes d'eau qui se condensent sur les particules de poussière pour créer un nuage sont séparées par des distances relativement grandes, si on compare ces distances à la taille de gouttelettes. Étant donné qu'il en existe des milliards, on a l'impression que le nuage forme une masse compacte. Plus les nuages montent vers des couches d'air plus froid, plus les gouttelettes grossissent et se rapprochent les unes des autres. Quand la taille de la gouttelette

atteint la grosseur d'un point de ponctuation (bruine), elle ne peut plus flotter et elle commence à descendre lentement, de l'intérieur du nuage vers sa base. Lorsque la taille de la gouttelette de bruine dépasse quelque peu la grosseur d'un point, elle se met à tomber plus vite. En d'autres mots, le poids des gouttelettes entraîne leur chute. La température de la couche d'air à travers laquelle passent les gouttelettes étant supérieure à 0 degrés et la température du sol étant aussi au-dessus de 0°C, alors c'est sous forme de pluie que ces gouttelettes se rendent au sol [34].

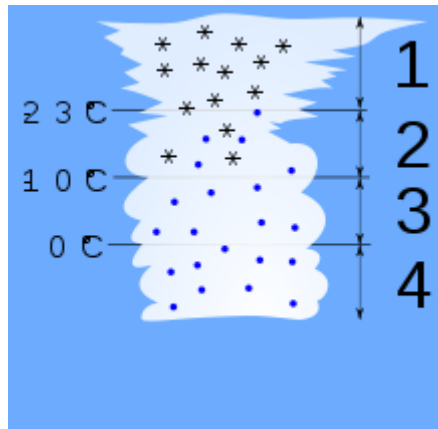


Fig. 3. 3 : Gouttes d'eau à l'intérieur d'un nuage [34]

3. 4. 2 Taille d'une goutte de pluie

À l'intérieur de la goutte, des molécules d'eau s'attirent entre elles. Ce phénomène est dû à un déséquilibre des charges entre atomes d'oxygène (négatifs) et atomes d'hydrogène (positifs) : les parties positives des molécules sont attirées par celles négatives. Cette force électromagnétique crée la cohésion entre les molécules d'eau à l'intérieur de la goutte. Elle reste cependant faible au regard de la gravité que la goutte subit, ainsi sa cohésion ne sera plus suffisante pour atteindre une taille de plus de 6mm [35].

3. 4. 3 Nombre de weber d'une goutte de pluie

Le nombre de Weber (we) est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides pour caractériser l'écoulement de fluides à l'interface d'un système multiphasique. Il correspond au rapport des forces d'inertie et la tension superficielle. Le nombre de Weber est défini pour un impact de goutte de pluie sur une surface solide avec la relation (3. 2)

$$we = \frac{\rho v^2 D}{\sigma} \quad (3.2)$$

Avec

- v - Vitesse d'impact (m/s)
- D - Diamètre de gouttes en (m)
- ρ – Densité du liquide (kg/m^3)
- σ - Tension superficielle de la goutte (N/m)

Le nombre de Weber est principalement utilisé pour l'étude d'écoulement d'un film et la formation de gouttes ou bulles. Par exemple, si une goutte a un Weber supérieur à 12, elle se désagrègera en de nombreuses autres petites gouttes. Pour les numéros Weber plus petits que l'unité, la déformation est faible: la chute est ellipsoïdale lors du contact de la goutte sur le solide [36].

3. 4. 4 Goutte de pluie sur une surface hydrophobe

L'eau ne mouille pas la feuille de lotus qui est superhydrophobe, après la pluie : les gouttes restent dispersées, et leur angle de contact avec la surface est très élevé. Les plus petites d'entre elles sont quasi sphériques ; les grosses, elles, sont aplaties par la pesanteur [37].



Fig. 3. 4 : Gouttes de pluie sur une feuille de lotus à caractère supèrehydrophobe [44]

3. 4. 5 Évaporation d'une goutte de pluie

Le temps d'évaporation d'une goutte déposée sur une paroi est étudié en fonction de la température de cette dernière. Il a été démontré l'existence de deux points remarquables. Le premier correspond à la température dite de Nukiyama, température à laquelle le temps

d'évaporation est le plus faible et où les transferts de chaleur sont maximums : le flux de chaleur est alors appelé flux critique. L'autre point notable correspond au temps d'évaporation le plus long et ainsi les transferts thermiques sont les plus faibles. Cette deuxième température est appelée température de Leidenfrost [38].

3.5 Méthodes et appareils de mesure de la pluie

3.5.1 Mesure de l'angle de contact d'une goutte d'eau de pluie sur une surface solide

La figure 3.4 donne le schéma d'un appareil de mesure de l'angle de contact.

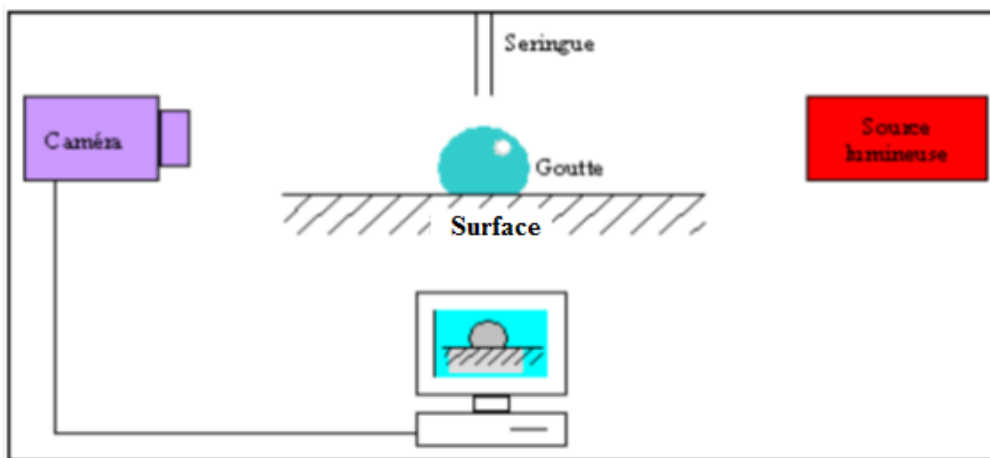


Fig. 3.5 : Appareil de mesure de l'angle de contact d'une goutte d'eau de pluie sur une surface solide [39]

En pratique, une goutte de liquide, en général de l'eau ultra-pure, est déposée à l'aide d'une seringue sur la surface de l'échantillon à analyser.

La mesure de l'angle se fait à partir d'images capturées par un PC via une caméra. Le logiciel WINGOUTTE permet de numériser le contour de la goutte par traitement des images. Il détermine ensuite l'angle de contact grâce à des méthodes d'interpolation [39].

3.5.2 Mesure de la hauteur d'eau précipitée

Quelle que soit la forme de la précipitation, liquide ou solide, on mesure la quantité d'eau tombée durant un certain laps de temps. On l'exprime généralement en hauteur d'eau tombée horizontale (mm) ou en intensité (mm/h). Mais sur les bulletins météo à la télévision,

on entend toujours parler de (l/m^2). Cette unité plus parlante, est identique à celle utilisée par les météorologues (le millimètre), puisqu'en effet [40] :

$$1 \text{ litre} = 1 \text{ dm}^3 = 10^6 \text{ mm}^3$$

$$1 \text{ m}^2 = 10^6 \text{ mm}^2$$

$$\text{D'où } 1 \text{ l} / \text{m}^2 = 10^6 \text{ mm}^3 / 10^6 \text{ mm}^2 = 1 \text{ mm}$$

Les principaux instruments de mesures des précipitations sont le pluviomètre et le pluviographe [40].

3. 5. 3 Pluviomètre

Il est utilisé pour mesurer la quantité de pluie tombée à un endroit précis. C'est un récipient cylindrique d'environ 36 centimètres de hauteur et de 11,4 centimètres de diamètre. Sa partie supérieure est amovible (on peut l'enlever) et a la forme d'un entonnoir (normalement de 200 cm^2) par lequel s'égoutte l'eau qui est ensuite recueillie dans un cylindre gradué en centimètres (figure 3. 6) [41].



Fig. 3. 6 : Pluviomètre en forme d'entonnoir [41]

3. 5. 4 Pluviographe

Cet appareil comporte, en dessous de son entonnoir de collecte de l'eau, une pièce pivotante dont les deux compartiments peuvent recevoir l'eau tour à tour (augets basculeurs). Quand un poids d'eau déterminé (correspondant en général à 0,1 ou 0,2 mm de pluie) s'est accumulé dans un des compartiments, la bascule change de position : le premier auget se vide

et le deuxième commence à se remplir. Les basculements sont comptés électriquement par comptage d'impulsions comme illustré sur la figure 3. 7 [41].

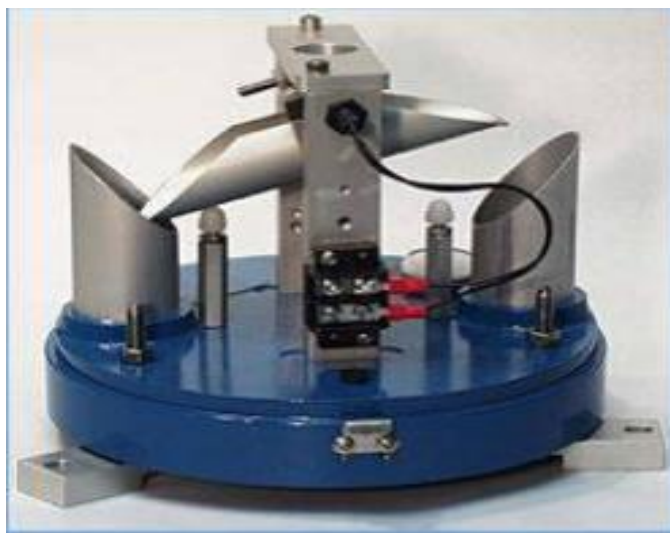


Fig. 3. 7 : Pluviographe avec son enregistreur automatique en blanc sur la figure

3. 5. 5 Spectromètre

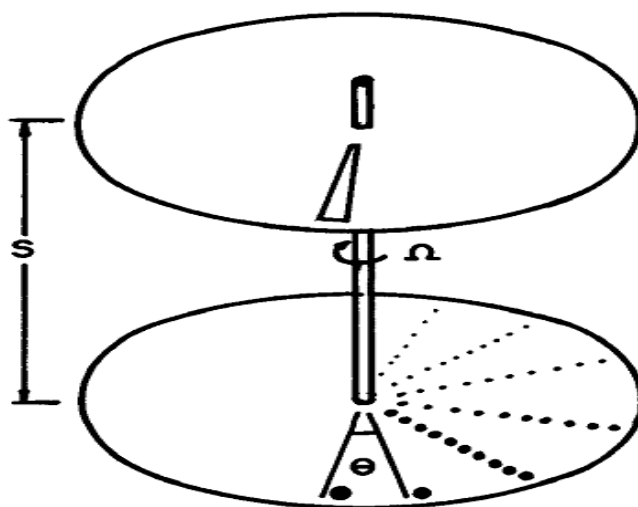


Fig. 3. 8 : Schéma illustrant l'utilisation des disques en rotation pour séparer les gouttes de pluie

Un spectromètre/spectrographe de gouttes de pluie qui utilise leurs vitesses finales de chute pour les séparer selon les tailles est illustré sur la figure 3. 8. L'appareil est composé de deux disques en rotation, le disque supérieur percé d'une étroite fenêtre permettant de laisser passer la pluie.

