

Quand Zeus pleure



C'est le coup de foudre



Pour les Olympiades

Ou...

*Quelle est la relation entre
l'humidité du milieu et la tension
d'amorçage de l'éclair ?*

DOSSIER PRÉSENTÉ PAR :

SIMON BARNY,

LOÏC BRONNEC ET

GRÉGORY BOURGEY

ÉLÈVES DE TERMINALE S1 DU LYCÉE

ÉLIE CARTAN DE LA TOUR DU PIN

SOMMAIRE

<u>Introduction</u>	4
I. <u>Notre démarche</u>	4
1. <u>Notre recherche d'informations</u>	5
2. Etude d'un système modélisant l'éclair.....	5
a. <i>La machine de Wimshurst</i>	5
b. <i>Le condensateur</i>	6
II. <u>Formation théorique d'un éclair</u>	6
1. <u>Les éléments propices à la formation d'un éclair</u>	6
a. <i>La structure électrostatique du sol et de l'atmosphère par beau temps</i>	6
b. <i>La structure électrostatique du cumulonimbus</i>	8
c. <i>Variation du champ électrique terrestre à l'approche d'un cumulonimbus</i>	9
2. <u>Le coup de foudre : une association de phénomènes électrostatiques</u>	9
III. <u>Expérience</u>	10
1. Présentation de l'expérience.....	10
2. <u>Interprétation des résultats</u>	13
<u>Conclusion</u>	15
<u>Quelques applications</u>	16
<u>Annexes</u>	17
1. <u>Expériences préliminaires</u>	17
2. Correspondances.....	18
3. <u>Bibliographie</u>	19
4. <u>Protocole de sécurité</u>	19
<u>Lexique</u>	20

assurent la majeure partie des pluies de notre planète, l'un de nous proposa d'étudier la relation entre la formation de l'éclair et l'humidité du milieu.

Pour avancer dans notre travail le plus efficacement possible nous l'avons organisé de la façon suivante :

- **prise d'informations sur l'éclair et sa formation**
- **étude d'un ou de plusieurs systèmes pouvant modéliser l'éclair**
- **mise au point d'une expérience avec des mesures possibles.**

1. Notre recherche d'informations

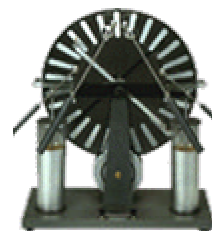
Tout d'abord, nous nous sommes rendus au C.D.I. pour nous documenter. Grâce à des sites Internet (*cf. en annexe*) et à des magazines (*cf. en annexe*), nous avons acquis certaines bases sur la formation et le fonctionnement des éclairs. Ayant besoin de plus d'informations, plus précises et plus complètes, nous avons décidé de rencontrer des scientifiques. Grégory prend alors contact avec différents chercheurs (*cf. email en annexe*). Afin de faciliter une rencontre, ceux-ci sont surtout orientés dans la région. Cela nous a permis de programmer un rendez-vous avec M. Filippini, chercheur au C.N.R.S de Grenoble (*du L.E.M.D. : Laboratoire d'électrostatique et Matériaux diélectriques*). Le déplacement fut organisé un mercredi après-midi. Nous y rencontrons aussi Mme Bonifaci, chercheur au L.E.M.D. La rencontre est très intéressante et instructive. Avant que nous partions, M. Filippini nous donna un compte-rendu d'une conférence de Serge Chauzy, scientifique travaillant sur les phénomènes électrostatiques de notre atmosphère. Ayant de plus amples connaissances sur le sujet, nous avons décidé de passer à l'aspect pratique tout en gardant contact avec M. Filippini par échanges de mails. Tout au long de nos recherches pour notre expérience, nous avons approfondi nos connaissances car quelques problèmes se sont posés (au sujet du champ d'électrique, de l'effet de pointe...). Nous avons tiré ces nouvelles informations de livres de physique et d'échanges avec nos professeurs et différents scientifiques (*cf. email en annexe*).

2. Etude d'un système modélisant l'éclair

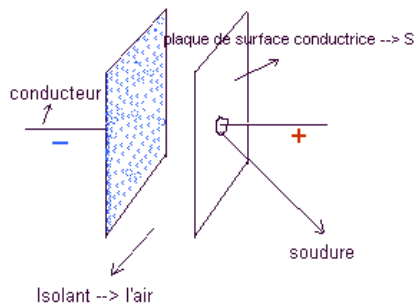
Lors de nos recherches, nous avons vite compris que l'éclair était un phénomène dû à une accumulation de charges opposées au niveau des nuages et de la terre. Cela nous a fait penser à un condensateur. Nous avons donc décidé d'étudier les condensateurs dont la machine de Wimshurst que notre professeur avait évoquée en cours. Elle était disponible immédiatement.

a. La machine de Wimshurst

L'établissement où nous sommes scolarisé en possédant une, nous l'avons étudiée avec le modèle sous les yeux. La machine est pratique et peu dangereuse ce qui est un avantage. De plus, elle crée un arc électrique relativement important. Nous avons ensuite remarqué certaines contraintes nous empêchant de l'utiliser lors de notre expérience finale : nous ne pouvons pas prendre de mesures dessus (*intensité, tension ...*) ni changer les électrodes. Cela étant, nous espérons toujours l'utiliser pour des expériences préliminaires où seule la distance des électrodes peut nous intéresser. Lorsque nous avons essayé d'humidifier le milieu, les électrodes se sont condensées ce qui a empêché la formation d'une étincelle. Nous savons aujourd'hui que cette condensation aurait pu être évitée si la machine avait été à une température supérieure d'au moins 3°C au point de rosée* ou si la température de l'eau avait été plus faible. **La machine de Wimshurst ne nous permettait donc pas d'avancer dans la pratique.**



b. Le condensateur



En parallèle de l'étude de la machine de Wimshurst, nous nous sommes intéressés aux **condensateurs traditionnels**. Ces composants qui servent à emmagasiner de l'énergie pour la redistribuer ont une certaine ressemblance avec notre atmosphère. Ils sont composés d'un diélectrique (*l'air pour l'éclair*) et de deux électrodes (*la terre et le nuage pour l'éclair*). Tout comme la machine de Wimshurst d'ailleurs.

Notre première idée était d'étudier le condensateur en tant que composant électrique. Par contre, la plupart des condensateurs, que l'on trouve dans le commerce, ont un diélectrique qui se détruit lors d'un claquage. Il nous faut donc en trouver un qui se régénère après le claquage. Notre choix a été un gaz : l'air qui est le diélectrique naturel dans lequel se

propagent les éclairs. Nous essayons alors d'en créer un avec comme générateur la machine de Wimshurst. **C'est un échec.** Loic se procure alors un condensateur avec comme source d'énergie un redresseur de 5 kV et deux électrodes modifiables. Nous le réalisons puis l'essayons. Une faible étincelle bleue surgit (*c'est l'azote, le responsable du claquage*). Sachant que la géométrie des électrodes peut modifier le champ électrique les entourant, et donc modifier la distance sur laquelle l'étincelle se forme, nous avons utilisé l'effet de pointe qui comme pour un éclair a de l'effet sur notre étincelle. Avec des électrodes pointe-plan puis pointe-pointe, nous pouvons agrandir le dipôle et par la même occasion agrandir la distance sur laquelle se produit l'arc électrique.

Le générateur utilisé a plusieurs inconvénients : **il ne nous permet ni de faire varier la tension ni de la mesurer.** Malgré cela, nous réessayons l'expérience préliminaire. Pour cela, nous disposons le condensateur sur une planche stable au-dessus d'une baignoire. Nous commençons par l'expérience témoin. Pendant 40 minutes, le générateur reste branché avec une même distance entre les électrodes, une même température et un même taux d'humidité. Il ne se passe rien. Après cela, nous augmentons le taux d'humidité grâce à la douche. Pour la même distance entre les électrodes que lors de l'expérience témoin, et la température n'évoluant presque pas, nous arrivons à créer des étincelles (*cf. résultat préliminaire en annexe*).

Nous en concluons donc que l'humidité semble être un facteur facilitant la formation d'un arc électrique et de ce fait la formation d'un éclair. Nous estimons alors nécessaire de mettre en place une expérience nous permettant des mesures précises et une étude de la relation plus approfondie.