Les gouttes, séparées selon leur diamètre, sont collectées sur le disque inférieur. La distance entre les disques et la vitesse de rotation permettent de contrôler le degré de séparation des gouttes.

Étant donné la différence de vitesse de chute, les grosses gouttes arrivent plus rapidement sur le disque inférieur que les petites gouttes. L'angle de retard, θ par rapport à la fenêtre, avec lequel une goutte de vitesse de chute ω arrive sur le disque inférieur, dépend de la vitesse de rotation Ω , et de la distance de chute s entre les deux disques [42].

$$\theta = \frac{s}{\omega} \Omega \quad (3.6)$$

Avec :

Θ : Angle de retard entre les deux disques ;

S : Distance de chute des gouttes ;

ω : Vitesse de gouttes ;

Ω : Vitesse de rotation de l'axe portant les deux disques

3.6 Conclusion

Nous avons pu voir dans ce chapitre que la pluie se précipite sur terre sous plusieurs manières telle que averse, orage,...etc. De plus, nous pouvons se prévenir à l'avance grâce à nos connaissances sur ce phénomène, tout en observant le type de nuage qui règne dans le ciel.

Pour ce qui est de la mesure de la quantité et du volume de pluie tombée, il existe plusieurs appareils qui sont dotés dans ce sens pour comme ceux cités dans ce même chapitre.

Quant à la répartition de gouttes de pluie, nous remarquons que c'est une constellation aléatoire sur n'importe quelle surface ou matériau, mais que l'hydrophobicité d'une isolation en silicone est un paramètre important sur tout en présence d'un champ électrique.

4.1 Introduction

Dans le but de déterminer expérimentalement l'effet de la mouillabilité et du mode de la constellation des gouttes d'eau de pluie et de la condensation naturelle sur une surface en silicone hydrophobe, nous avons effectué de nombreux essais sur des échantillons réels en silicone (isolateurs haute tension), découpés d'un isolateur en silicone déjà utilisé par la SONELGAZ, dans le but d'avoir deux types d'isolateurs partiels différents :

- Un isolateur à trois ailettes (une grande ailette en haut, une petite au milieu et une grande en bas) ;
- Un isolateur à une ailette (comme celle du milieu de l'isolateur cité précédemment)

Dans un premier temps notre travail consiste à exposer nos isolateurs à l'air libre dans la nature par temps de pluie et durant les nuits claires et sereines en hiver.

Ces essais concernent la mesure de la longueur totale de la ligne de fuite humide de l'isolateur partiel en silicone hors tension, après avoir reçu de l'eau issue d'une averse et / ou de la rosée pendant toute la nuit jusqu'au petit matin.

4. 2 Dispositif expérimental

4. 2. 1 Support en bois installé en plein nature



Fig. 4. 1 : Support en bois utilisé pour suspendre les isolateurs à l'air libre

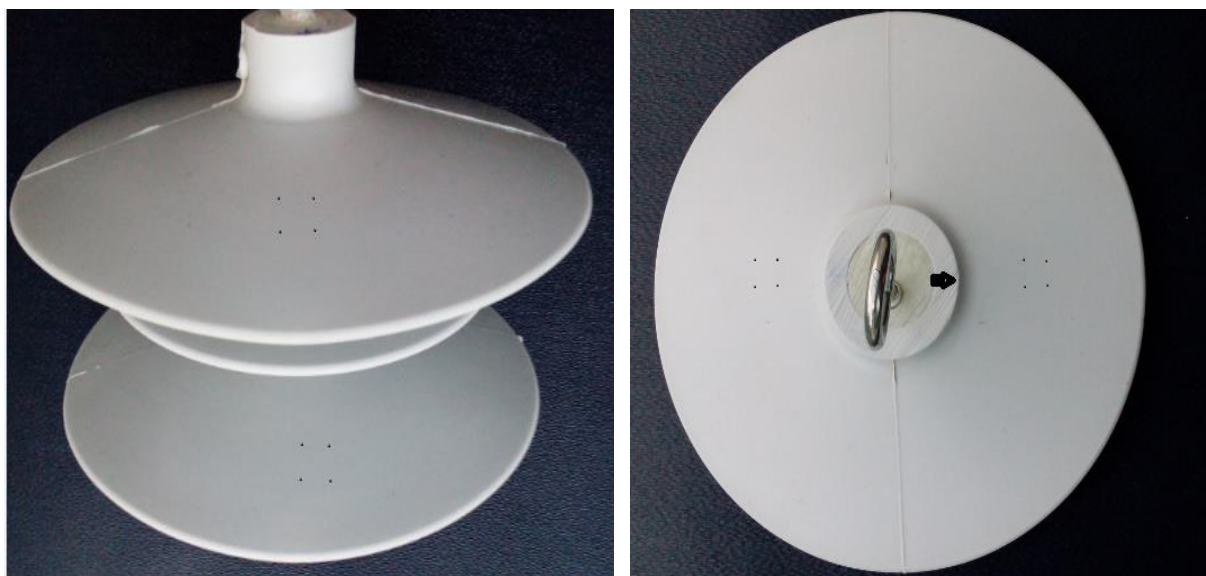
La figure 4. 1 illustre le support en bois en forme de pi (π). Celui-ci est installé à l'extérieur du laboratoire de haute tension de l'université Abderrahmane Mira (Bejaia) du côté de la bibliothèque. Ses deux pieds sont enfouis profondément dans le sol pour résister aux contraintes climatiques (vent). Celui-ci sert à porter nos échantillons pendant tous les essais effectués. Les isolateurs en silicone sont utilisés pour récolter la pluie ou la condensation sur leur surface. À l'aide d'une seringue nous, mesurons le volume des gouttes d'eau formées après des périodes d'essais bien déterminées. En plus, nous disposons d'un baromètre, d'un thermomètre et d'un hygromètre à cheveux pour la mesure des paramètres physiques de l'air ambiant.

4. 2. 2 Modèle expérimental

Le modèle expérimental utilisé est représenté sur la figure 4. 2 est constitué de deux types d'échantillons différents d'un isolateur réel en silicone récupéré chez la Sonelgaz :

- Un isolateur à trois ailettes alternées (grande- petite- grande)
- Un isolateur à une seule petite ailette

Sur chaque surface de nos échantillons nous prenons une aire de 1cm^2 sur deux secteurs égaux d'une ailette quelconque, orientés respectivement vers le nord et le sud géographique.



a) Isolateur à trois ailettes

b) Isolateur à une seule ailette

Fig. 4.2 : Deux modèles d'isolateurs partiels en silicone

4. 2. 3 Dessiccateur

Un dessiccateur désigne un équipement servant à protéger des échantillons en silicone contre l'humidité. Au laboratoire, il est sous forme parallélépipède en verre comme il est montré sur la figure 4. 3. Au préalable, une quantité suffisante de gel de silice de couleur orange est déposée au fond du dessiccateur. Ce gel permet de soutirer l'humidité absorbée par les isolateurs en silicone lors du dépôt des gouttes d'eau de pluie ou de condensation sur leur surface après chaque essai. Lorsque le gel de silice change de couleur et devient transparent, il faut le régénérer (Fig.4. 4).

Donc en fin chaque exposition sous pluie ou à condensation, les isolateurs sont mis dans le dessiccateur pour leur faire récupérer leur hydrophobie perdue partiellement lors du temps de leur exposition à la pluie ou au phénomène de condensation.



Fig. 4. 3: Dessiccateur



Fig. 4. 4: Gel de silice (silicagel)

4. 3 Nature des travaux

4. 3. 1 Exposition des échantillons sous la pluie

À chaque fois que la pluie commence à tomber, nous sortons nos échantillons du dessiccateur pour les accrocher sur notre dispositif illustré par la figure 4. 1.

À côté du dispositif est posée une jauge pour mesurer l'intensité de la pluie tombée durant la période d'exposition des échantillons. Nous ramenons un échantillon au laboratoire afin d'effectuer les mesures sur ce dernier après une période déterminée.

Chaque mesure est appuyée par une visualisation de la constellation des gouttes d'eau sur l'échantillon prélevé. Ce processus est répété autant de fois qu'il y a d'échantillons afin de mettre en valeur l'évolution de la constellation des gouttes de pluie sur l'isolateur en fonction de la quantité de pluie tombée durant la période pluvieuse.

4. 3. 2 Exposition des échantillons sous la condensation naturelle

Pour la rosée, on procède de la même manière que pour les mesures effectuées sous la pluie, sauf qu'ici, nous ne mesurons pas la quantité d'eau précipitée lors du phénomène de condensation et les intervalles de temps de prélèvement des échantillons sont plus longs. Dans ce cas, les mesures sont effectuées tout au long de la nuit.

4. 3. 3 Simulation de la condensation artificielle à l'aide d'un réfrigérateur

À la fin des saisons de pluies et de condensation, nous avons procédé à un travail de simulation de la rosée sous réfrigération. Cela consiste à mettre les échantillons dans un réfrigérateur tout en réglant la température à l'intérieur de ce dernier à 10°C, l'humidité est fixée presque à 100 %.

Après une heure d'exposition, les échantillons sont introduits dans une chambre chauffée à 35°C, le phénomène de condensation par chaque échantillon est filmé et largement interprété.

4. 4 Procédés de mesure

Le but de notre travail est la caractérisation de la constellation des gouttes d'eau et la taille des zones humides formées sur les surfaces des échantillons en silicone considérés sous l'influence des phénomènes de pluie et rosée.

Une seringue graduée en microlitres est utilisée pour prélever les volumes de gouttes d'eau formées sur des surfaces de 1 cm^2 sur deux secteurs au-dessus de chaque ailette des isolateurs choisis.

4. 4. 1 Exemples de calculs

La mesure des surfaces des gouttes d'eau est effectuée à l'aide d'une règle centimétrique sur une image agrandie par PC (Paint) et en convertissant les mesures sur images en mesures réelles nous aboutissons à des résultats en pourcentage avec la fameuse règle de trois. En quadrillant l'image agrandie sur le même logiciel, le comptage du nombre de gouttes nous devient plus facile.

4. 5 Résultats et discussions

4. 5. 1 Résultats des mesures sous la pluie

4. 5. 1. 1 Résultats des mesures sous la pluie du 06/03/2016

Le tableau 4. 1 contient les mesures effectuées sur la quantité de pluie (l/m^2), le volume des gouttes sur des surfaces de 1 cm^2 sur les secteurs sud et nord des isolateurs, ainsi que le nombre d'échantillons et les valeurs des facteurs climatologiques en fonction du temps d'exposition des petites ailettes.