II. Formation théorique d'un éclair

1. Les éléments propices à la formation d'un éclair

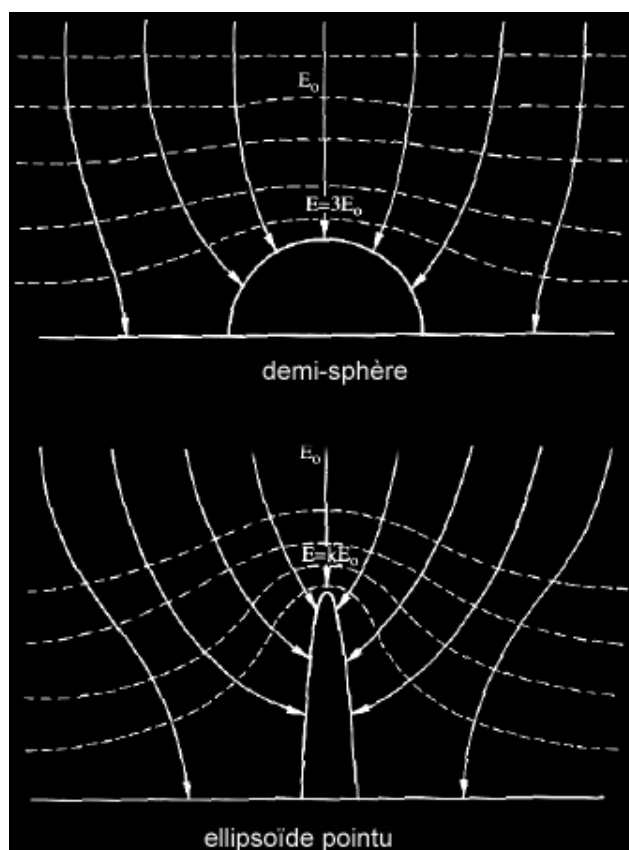
Pour qu'un éclair apparaisse dans l'atmosphère, il faut la présence de certains éléments. Ces éléments doivent former un champ électrique* et aussi le faire varier.

a. La structure électrostatique du sol et de l'atmosphère par beau temps :

Le champ électrique terrestre décroît avec l'altitude. Cela traduit l'accumulation de charges positives au sol: leur concentration augmente à son approche. A 50km d'altitude, l'air devient conducteur. Cette zone s'appelle **l'électrosphère** (*c'est la couche à la base de*

l'ionosphère). Il y a donc un champ électrique permanent dans l'air. Au niveau d'un terrain plat et par beau temps, il est de l'ordre de 100 à 150 V/m. **L'ensemble terre-ionosphère semble ainsi être un condensateur où l'atmosphère est le diélectrique.**

Pour qu'un éclair se forme, le champ électrique dans l'air doit être supérieur au champ disruptif* (*pour l'air et entre électrodes planes distantes de 1 cm avec $E = 30\text{kV/cm}$ dans les conditions normales de pression et de température*). Au niveau terrestre, certains éléments permettent l'augmentation du champ électrique. C'est notamment le cas de **l'effet de pointe***. Ainsi, à la surface du globe, les différents reliefs modifient la valeur du champ électrique (*par exemple : lorsque nous avons un ellipsoïde* avec un rapport entre le grand et le petit axe de 100, placé dans un champ uniforme, le champ électrique à l'extrémité pointue est multiplié par 2300 par rapport à celui du plan*)



(d'après <http://perso.wanadoo.fr/patrice.pezillier/tipe/tipe.htm>)

Le champ électrique au niveau d'une pointe est mesurable. Lorsque le champ électrique est de l'ordre de 30 kV/cm, il peut se former des **avalanches électroniques*** (*phénomène que nous expliquerons plus tard*) sur de petites distances. Cela crée une sorte de filament bleu violet émettant un crépitement (**un effluve**). Ce phénomène s'appelle **l'effet couronne*** ou « feux de Saint-Elme ». L'effet couronne est un phénomène dont la longueur maximale est faible (*quelques centimètres*) alors qu'un éclair est de grande taille (*plusieurs kilomètres*). Il faut donc d'autres éléments pour qu'un éclair se forme dans l'atmosphère.

b. La structure électrostatique du cumulonimbus :

Le cumulonimbus est un nuage. Sa base évolue entre 2 et 3 km du sol et occupe plusieurs dizaines de kilomètres carrés. Son sommet peut culminer jusqu'à une altitude de 14 km. Il a une masse qui est de l'ordre de centaines de milliers de tonnes d'eau. Cet énorme nuage est un **générateur électrostatique** .



Des sondages pratiqués à l'intérieur du cumulonimbus ont permis d'établir la structure électrostatique moyenne du nuage. Elle tend vers une distribution dipolaire, c'est-à-dire que les charges négatives s'accumulent à la base du nuage et les charges positives à son sommet.

Pour expliquer cette répartition des charges, les scientifiques font encore des hypothèses. Il semble que trois mécanismes jouent un rôle prépondérant dans cette séparation :

► **Les mécanismes inductifs.** Pour qu'ils se mettent en place, il faut un champ électrique élevé. Etant donné la polarité la plus probable entre les deux pôles du nuage, les grosses particules se chargent négativement et les petites positivement. La gravitation entraîne les particules lourdes négatives vers le bas laissant dans la partie supérieure du nuage les hydrométéores* (gouttes d'eau) positifs. Ces mécanismes renforcent le champ.

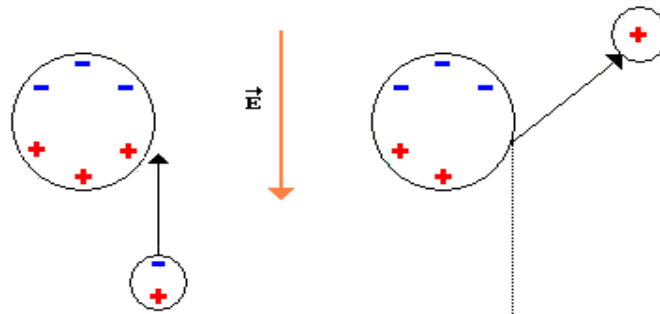


Schéma du principe du mécanisme inductif de séparation des charges électriques

► **Les mécanismes « non inductifs ».** Il s'agit de la collision entre les particules glacées. Lorsque des cristaux et des « graupels* » se rencontrent, un échange de charges électriques se produit. Cela conduit à l'établissement de trois parties dans le nuage : la région supérieure chargée positivement, la région centrale négative et la base du nuage, chargée positivement. Par contre, ce mécanisme ne peut avoir lieu tout seul. Il ne contredit donc pas l'hypothèse initiale.

► **La théorie des charges convectives** Elle est apparue après que les scientifiques aient découvert que les ordres de grandeur des charges sont trop faibles pour électriser le nuage. Cette théorie suppose donc que les charges électriques créées au sol par effet couronne pénètrent le nuage sous l'action des ascendances.

Bien que la répartition des charges dans le cumulonimbus ne soit pas définie par les scientifiques, il semble acquis que la base du nuage est chargée négativement.

c. Variation du champ électrique terrestre à l'approche d'un cumulonimbus

Lorsqu'un cumulonimbus est énormément chargé, il forme des champs électriques entre ses différentes couches (*cf. b.*) mais aussi entre sa base négative et le sol positif. A l'approche du nuage, ses charges négatives inversent le champ électrique. Ce dernier va ensuite augmenter dans de fortes proportions. **Ces variations du champ électrique sont les signes de la chute imminente de la foudre.**

2. Le coup de foudre : une association de phénomènes électrostatiques

Le coup de foudre est un phénomène très court. Il dure entre 0.2 et 2 secondes. Pourtant il est la **conséquence de plusieurs phénomènes électrostatiques**.

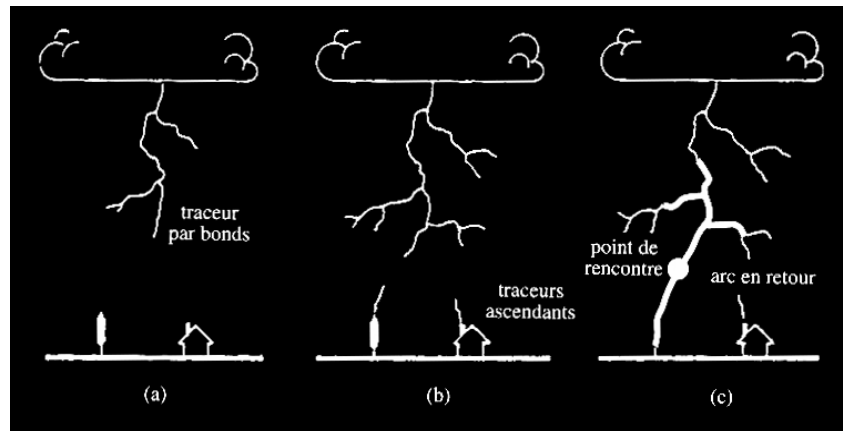
A l'origine d'un éclair, il faut plusieurs éléments : un champ électrique important et des électrons libres. Les éléments vus précédemment expliquent l'augmentation du champ électrique jusqu'à la formation d'un plasma*. C'est-à-dire jusqu'à ce que l'air soit tellement ionisé qu'il devienne conducteur. Les électrons libres sont séparés de leurs atomes initiaux par des phénomènes naturels comme la **radioactivité*** ou les **rayons cosmiques***.