Echantillon	Conditions atmosphériques	Temps d'exposition (min)	Quantité de pluie tombée (l/m^2)	Volume de gouttes sur 1 cm^2 secteur nord (μl)	Volume de gouttes sur 1 cm^2 secteur sud (μl)	Remarques
1	Température: 9°C Humidité: 82 % Pression: 1010 mb Vent: 19 km/h ,O	50	1,88	26,5	28,9	Pluie forte
2	Température: 9°C Humidité: 82 % Pression: 1010 mb Vent: 19 km/h ,O	80	2,1	30,4	33,4	Légère pluie
3	Température: 12°C Humidité: 78 % Pression: 1010 mb Vent: 24 km/h ,O	110	2,93	48,5	39,5	Arrêt de pluie après 115 minutes jusqu'à 137 minutes
4	Température: 12°C Humidité: 82 % Pression: 1010 mb Vent: 18 km/h ,O	130	6,34	27,1	24,3	Pluie forte avec vent

Echantillon	Conditions atmosphériques	Temps d'exposition (min)	Quantité de pluie tombée (l/m ²)	Volume de gouttes sur 1cm ² secteur nord (μl)	Volume de gouttes sur 1cm ² secteur sud (μl)	Remarques
5	Température: 9°C Humidité: 82 % Pression: 1010 mb Vent: 16 km/h ,0	155	4,23	31,6	30,4	Légère pluie
6	Température: 10°C Humidité: 82 % Pression: 1010 mb Vent: 23 km/h ,0	175	4,68	45,8	42,9	Puie forte
7	Température: 12°C Humidité: 82 % Pression: 1008 mb Vent: 23 km/h ,0	205	5,16	32,2	30,1	Arrêt de pluie après 185 minutes
8	Température: 12°C Humidité: 80 % Pression: 1010 mb Vent: 23 km/h ,0	225	5,16	26,8	19	Arrêt de pluie après 185 minutes
9	Température: 12°C Humidité: 78 % Pression: 1006 mb Vent: 23 km/h ,0	250	5,15	12,8	18,7	Arrêt de pluie après 185 minutes

Tableau 4. 1 : Résultats de toutes les mesures sous la pluie et les conditions atmosphériques de l'après-midi du 06/03/2016 de 11h40 à 15h40

La figure 4. 5 illustre l'évolution du volume de gouttes d'eau prélevé sur 1cm² de deux secteurs nord et sud des ailettes d'un isolateur en silicone en fonction du temps de leur exposition à la pluie naturelle.

Nous remarquons deux valeurs crêtes des volumes mesurés au secteur nord des échantillons 3 et 6 sur la figure 4. 5. Ils valent 48.5 μl et 45.8 μl respectivement. Ce qui explique la tendance des gouttes de pluie à prendre du volume en se coalisant entres elles jusqu'à une valeur limite, puis elles tombent. Si la pluie est continue en figure 4. 5, alors nous aurons pu avoir un autre volume important sur le sixième échantillon. Les montées et descentes des volumes sont expliquées par la nature de la pluie ou par son intensité. Par exemple, d'après le tableau 4. 1, nous soulignons l'arrêt de la pluie de la 115ème min à 137ème minute. Cela se traduit en figure 4. 5 par une chute brutale des volumes sur 1cm² aux secteurs nord et sud des ailettes.

Il en résulte, en résumé, que le volume maximal d'eau pouvant être recueilli sur surface de 1cm² d'une ailette en silicone inclinée de 20° est de 50 µl. Tout volume supérieur va finir par tomber sous l'effet de son poids et se faire remplacer par le volume issu de la pluie suivante ou s'évaporer dans le cas de l'arrêt de celle-ci.

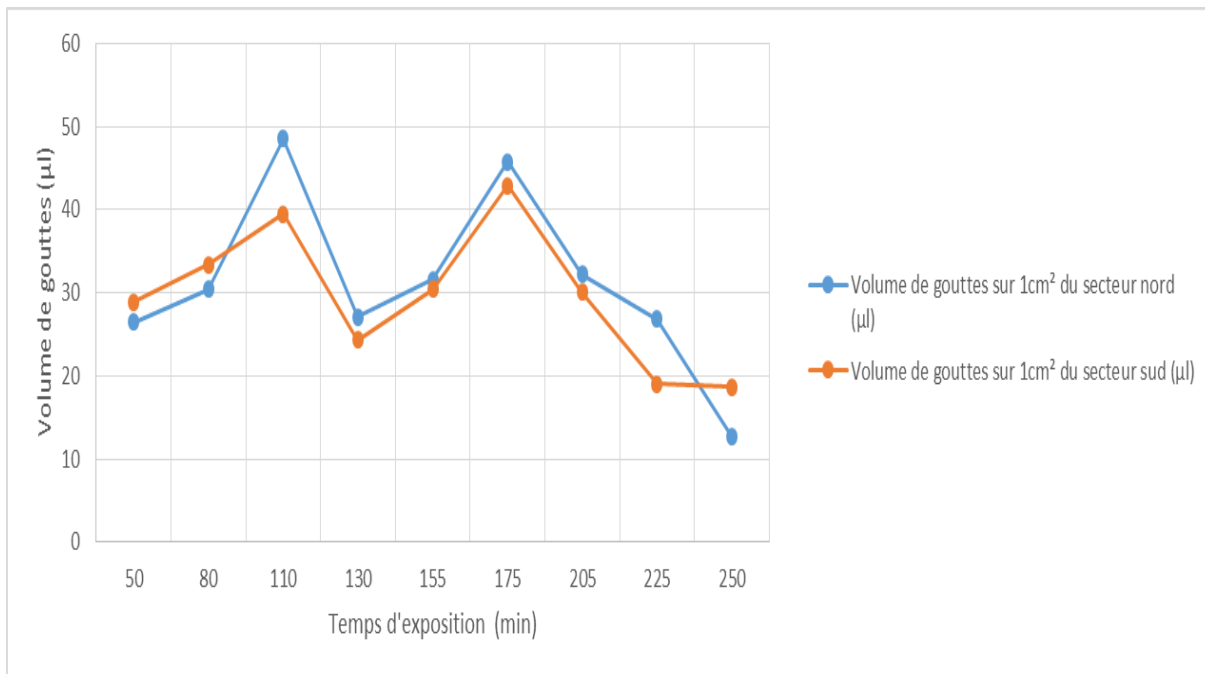


Fig. 4. 5 : Volumes des gouttes mesurées sur 1cm² aux secteurs nord et sud des 9 échantillons en silicone en fonction du temps de leur exposition



a) Vue d'une petite ailette après 110 minutes d'exposition à la pluie



b) Vue d'une surface de 1cm² sur le secteur nord de l'ailette

Fig. 4. 6 : Répartition des gouttes de pluie sur une ailette exposée à un taux de précipitation de l'ordre de 2.93l/m²

4. 5. 1. 2 Résultats des mesures sous la pluie du 10/03/2016

Le tableau 4. 2, donne les résultats et mesures effectuées sur 9 échantillons (petites ailettes) sous la pluie du 10.03.2016. Les conditions atmosphériques, ne sont pas très variables durant les périodes d'exposition, quant à la pluie elle s'est arrêtée à partir de la 170ème minute. Au-delà de ce moment nous n'observons que de petites gouttes amenées par le vent, ce qui se traduit par une quantité de pluie récoltée de l'ordre de 3.12 l/m^2 . Il est à signaler que cette quantité est très petite par rapport au taux de précipitation recueillie sur le tableau 4. 1, après 170 minutes d'exposition.

Echantillon	Conditions atmosphériques	Temps d'exposition (min)	Quantité de pluie tombée (l/m^2)	Volume de gouttes sur 1cm^2 secteur nord (μl)	Volume de gouttes sur 1cm^2 secteur sud (μl)
1	Température: 8°C Humidité: 87 % Pression: 1006 mb Vent: 23 km/h, SO	25	0,22	20,7	22,8
2	Température: 8°C Humidité: 87 % Pression: 1006 mb Vent: 20 km/h, SO	55	1,08	34,8	25,1
3	Température: 12°C Humidité: 84 % Pression: 1010 mb Vent: 20 km/h, SO	80	2,07	39,1	32,6
4	Température: 12°C Humidité: 82 % Pression: 1010 mb Vent: 23 km/h, SO	110	2,51	33,5	28
5	Température: 12°C Humidité: 82 % Pression: 1010 mb Vent: 23 km/h, SO	150	3	26,5	24,3
6	Température: 10°C Humidité: 82 % Pression: 1010 mb Vent: 23 km/h, SO	170	3,12	32,4	30,7
7	Température: 12°C Humidité: 82 % Pression: 1008 mb Vent: 16 km/h, SO	185	3,12	31,2	30,1
8	Température: 12°C Humidité: 80 % Pression: 1010 mb Vent: 23 km/h, O	210	3,12	18,2	23,2
9	Température: 12°C Humidité: 78 % Pression: 1006 mb Vent: 23 km/h, O	235	3,12	16,3	13,6

Tableau 4. 2 : Mesure du volume de gouttes sur 1cm^2 aux secteurs sud et nord de chaque surface du dessus des échantillons touchés par la pluie du 10/03/2016

La figure 4. 7, porte les deux courbes des volumes de gouttes d'eau des secteurs nord et sud des ailettes en fonction du temps de leur exposition. Nous remarquons que la courbe des volumes mesurés sur les surfaces sud des ailettes est pratiquement toujours en dessous de celle des volumes mesurés au nord. Cela est causé par le vent sud-ouest qui souffle sur la première jusqu'à la septième ailette et qui ne permet pas aux gouttes de s'agrandir sur les secteurs sud des ailettes. Comme la pluie s'est arrêtée à la 170^{ème} minute, les valeurs des volumes sont en chute libre.

Il est à constater que pour une surface isolante en silicone recouverte de gouttes d'eau à faible volume, le vent peut être un facteur favorisant la chute des gouttes de pluie, comme montré par le tableau 4. 2, un vent de 23 km/h est enregistré à partir du 8^{ème} échantillon ce qui explique la baisse des volumes des gouttes.

Enfin, il est à souligner dans ce cas de figure que le volume maximal de gouttes d'eau recueilli sur 1 cm² est de l'ordre de 40 µl.