Une fois libre, l'électron est soumis au champ électrique. Il va accélérer et acquérir de l'énergie cinétique. Très vite, il entre en collision avec un atome neutre. Si l'énergie de l'électron libre se situe entre 10 et 16 eV*, il peut ioniser un atome en libérant un nouvel électron. Celui-ci, par le même principe va entraîner la création d'un autre électron libre. Ce phénomène prend alors l'allure d'une avalanche : c'est **l'avalanche électronique**.

Dès qu'il y a une charge électronique suffisante, il peut se former un **streamer***. La taille de celui-ci se limite à une dizaine de centimètres car le streamer progresse dans un champ à peine supérieur à 26 kV/cm. Le champ électrique diminuant en s'éloignant du nuage (*ou du sol*), cette limite est vite atteinte. L'amplification du phénomène, à plus grande distance, crée alors un **traceur**, transformation supposée se faire par l'augmentation de la température. Celui-ci accroît la conductivité du canal. Le traceur constitue une faible décharge qui se comporte comme une pointe métallique. Il est au potentiel du nuage. Ainsi, à la tête du traceur, une avalanche suivie d'un streamer peut se développer permettant au traceur de progresser. Mais à mesure que l'on s'éloigne de la pointe, le champ électrique décroît. Quand il devient inférieur à 26 kV/cm, l'avalanche s'arrête et le traceur s'immobilise. Les charges du traceur vont migrer sous l'effet du champ électrique et se comporter comme un véritable prolongement de la pointe. Une nouvelle avalanche peut alors se développer à son extrémité. Le phénomène se transporte rapidement vers l'avant, comme un dard : on parle **d'instabilité convective d'ionisation**.

Comme le suppose la théorie des charges convectives, à l'approche du traceur descendant, une décharge ascendante se développe dans sa direction. Lorsque les deux traceurs entrent en contact, il s'établit **un court-circuit entre le nuage et le sol**.

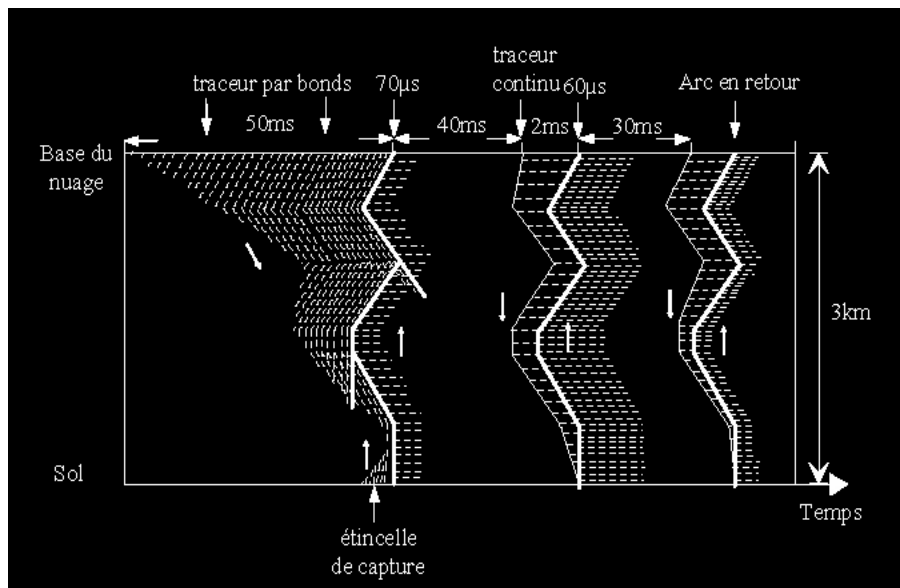
Dès lors, le canal ionisé est continu depuis le sol jusqu'au nuage. Il permet à une impulsion de courant très intense de transiter du sol vers le nuage, neutralisant les charges de ce dernier. Le débit est très important et l'intensité peut atteindre plusieurs dizaines de milliers d'ampères. Cette décharge fortement lumineuse se nomme **l'arc de retour**.



(D'après <http://perso.wanadoo.fr/patrice.pezillier/tipe/tipe.htm>)

La lumière est la conséquence des déplacements des électrons et des autres ions. L'ionisation formant le traceur excite les atomes. Pour retrouver leur état de stabilité, ils émettent des **photons**, particules à l'origine de la lumière. L'intensité du traceur étant faible, celui-ci est peu lumineux. Lors de l'arc de retour, le déplacement des particules est important. Ces dernières rentrent alors en contact avec d'autres particules et les excitent. Les molécules excitées étant plus nombreuses que lors de la formation du traceur, il est émis donc plus de photons. La lumière est alors beaucoup plus importante.

Il s'ensuit alors différents phénomènes comme une **succession de décharges de moins en moins intenses**. Elles se forment à partir du canal ionisé. Ce sont les **coups subséquents**.

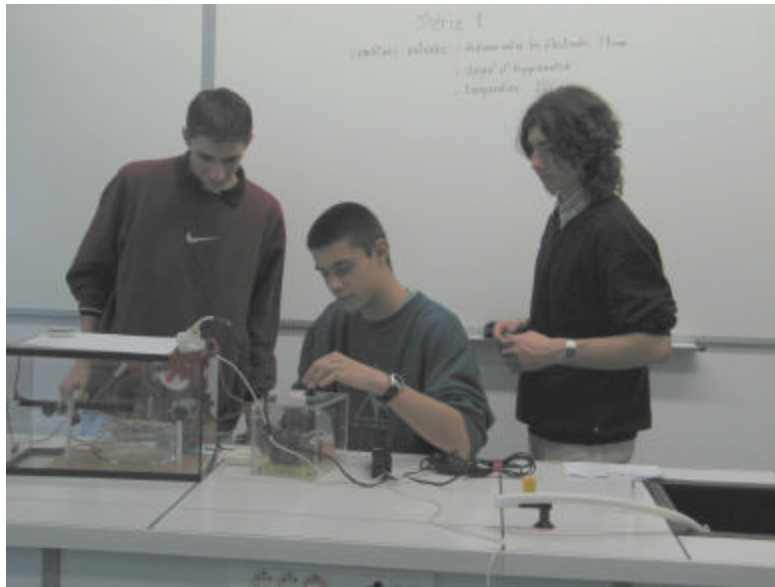


(D'après <http://perso.wanadoo.fr/patrice.pezillier/tipe/tipe.htm>)

Entre les décharges (*courant de forte intensité*), un faible courant de l'ordre de quelques centaines d'ampères s'écoule dans le canal ionisé. **C'est le courant persistant. Il écoule une partie non négligeable de la charge totale du coup de foudre.**

III. Expérience

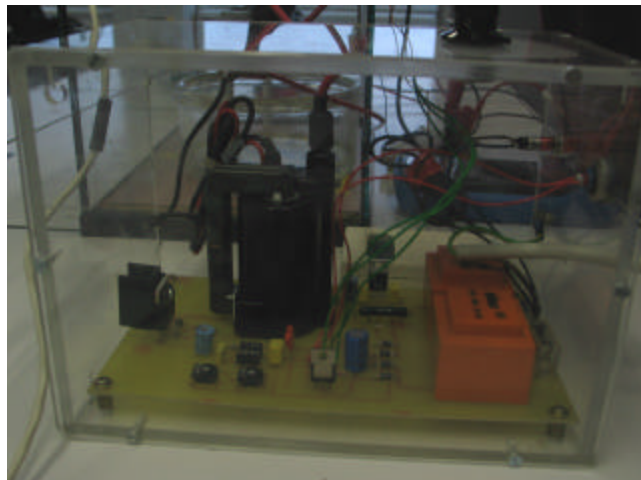
1. Présentation de l'expérience



Une fois la théorie sur les éclairs comprise, il nous faut mettre en place une expérience où les grandeurs sont mesurables. La problématique à résoudre étant **quelle est la relation entre l'humidité et la tension d'amorçage d'un éclair**, il nous faut au minimum pouvoir mesurer la tension et l'humidité. Devant connaître les conditions du milieu afin de ne faire varier que le facteur étudié (un seul facteur variant), il nous faut pouvoir les mesurer. Avec l'aide de M. Filippini et M. Lesaint, nous faisons la liste du matériel nécessaire :

- ? Un générateur
- ? Deux électrodes (pointe - plan) et leur support
- ? Un récipient fermé
- ? Un thermomètre
- ? Un hygromètre
- ? Un système humidifiant le milieu

Pour le générateur, M. Filippini proposa de nous prêter un redresseur de 30 kV. Espérant avoir un générateur le plus précis possible, nous contactons M. Durand (professeur de l'I.U.T G.E.I.I. de l'Isle d'Abeau). Il avait déjà travaillé, l'année dernière, avec des élèves du lycée dans l'optique des Olympiades de Physique. Nous nous sommes mis d'accord sur un générateur à tension réglable pouvant atteindre 30 kV. M. Durand concevant le prototype puis gravant le circuit imprimé, nous n'avons plus qu'à percer, câbler et réaliser le boîtier du montage. Nous nous rendons pour cela à l'I.U.T. les vendredis après-midi du 21 et 28 novembre 2003.