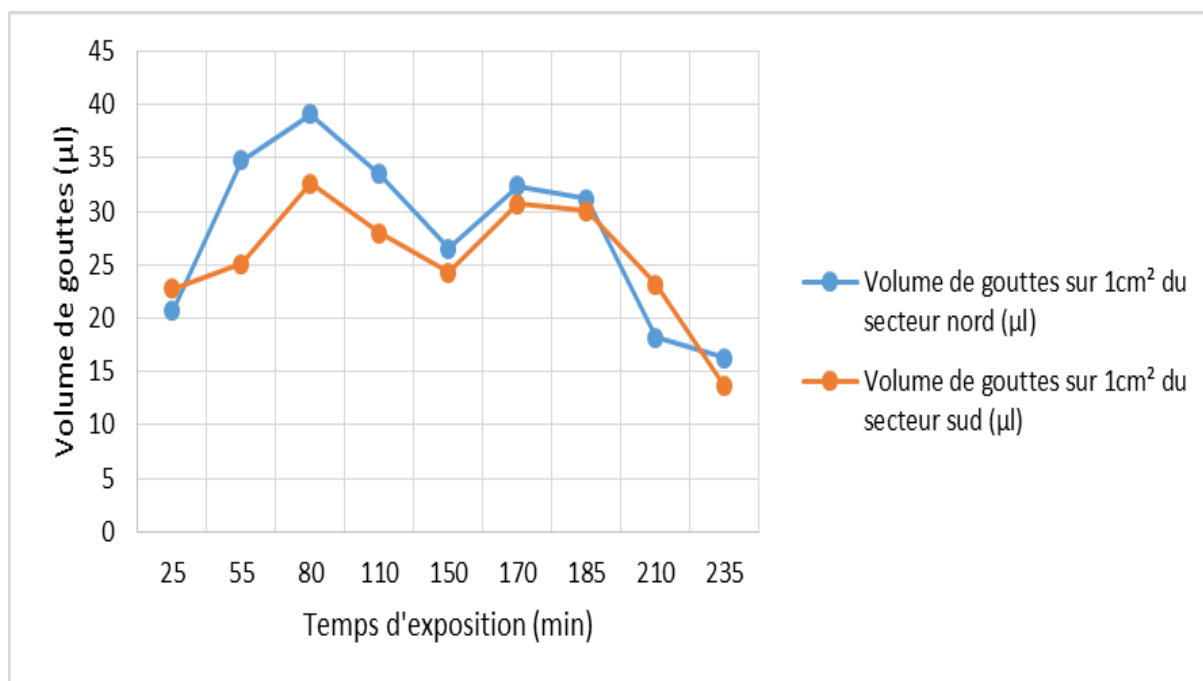
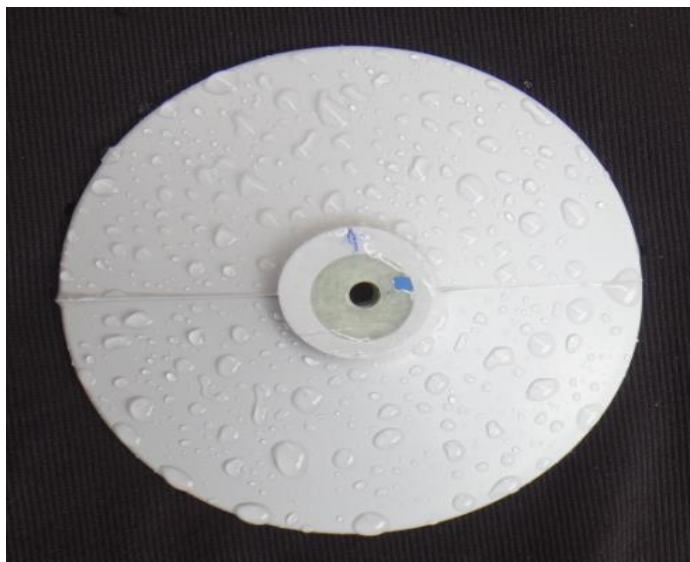


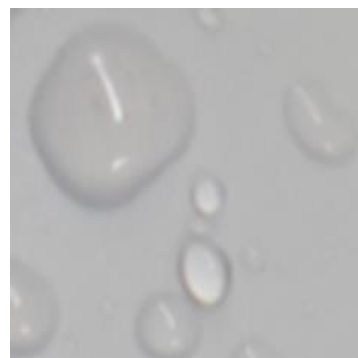
Fig. 4. 7 : Volume de gouttes d'eau de pluie sur 1 cm² en fonction du temps d'exposition des échantillons

La figure 4. 8. montre la troisième ailette retirée après 80 minutes d'exposition sous une pluie fine. Si on suit la flèche bleue qui indique le nord nous voyons clairement que les gouttes sont plus intenses sur le secteur nord de la surface par rapport au sud, ceci confirme la situation de la courbe des volumes mesurés au sud des échantillons (figure 4. 7). Pour avoir une idée sur la longueur de la ligne de fuite en ce moment précis de précipitation, nous avons mesuré la zone

mouillée sur 1 cm^2 contenant un volume de $39.1 \mu\text{l}$ (figure 4. 8. b), elle vaut 37 % de la surface totale. Une fois encore nous remarquons que cette pluie ne mouille pas trop l'isolateur plus que celle du 06/03/2016 à cause de leurs différentes intensités.



a) Vue de la surface complète de l'isolateur après 80 minutes d'exposition à la pluie



b) Vue d'une surface de 1 cm^2 sur le secteur nord de l'ailette

Fig. 4. 8 : Constellation de gouttes de pluie déposées sur l'isolateur à une ailette après avoir recueilli 2.07 l/m^2 de pluie

4. 5. 1. 3 Résultats des mesures sous la pluie du 11/03/2016

Dans cet essai, seul les isolateurs à trois ailettes sont exploités. Les résultats de mesure sont mentionnés dans le tableau 4. 2. Ici nous avons pris quatre fois les surfaces de 1 cm^2 (c.-à-d. : les secteurs sud et nord de l'ailette du haut, et la même chose pour celle d'en bas). À partir des quantités de précipitations mesurées dans ce tableau nous constatons que la pluie s'est arrêtée après 110 minutes d'exposition, ce qui explique la baisse des volumes des gouttes de pluie mesurés au-delà de cette période. Cette pluie est la plus intense par rapport à celles citées précédemment à cause du taux enregistré ici qui vaut 6 l/m^2 .

Conditions atmosphériques	Quantité de pluie tombée (l/m ²)	Temps d'exposition (min)	Volume de gouttes sur 1cm ² du secteur sud ailette du haut (μl)	Volume de gouttes sur 1cm ² du secteur nord ailette d'en bas(μl)	Volume de gouttes sur 1cm ² du secteur sud ailette d'en bas (μl)	Volume de gouttes sur 1cm ² du secteur nord ailette du haut (μl)
Température: 8°C Humidité: 87 % Pression: 1006 mb Vent: 23 km/h, O	1,27	30	33	14,6	11	40,3
Température: 8°C Humidité: 87 % Pression: 1006 mb Vent: 23 km/h, O	5,73	70	35,6	24,2	25,1	47,6
Température: 8°C Humidité: 87 % Pression: 1006 mb Vent: 23 km/h, O	6,01	110	38,7	36,8	42,3	49,9
Température: 8°C Humidité: 87 % Pression: 1006 mb Vent: 23 km/h, O	6,01	155	31,2	34,3	35,4	41,4
Température: 8°C Humidité: 87 % Pression: 1006 mb Vent: 23 km/h, O	6,01	190	27,5	29,2	31,7	33,6

Tableau 4.3 : Résultats de mesures effectuées sur cinq échantillons sous la pluie du 11/03/2016

Sur la figure 4. 9, nous remarquons que les volumes mesurés sur toutes les surfaces augmentent d'une façon linéaire jusqu'à 110 minutes d'exposition. Cela est dû à une pluie intense durant cette période 4.48 l/m² en 40 minutes. L'ailette du haut (figure 4. 10. a) enregistre des grands volumes de gouttes grâce à son exposition en premier lieu sous la pluie contrairement à l'ailette d'en bas qu'elle couvre. À partir des valeurs maximales enregistrées à la 110ème minute, la pluie s'est arrêtée laissant derrière elle des fines gouttelettes amenées pas le vent, ce qui explique la décroissance des volumes dans cette période d'essai. Les volumes des gouttes en fonction du temps d'exposition laissent à dire que même après arrêt de pluie les gouttes ne tombent pas toutes, mais une partie s'évapore suivant le temps et la température du matériau et une autre partie de gouttes tombe sous l'effet du vent ou de leur poids par rapport au plan incliné de l'ailette et de la gravité.

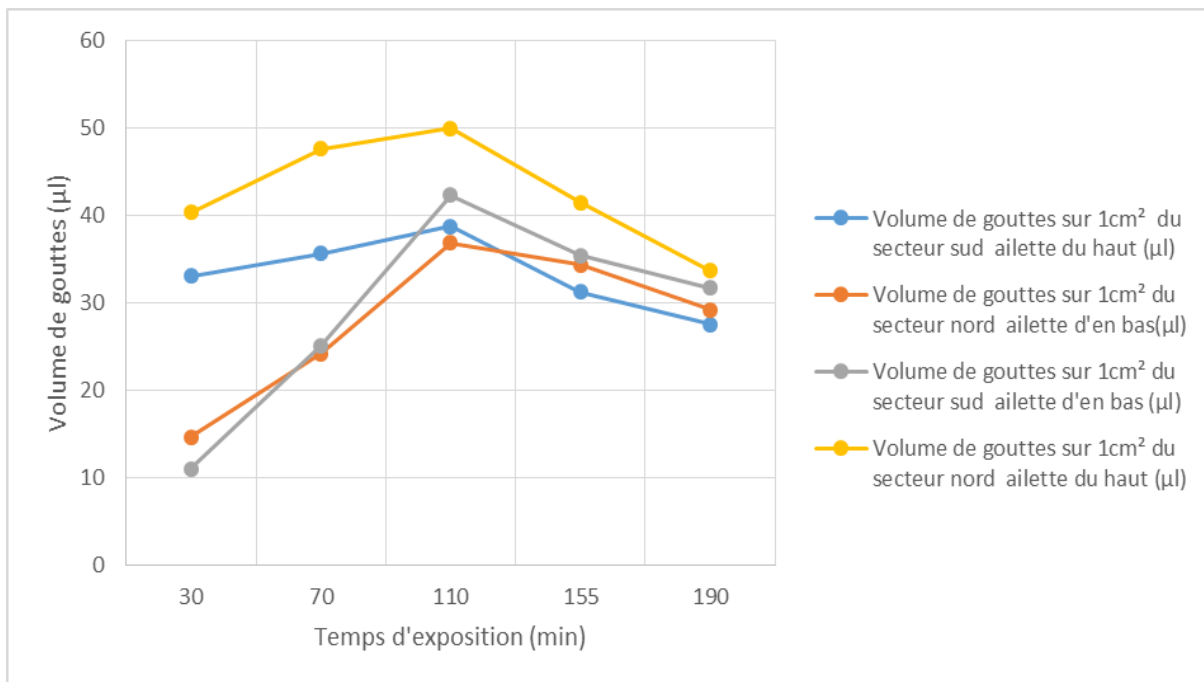
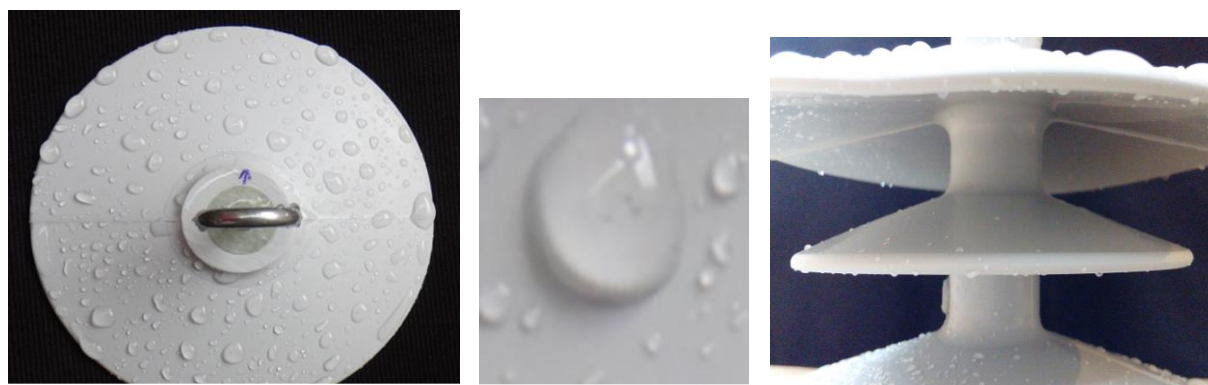


Figure 4. 9 : Courbes des volumes de gouttes suivant des secteurs de 1cm² (nord, sud, dessous, dessus) des échantillons en fonction du temps de leur exposition



a) Vue d’une petite ailette après 110 minutes d’exposition à la pluie

b) Vue d’une surface de 1cm² sur le secteur nord de l’ailette

c) Tronc de l’isolateur et l’ailette du milieu

Fig. 4. 10 : Isolateur à trois ailettes sous la pluie du 11/03/2016 après avoir reçu 6 l/m² de précipitations

Le volume des gouttes enregistré sur le troisième échantillon au secteur nord de l’ailette du haut est de 49.9 µl (figure 4. 10. b) et après calcul, nous avons trouvé que la zone sèche est rétrécie par rapport à celle mesurée précédemment, car ici la zone humide est de 44 %. Il est à constater que la longueur de la ligne de fuite des isolateurs en silicone est en relation inverse avec le taux de précipitation. Le tronc et l’ailette du milieu ne sont presque pas touchés par la pluie grâce à leur position couverte par l’ailette du dessus (figure 4. 10. c).

4. 5. 2 Résultats des mesures sous la condensation naturelle (Rosée)

4. 5. 2. 1 Rosée durant la nuit du 12/04/2016 jusqu'au matin du 13/04/2016

Le tableau 4. 4 résume l'évolution du nombre et du volume des gouttes de rosée recueillie durant la nuit du 12/04/2016 au petit matin du 13/04/2016 en fonction des conditions climatiques.

Conditions atmosphériques	Echantillon	Temps d'exposition (min)	Nombre de gouttes secteur nord	Volume de gouttes sur 1cm ² secteur nord (μl)	Nombre de gouttes secteur sud	Volume de gouttes sur 1cm ² secteur sud (μl)
Température: 8°C Humidité: 78 % Pression: 1011 mb Vent: 5 km/h, SO	1	60	289	5,2	256	4,2
Température: 8°C Humidité: 84 % Pression: 1011 mb Vent: 5 km/h, O	2	120	256	10,4	240	10,2
Température: 8°C Humidité: 86 % Pression: 1012 mb Vent: 3 km/h, O	3	180	225	14,5	225	14,9
Température: 8°C Humidité: 86 % Pression: 1010 mb Vent: 00 km/h	4	240	169	18,2	169	18,6
Température: 8°C Humidité: 88 % Pression: 1010 mb Vent: 3 km/h, O	5	300	100	21,1	100	21,7
Température: 3°C Humidité: 96 % Pression: 1006 mb Vent: 3 km/h, O	6	360	90	23,7	90	23,9
Température: 00°C Humidité: 96 % Pression: 1006 mb Vent: 8 km/h, O	7	420	80	24,1	80	24,3
Température: 5°C Humidité: 94 % Pression: 1006 mb Vent: 8 km/h, O	8	480	70	24,4	70	24,6

Tableau 4. 4 : Résultats de toutes les mesures effectuées lors des essais sous la rosée de la nuit du 12/04/2016 jusqu'au matin du 13/06/2016

Sur la figure 4. 11, nous remarquons que les deux courbes sont presque identiques. Cela est dû aux conditions climatiques très stables d'où la rosée se précipite sur les surfaces de nos échantillons d'une manière continue et non perturbée Par exemple entre l'échantillon 1 et 2, il

Il y a une légère différence sur les courbes de volumes, cela est expliqué par le vent de (8 km/h, SO), qui fait un peu sécher la partie sud de l'isolateur, d'où on conclut qu'un vent même faible peut nuire au dépôt de la rosée sur un isolateur en silicone. Sinon les deux courbes sont en augmentation exponentielle de volumes de gouttes en fonction du temps d'exposition jusqu'à la 360ème minute (6 h d'exposition). Il est à souligner la saturation des deux courbes à la valeur de 24 μl au bout de 360 min.

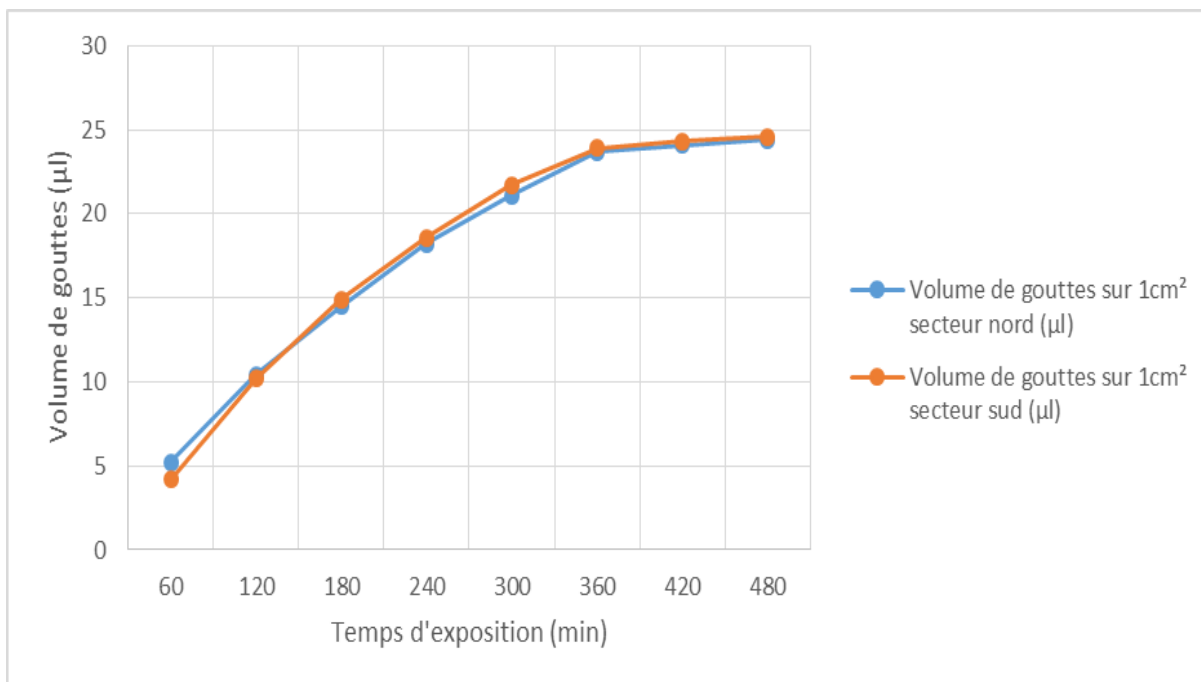


Fig. 4. 11 : Courbes de volumes des gouttes de condensation naturelle sur 1cm² aux secteurs nord et sud des isolateurs en fonction du temps d'exposition

Quant au nombre de gouttes en fonction du temps d'exposition, il évolue d'une manière inverse par rapport au volume. Cela est dû aux coalescences des gouttes quand elles prennent du volume illustré en figure 4. 12, et précisé en 2. 3. 2. Cette même figure nous renseigne que le nombre de gouttes est légèrement inférieur sur les secteurs sud par rapport aux secteurs nord, ce qui est explicable par le même paramètre (vent S, O) qui perturbe le dépôt des gouttes de la précipitation douce (rosée).

De plus, il est à remarquer là aussi la saturation concernant le nombre de gouttes déposées sur les surfaces des deux secteurs à partir de 360 minutes d'exposition.

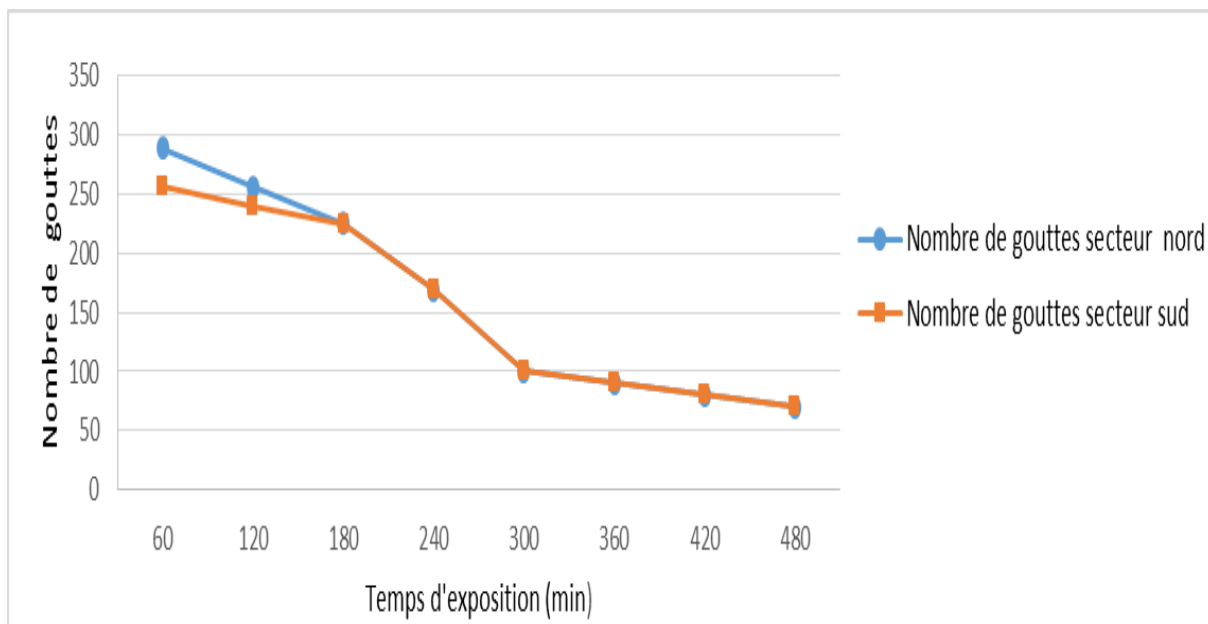
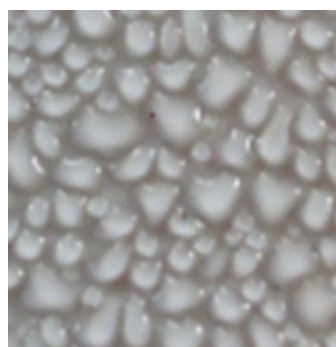


Fig. 4. 12 : Nombre de gouttes en fonction du temps d’exposition de 8 isolateurs à trois ailettes sous la rosée

Sur la figure 4. 13. a, nous voyons clairement que la zone humide est beaucoup plus importante que celle sur la figure 4. 13. b. Après calcul, nous avons trouvé qu’elle est de presque 64 %, c’est-à-dire plus élevée que celle mentionnée en II. 2. 15. À ce moment d’exposition, l’isolateur voit sa longueur de fuite se rétrécir de plus de la moitié, ce qui nous laisse conclure que cette période d’exposition est la plus susceptible de donner un contournement sur la ligne de fuite de l’isolateur.



a) 1cm² au secteur nord de l’isolateur après une heure d’exposition



b) 1cm² au secteur nord de l’isolateur après 8 heures d’exposition

Fig. 4. 13 : Gouttes d’eau de rosée sur deux surfaces de 1cm² aux secteurs nord de deux isolateurs

4. 5. 2. 2 Résultats et mesures sous la condensation du 28 au 29/03/2016

Le tableau 4. 5 contient les résultats et mesures effectués sur six isolateurs à trois ailettes sous la rosée à partir de 21 h jusqu'à 6 h du matin.