Le générateur est composé de cinq parties. Une partie de son circuit est consacrée à l'alimentation du transformateur haute tension (autrement dit T.H.T), une autre est la production de la T.H.T.. La suivante s'occupe du réglage de la T.H.T. La quatrième est consacrée à l'alimentation de l'oscillateur et la dernière à l'oscillateur. Sa conception a été un succès car avec une sonde, nous avons réussi à étalonner précisément le générateur et à graduer le bouton servant au réglage de la tension.

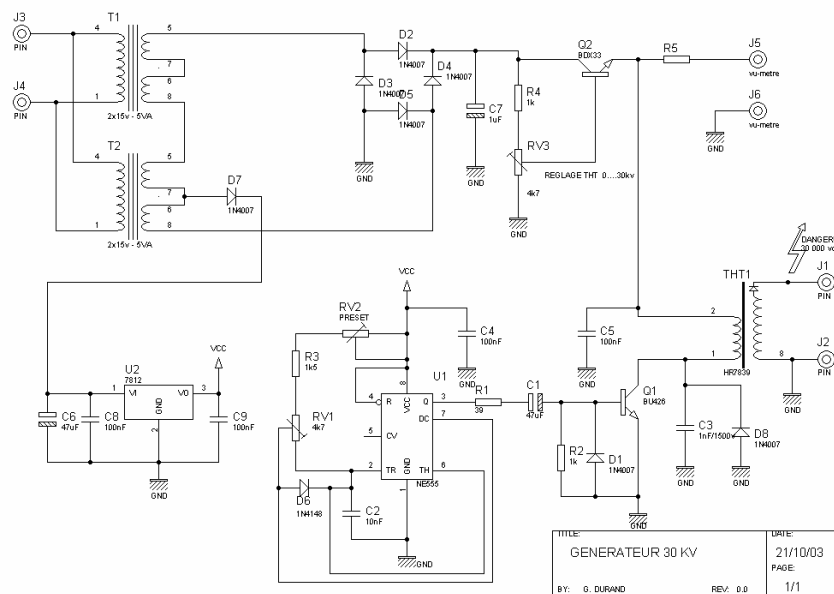


Schéma du générateur fourni par M. Durand

Après l'avoir utilisé pour nos premières séries de mesures, nous rencontrons M. Augé, chercheur au L.E.M.D. de Grenoble et professeur à l'I.U.T. de l'ISLE d'Abeau. Craignant que le réglage de la tension de notre générateur se modifie au cours du temps, il nous prête une sonde THT qui une fois reliée à un oscilloscope nous informe de la tension générée. Nous nous rendons alors compte que la tension n'est pas stable. Elle est sinusoidale et l'écart entre la tension minimale et maximale est trop important (environ 6 kV pour une tension moyenne de 15 kV) mais aussi croissante lorsque nous augmentons la tension. Cela rend nos mesures difficilement exploitables. Il nous faut alors trouver un générateur fournissant une tension stable et pouvant être mesurée. M. Filippini et Mme Bonifaci possèdent au L.E.M.D. ce genre de générateur. Malheureusement, ils sont très utilisés et ne peuvent être prêtés. Les deux chercheurs nous proposent alors de nous rendre une nouvelle fois au laboratoire afin d'y faire les expériences avec le matériel nécessaire.

Pour les électrodes, il nous faut trouver un plan et une pointe. Pour le plan, Loïc et son père en fabriquent un. Pour la pointe, une simple aiguille à tricoter a été choisie. Leur support devant être isolant, nous optons pour du plastique.