Conditions atmosphériques	Echantillon	Temps d'exposition (min)	Nombre de gouttes secteur nord	Volume de gouttes sur 1cm ² secteur nord (μl)	Nombre de gouttes secteur sud	Volume de gouttes sur 1cm ² secteur sud (μl)
Température: 11°C Humidité: 88 % Pression: 1010 mb Vent: 8 km/h, S	1	90	210	14	225	16,2
Température: 8°C Humidité: 87 % Pression: 1010 mb Vent: 10 km/h, SSO	2	180	185	19,2	196	20,48
Température: 10°C Humidité: 87 % Pression: 1010 mb Vent: 6 km/h, N	3	270	172	22,1	169	21,9
Température: 8°C Humidité: 94 % Pression: 1006 mb Vent: 6 km/h, N	4	360	135	22,4	144	23
Température: 6°C Humidité: 96 % Pression: 1006 mb Vent: 3 km/h, NNO	5	450	116	22,6	121	23,6
Température: 8°C Humidité: 100 % Pression: 1006 mb Vent: 3 km/h, NNO	6	540	84	23	90	23,8

Tableau 4. 5 : Paramètres atmosphériques et mesures sur six échantillons sous condensation naturelle

Les deux courbes de la figure 4. 14 suivent la même allure que celles de la figure 4. 11. Nous voyons que les volumes sont en augmentation exponentielle, sauf qu'ici, il y a une légère différence entre les volumes des secteurs sud et nord. Cela est dû au vent un peu élevé qui souffle sur la partie nord et qui fait sécher les gouttes. Par exemple sur le troisième échantillon, les volumes sont presque égaux, car le vent s'est calmé. Au-delà de ce moment nous observons que la courbe des volumes des gouttes au secteur sud-est supérieure à celle du secteur nord, car ici encore un vent du nord commence à s'élever et à sécher les gouttes sur les parties nord. Ainsi

nous pouvons remarquer que la courbe des volumes de gouttes de condensation est en augmentation partielle jusqu'à l'arrivée à la saturation de valeur supérieure ou égale à 20 μl au bout de 360 minutes d'exposition cette série de mesure confirme la tendance à la saturation trouvée durant la première série de mesure sous la rosée.

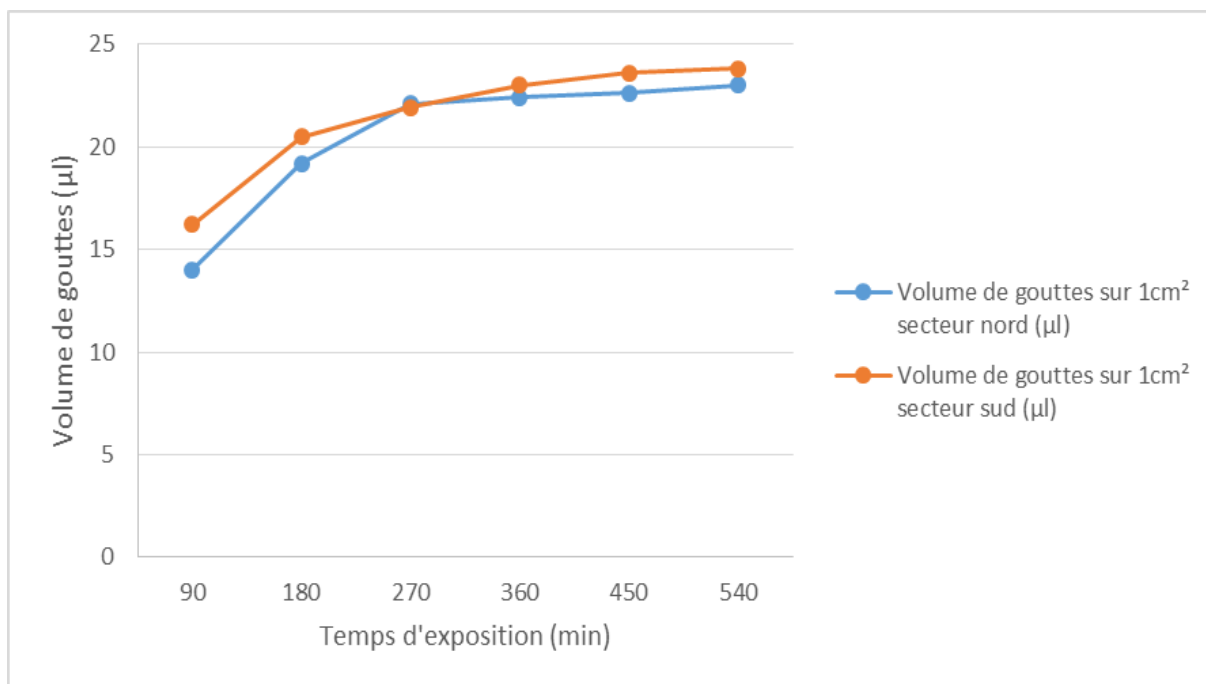


Fig. 4. 14 : Volumes des gouttes sur des secteurs de 1cm² nord et sud des échantillons en fonction du temps de leur exposition

La figure 4.15 confirme la même information illustrée par la figure 4. 12. Le nombre de gouttes diminue en fonction du temps d'exposition, nous observons que le nombre de gouttes est toujours important dans les premières heures d'exposition (22 h du soir, tableau 4.4 et 22 h 30min tableau 4.5). Après cette valeur maximale de nombre de gouttes enregistre une chute importante sur les deux courbes en figure 4. 15.

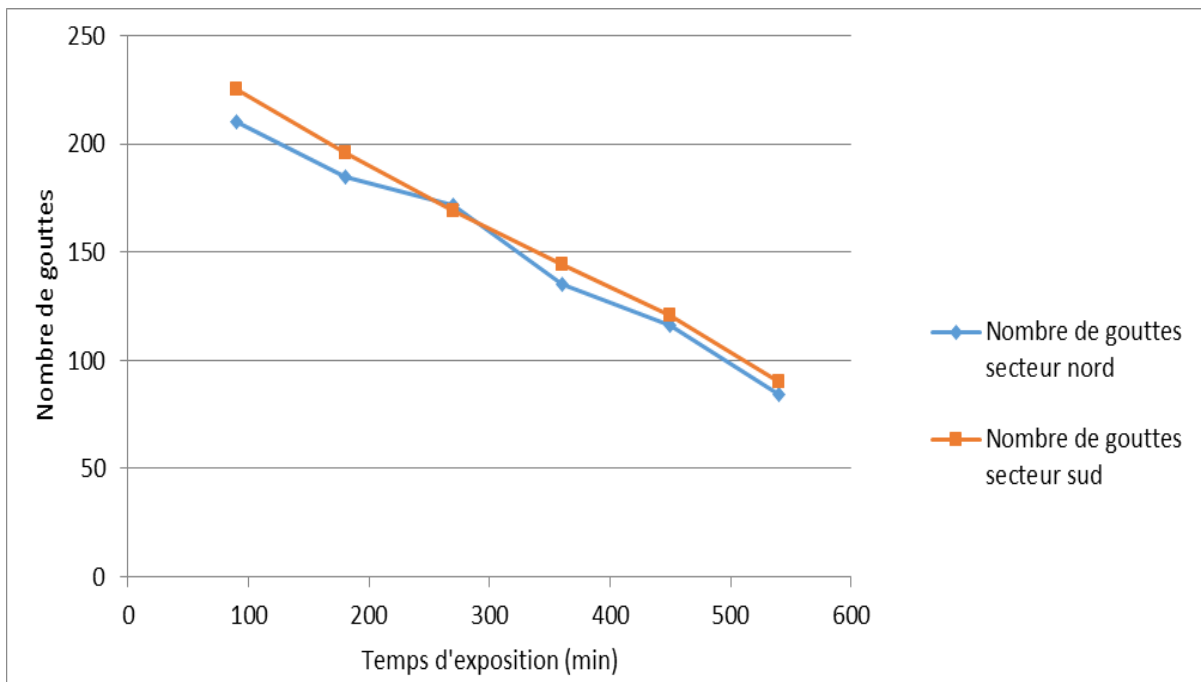


Fig. 4. 15 : Nombres de gouttes sur chaque surface des isolateurs en fonction du temps d’exposition



a) Vue partielle d’un isolateur à trois ailettes (tronc et ailette du milieu)



b) Surface de 1cm² au secteur nord de l’ailette du haut après 90 minutes d’exposition

Fig. 4. 16 : Isolateur à trois ailettes sous la condensation naturelle prélevé après 90 minutes d’exposition

La figure 4. 16. b montre la surface la plus humide que nous avons mesurée, elle vaut 68 %, cette constellation de gouttes est pratiquement la même sur toute la surface de l’ailette du

haut et celle d'en bas illustrées sur la figure 4. 16. a. Nous voyons sur cette dernière que le tronc et l'ailette du milieu ne sont pas touchés par les gouttes. Cela est dû à leur positionnement sous l'ailette du haut qui les couvre. De plus, la figure 4. 16. b nous renseigne que des gouttes minuscules à faibles volumes peuvent occuper des surfaces importantes sur un isolateur en silicone.

4. 5. 2. 3 Résultats et mesures sous la condensation naturelle de la nuit du 19/02/2016 au matin du 20/02/2016

Conditions atmosphériques	Echantillon	Temps d'exposition (min)	Nombre de gouttes secteur nord	Volume de gouttes sur 1cm ² secteur nord (μl)	Nombre de gouttes secteur sud	Volume de gouttes sur 1cm ² secteur sud (μl)
Température: 10°C Humidité: 80 % Pression: 1012 mb Vent: 5 km/h, S	1	60	361	4,1	358	4,2
Température: 8°C Humidité: 84 % Pression: 1010 mb Vent: 7 km/h, OS	2	120	324	8,3	326	7,7
Température: 8°C Humidité: 86 % Pression: 1012 mb Vent: 7 km/h, NO	3	180	289	10,9	280	10,1
Température: 8°C Humidité: 86 % Pression: 1012 mb Vent: 00 km/h	4	240	256	15,4	259	14,9
Température: 9°C Humidité: 90 % Pression: 1010 mb Vent: 3 km/h, N	5	300	196	17,6	192	18
Température: 9°C Humidité: 92 % Pression: 1006 mb Vent: 6 km/h, N	6	360	169	18,1	178	18,8
Température: 10°C Humidité: 96 % Pression: 1008 mb Vent: 8 km/h, N	7	420	144	19,1	146	19,5
Température: 8°C Humidité: 96 % Pression: 10011 mb Vent: 10 km/h, N	8	480	133	19,5	121	19,8

Tableau 4. 6 : Résultats de mesures effectués sous la rosée du 19 au 20/02/2016

Le tableau 4. 6 contiens les mesures effectuées sur des surfaces de 1cm^2 aux secteurs nord et sud de 8 isolateurs à trois ailettes sous condensation naturelle, ainsi que les valeurs des facteurs climatiques.

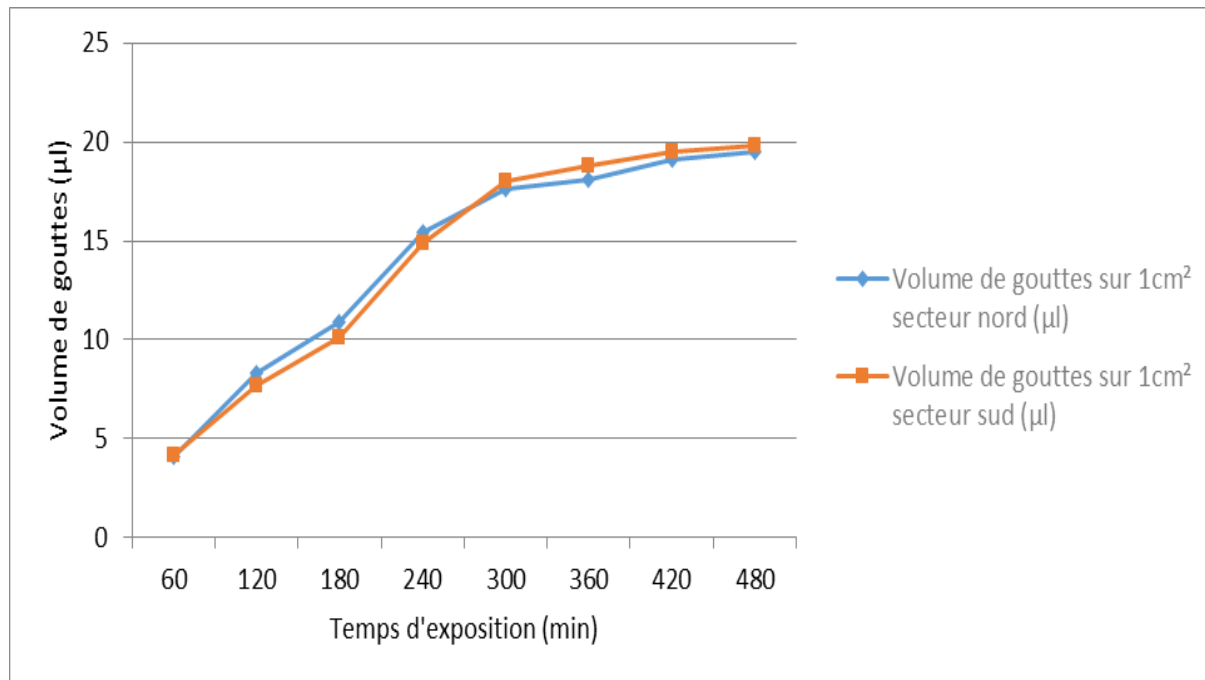


Fig. 4. 17 : Volume de gouttes d'eau sur 1cm^2 aux secteurs nord et sud des ailettes du haut exposé à la rosée en fonction du temps de leur exposition

Les courbes des volumes de gouttes mesurés sur les secteurs sud et nord des surfaces isolatrices en fonction de leur temps d'exposition sous condensation naturelle sont illustrées sur la figure 4. 17, nous constatons dans ce cas de figure que les volumes commencent à se saturer à partir de $20\ \mu\text{l}$. Enfin, il est à souligner dans ce dernier travail sous condensation naturelle que le volume maximal de gouttes d'eau de rosée sur une surface d'un isolateur en silicone est d'environ $25\ \mu\text{l}$.

Après calculs sur la figure 4. 18, nous trouvons 59 % de zone humide sur $1\ \text{cm}^2$ recouvert de gouttes après une exposition d'une heure sous la condensation naturelle (22 h du soir), il est à remarquer d'après ces travaux sous condensation naturelle que la zone la plus humide occupe des surfaces importantes aux mêmes moments précis de la soirée de la soirée, où la zone sèche de la longueur de fuite soit la plus rétrécie. Il en découle de cette remarque que les moments les plus susceptibles de donner un contournement par arc électrique sur un isolateur en silicone installer dans des sites où le phénomène de rosée est fréquent, sont les moments tard de la soirée (voire 22 h à minuit).



Fig. 4. 18 : Gouttes d'eau sur 1 cm² au secteur nord d'une surface prélevée après une heure d'exposition sous la condensation naturelle

4. 5. 3 Résultats et mesures de la simulation de la condensation artificielle à l'aide d'un réfrigérateur

Le tableau 4. 7 résume les résultats issus d'une exposition de 7 échantillons au phénomène de condensation artificielle sous réfrigération. Un temps de repos de 3 minutes est nécessaire pour la formation des gouttes sur les isolateurs. Dans ce cas d'essai, les conditions de mesure sont pratiquement similaires à celles effectuées sous phénomène de condensation naturelle.

Echantillon	Temps d'exposition dans le frigidaire (min)	Temps de repos hors frigidaire (min)	Nombre de gouttes	Volume de gouttes sur 1cm ² secteur nord (μl)	Volume de gouttes sur 1cm ² secteur sud (μl)
1	60	3	144	10,9	10,8
2	70	3	110	12,7	12,7
3	80	3	105	14,8	14,9
4	90	3	90	15,9	15,5
5	100	3	81	16,8	16,8
6	110	3	64	20,2	19,5
7	120	3	56	24,1	24,1

Tableau 4. 7 : Mesures effectuées le 18/05/2016 sur sept isolateurs exposés dans un frigidaire à 10°C puis mit durant 3 minutes de repos dans une chambre chauffée à 35°C

La figure 4. 19 donne l'allure du nombre et du volume de gouttes d'eau recueillies sur une surface de 1 cm² aux secteurs nord et sud des 7 échantillons d'isolateurs en silicone en fonction du temps de leur exposition à une condensation artificielle sous réfrigération sous une

température de 10°C. Il en résulte que pour une telle période d'exposition, la caractéristique correspondant au nombre de gouttes d'eau est strictement décroissante et celles relatives au volume des gouttes sont strictement croissantes et parfaitement confondues du fait de l'absence de vent et de la constance de la température et l'humidité à l'intérieur de l'enceinte utilisée. Il est à souligner que le volume recueilli au bout de 2 heures sous condensation artificielle est pratiquement identique à celui obtenu sous condensation naturelle, mais durant un temps plus long.

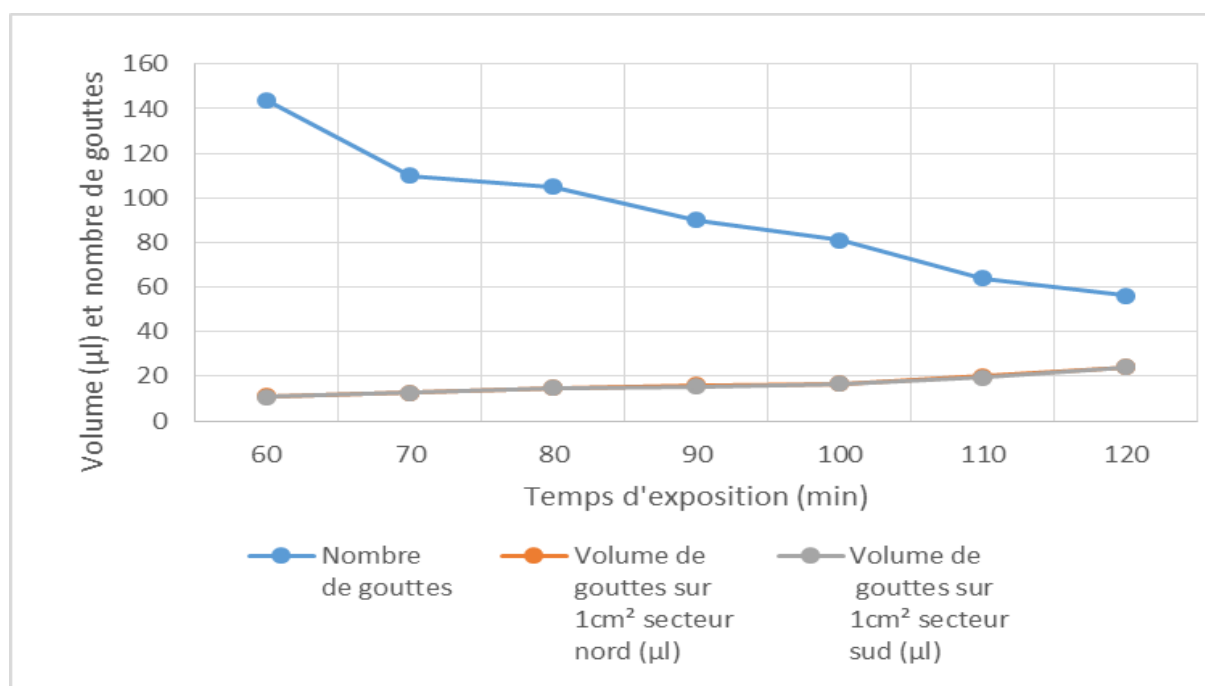


Figure 4. 19 : Evolution du volume des gouttes d'eau sur une surface de 1 cm² secteurs nord et sud des isolateurs en fonction du temps de leur exposition dans le frigidaire

La figure 4. 20. a, est celle correspondant à une surface de 1cm² prise sur la surface du dessus d'un isolateur prélevé après une heure d'exposition. Le nombre de gouttes formé est important à ce moment-là. Il résulte du comptage des gouttes d'eau sur Paint une taille de la zone humide de l'ordre de 30.5 % de celle de l'échantillon considéré. Celle-ci est beaucoup plus faible que celle obtenue lors de la rosée. Cela est dû au changement brusque des paramètres humidité (36 %) et température (35°C) lors de la mise des échantillons dans la chambre de repos.

La figure 4. 20. b nous donne le même renseignement que la rosée, c'est-à-dire le plus grand nombre de gouttes sur la surface hydrophobe pourrait être atteint durant la première heure

d'exposition. Au-delà les gouttes d'eau s'amointrissent en nombre et augmentent en volume comme est montré sur la figure 4. 19.

Le phénomène le plus frappant lors des essais sous réfrigération est illustré par la figure 4. 20. c. Contrairement aux nombreux travaux sous la pluie et la condensation naturelle nous n'avons jamais vu un tel mouillage des isolateurs. Le tronc et l'ailette du milieu sont totalement recouverts de gouttes. Cela est explicable par le grand taux d'humidité relative dans le frigidaire, 100 % durant toute la période d'exposition des isolateurs, d'où la vapeur d'eau se condensant sur toutes les surfaces de notre échantillon, en absence de vent dans l'enceinte.

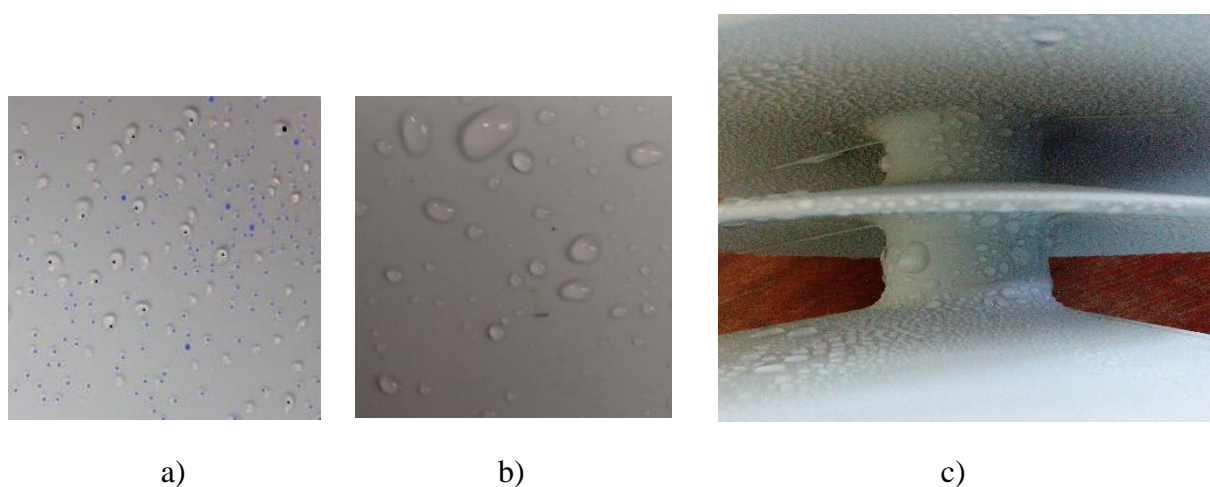


Fig. 4. 20 : Gouttes d'eau sous condensation artificielle, a : Gouttes sur 1cm² de la surface du dessus d'ailette d'un isolateur après une heure d'exposition, b : Gouttes sur une surface d'un isolateur prélevé après deux heures d'exposition, c : Gouttes sur le tronc et le dessous des ailettes d'un échantillon prélevé après une heure d'exposition

4. 6 Conclusion

Cette étude nous a permis de quantifier expérimentalement la capacité des phénomènes de précipitations liquides de mouiller des surfaces hydrophobes en l'occurrence les isolateurs en silicone hors tension, ainsi que les répartitions des gouttes d'eau et les moments de leur forte intensité sur les échantillons.

De plus une comparaison peut être effectuée entre les deux types de précipitations (pluie et rosée) dans cette étude. Nous avons examiné la variation des volumes et nombre des gouttes d'eau sur différentes parties de nos échantillons en fonction du temps de leur exposition à la nature et sous réfrigération comme moyen de simulation du phénomène de condensation.

A la lumière des résultats des essais réalisés nous avons pu tirer les conclusions suivantes :

- Dans le pire des cas, la condensation couvre environ de 68 % de la surface sur l'ailette du haut de l'isolateur
- Sous condensation naturelle le volume maximal de gouttes d'eau sur une surface d'un isolateur en silicone atteint un maximum de 26 μl .
- Sous la pluie la goutte atteint un volume de 40 à 50 μl puis elle tombe de l'ailette
- Le nombre et le volume de gouttes suivent le même principe sous la rosée et la condensation sous réfrigération.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est la caractérisation de la constellation des gouttes d'eau formées dans le temps sur une surface en silicone hydrophobe hors tension sous les phénomènes de pluie et de condensation ou rosée.

Comme paramètres d'influence des deux phénomènes suscités seront pris en considération la température, le taux d'humidité, la pression, la vitesse et le sens du vent.

Les résultats de cette étude expérimentale ont été résumés comme suit :

- La rosée et la pluie sont des phénomènes aléatoires
- Elles peuvent affecter la fiabilité des réseaux électriques en l'occurrence la performance des isolateurs haute tension par le biais des petites gouttelettes qui couvrent et humidifient toute sa surface.
- Dans le pire des cas, la condensation couvre environ de 68% de la surface sur l'ailette du haut de l'isolateur
- Pendant les premières heures d'exposition sous la rosée le nombre de goutte soit de presque 300 gouttes puis il diminue jusqu'à environ 50 gouttes à la fin de l'exposition
- Sous condensation naturelle le volume maximal de gouttes d'eau sur une surface d'un isolateur en silicone atteint un maximum de 26 μl .
- Le nombre de gouttes d'eau de rosée sur une surface hydrophobe diminue d'une manière linéaire puis se sature en fonction du temps d'exposition
- Sous la pluie la goutte atteint un volume de 40 à 50 μl puis elle tombe
- La condensation sous réfrigération mouille complètement l'isolateur grâce au taux d'humidité relative élevé régnant à l'intérieur de celui-ci

- Après 2 heures d'exposition sous réfrigérateur le nombre de goutte est de 144 et leur volume maximal vaut $24\mu\text{l}$

D'après ces conclusions, il est recommandé de ne pas mettre sous tension une ligne de transport d'énergie électrique pendant les moments de fortes précipitations telles que la pluie et la condensation naturelle. Cependant, il est préférable de sécher les isolateurs en silicone avant de mettre ligne à vide sous tension, pour ne pas avoir de court-circuit, et des dégâts matériels susceptible d'être causée par cette manœuvre.

Enfin, nous recommandons l'enrichissement de cette étude. Nous suggérons l'emploi d'autres isolateurs en silicone plus ou moins hydrophobes sur des sites où les précipitations sont plus intenses.

- [1] **H. Masson**. "La rosée et les possibilités de son utilisation". Instit des hautes études de Dakar, pp. 6-8, 1952.
- [2] **H. Masson**, "la mesure de la rosée", colloque organisé conjointement par l'Unesco et le gouvernement de l'Australie sur la climatologie et plus spécialement sur la micro climatologie de la zone aride, pp. 310-314, 1956.
- [3] **CluseOwen**, "condenseurs radiatifs de la vapeur d'eau atmosphérique (rosée) comme source alternative d'eau douce". Université de corse pasquale paoli faculté des sciences et techniques, pp.22- 23, 2007.
- [4] **I. Lekouch**, "production d'eau potable par condensation passive de l'humidité atmosphérique (rosée) ", thèse doctorat en cotutelle l'université pierre et marie curie et l'université ibnou zohr d'Agadir, pp. 48-49-192, 2010.
- [5] **T. Braunsberger, A. Dziubek, M. Kurrat**, "Les enquêtes sur l'hydrophobie de diminution des surfaces en silicone par des décharges partielles à des gouttelettes d'eau des couches de change," ETG Technical Report 99,2005.
- [6] **H. Zhang, R. Hackam**. «Surface resistance and hydrophobicity of HTV silicone rubber in the presence of salt-fog". IEEE. pp. 356-357-359, 1998.
- [7] **W. Bretuj, J. Fleszynski, A. Tyman, K. Wiczorek**. "Effect of silicone rubber insulators profiles on their ageing performance in rain conditions". University of Ljubljana, Elektroinštitut Milan Vidmar, Ljubljana, Slovenia, August 27-31, 2007.
- [8] **C. Li, L. Zhao, J. Xiong, S. Zhang, J. Yao**. " Influence of Seasons on Hydrophobicity of Silicone Rubber Insulators in Semi-Wet Warm-temperature Zone of China". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 15, pp-1083, No. 4; August 2008.
- [9] **J. BICO**, "surfaces texturées, bigouttes, poreux ", thèse de doctorat, université de Paris VI, pp. 27, 2000.
- [10] **E. Reyssat** "Gouttes, films et jets" : quand les écoulements modelent les interfaces. Dynamique des Fluides [physics.u-dyn]". Université Paris-Diderot - Paris VII, pp. 22, 2007.
- [11] **O. Fujii, K. Honsali, Y. Mizuno, K. Naito**. "A basic study on the effect of voltage stress on a water droplet on a silicone rubber surface". IEEE. pp. 117, 2009.

- [12] **S. Moumouni**. "Analyse des distributions granulométriques des pluies au Bénin : caractéristiques globales, variabilité et application à la mesure radar". Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement, pp. 8, 2007.
- [13] **Chantal Badre**. "Etude de la réactivité de surface par mesure d'angle de contact influence de la fonctionnalisation et de la structure. Applications aux films d'oxyde de zinc électrodeposés". Chemical Sciences. Chimie Paris Tech, pp.8-9, 2007.
- [14] **C. Lagoute, E. Cancellara**, "travail sur les propriétés mécaniques de la pluie". [lycée Bellevue], Toulouse, 2011.
- [15] **D. Flura** "Détermination de la durée de présence de rosée en fonction de la proximité d'une haie", Le Cahier des Techniques de l'Inra, pp. 146-153, 2008
- [16] **E. Walle** "Comment se forment la rosée du matin l'humidité qui retombe le soir ? ", Fondation la main à la pâte, 2001.
- [17] **J. Matricon** "Comment se forment la rosée du matin l'humidité qui retombe le soir ? ", Fondation la main à la pâte, 2001.
- [18] **J. Jamin** "Compléments à la théorie de la rosée", HAL, pp.42, 1879.
- [19] **W. C. WELLS** "An essay on dew", edited by Casella, London, pp.6-9, 1841.
- [20] **R. Vittone** "Bâtir", Manuel de la construction, PPUR Presses polytechniques, 2010
- [21] **A. D. Herde** "La condensation de surface", Architecture et Climat, chapitre 5, 1992
- [22] **N. A. Critikos** "Le phénomène de la Rosée: Méthode pour étudier son mode de formation", Annales de l'Observatoire national d'Athènes, vol. 10, pp.54-56, 1928
- [23] **C. D. Hendricks, R. G. Semonin** "INVESTIGATION OF WATER DROPLET COALESCENCE", Charged Particle Research Laboratory, Department of Electrical Engineering University of Illinois Urbana, pp. iv, 1963
- [24] **B. Bonnel** "Tension superficielle et capillarité", Physique à Main Levée, Chapitre V, 2006.

- [25] **meteocentre.com** “LA FORMATION DES NUAGES”, consulté le 13/06/2016
- [26] **World Meteorological Organization**, “clouds”, INTERNATIONAL CLOUD ATLAS Volume II, 1987
- [27] **M. André, H. Christophe** “hydrologie”, presses polytechniques et universitaires Romandes, pp. 116, 1988
- [28] **M. Lazri**, “analyse des variations spatio-temporelles des précipitations par télédétection active et passive”, thèse de doctorat, génie électrique et d’informatique, université MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2010.
- [29] **Meteofrance.com** “comprendre la meteo”, 2009.
- [30] **A. Vandepontseele** “les types de précipitations”, Météonature.com, 2013.
- [31] **H. Amachnoug** “ les précipitations, chapitre3”, amachnoug-hamid.e-monsite.com, 2009.
- [32] **Organisation météorologique mondiale**, “Averse de pluie”, consulté le 3 avril 2015.
- [33] **V. Felten** “Effets de l’acidification des ruisseaux vosgiens sur la biologie”, l’écologie et l’écophysiologie, 2003.
- [34] **E. Christian** “les précipitations“, meteo.org, 1993, 94, 95, 2002.
- [35] **document science& vie** “ A QUOI TIENT LA GROSSEUR D’UNE GOUTTE DE PLUIE ?”, 2014
- [36] **C. Clanet, C. B. Eguin, D. Richard, D. Quéré** “Maximal deformation of an impacting drop”, Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre, 2004
- [37] **D. Quéré, M. Reyssat** “ l’effet lotus”, pour la science.fr, pp. 35, 2006
- [38] **P. Dunand** “Etude de l’impact de goutte sur une paroi chaude en régime de Leidenfrost”, thèse doctorat, mécanique et énergétique, université de Lorraine, 2012.
- [39] **S. Dupuy** “ANGLE DE CONTACT“, Document technique Angle de Contact, vol. 1, pp. 4, 2013.

[40] **Y. L'hôte** “ mesure et étude des précipitations en hydrologie”, université de Montpellier II, génie hydro sanitaire et aquacole, 1993.

[41] **R. Hamdi** “ la pluie”, www.almira-project.org, 3 mars 2015.

[42] **R. Sarrazin, I. Zawadzki** “Un spectromètre de gouttes de pluie pour l'analyse chimique de la précipitation", Université du Québec à Montréal, Canada, 1981.

[43] **Le Centre d'information sur l'eau** “Le cycle naturel de l'eau”, 7 août 2013.

[44] www.biomimesis.fr, consulté le 25/05/2016.