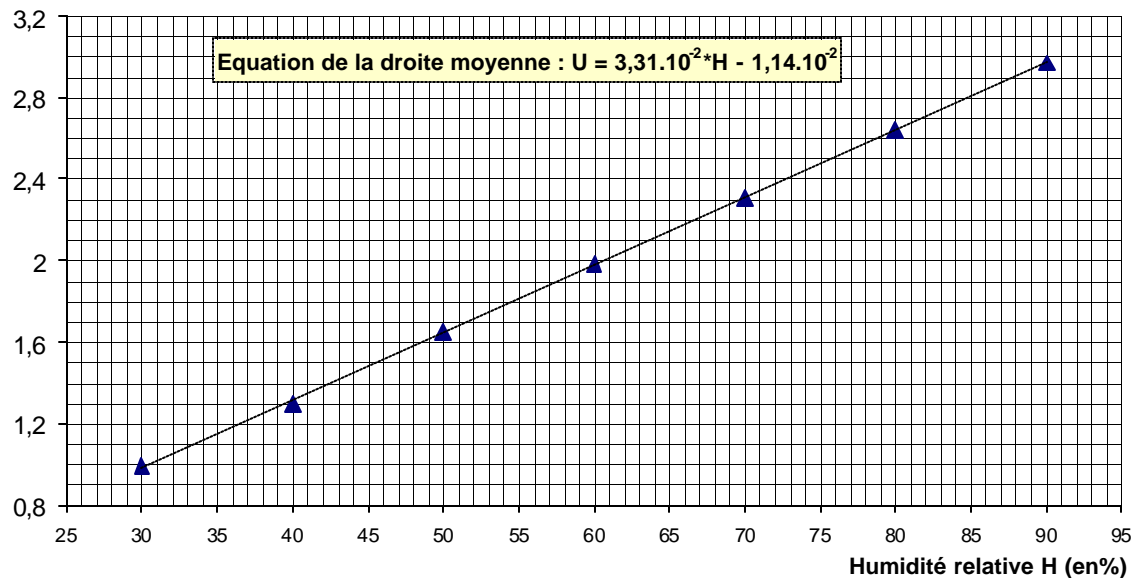
Pour le récipient fermé, Loïc fournit un aquarium auquel nous avons rajouté un couvercle en plexiglas. Cet aquarium a été choisi car il respecte une règle de sécurité importante : **l'espace entourant le milieu de l'avalanche électronique est suffisamment important pour qu'il ne se forme pas d'arc entre les électrodes et la paroi. Cette distance de sécurité est le rapport entre la tension du générateur et la tension électrique.**

Pour la mesure de la température, nous utilisons des thermomètres ou une station météo personnels.

Pour l'hygromètre, conseillé par M. Durand, nous en commandons un à Selectronic. L'hygromètre que nous utilisons est fourni avec une courbe d'étalonnage que nous avons retravaillé et que nous vous présentons ci-dessous :

Tension de sortie U
du capteur (en V)

Courbe d'etalonnage du capteur d'hygrométrie à 25°C



Le système pouvant humidifier le milieu nous pose plus de problèmes. En effet, il nous faut pouvoir faire varier l'humidité dans des proportions connues et souhaitées. En plus, il faut que ce système ne produise ni condensation des électrodes ni augmentation de la température. Nous n'utilisons donc pas un appareil à vapeur qui fournit une quantité trop importante de vapeurs chaudes. Cela entraîne la condensation des électrodes. Nous décidons alors de déposer un gant de toilette imprégné d'eau dans l'aquarium. Pour connaître les modifications que nous apportons par cette manipulation, nous mesurons la variation du taux d'humidité en fonction de la température et de la masse d'eau imprégnée dans le gant (cf. résultat en annexe) : **c'est un échec**. Cela est dû au fait que l'augmentation du taux d'humidité est soit trop lente, soit suffisante mais entraînant la condensation des électrodes.

2. Interprétation des résultats

Alors que l'expérience était prévue le jeudi 04/12/03, nous avons eu un problème avec le générateur, un transistor a lâché. Le temps de le réparer remet les expériences au vendredi 12/12/03 et au samedi 13/12/03.

Une fois le matériel installé, nous nous mettons au travail. Une première manipulation est effectuée et nous obtenons des résultats incohérents. Nous remarquons en effet, que pour une même distance entre les électrodes, un arc électrique pouvait ne pas se former avec une tension importante puis se former avec une tension moindre. Nous en déduisons que le condensateur a été chargé. Nous décidons donc de le décharger après chaque mise sous tension.

Nous reprenons des mesures et obtenons les résultats suivants :
Conditions de l'expérience : distance entre les électrodes de 26mm.

Expérience témoin : voir tableau page suivante.

Température (en °C)	Taux d'humidité (en %)	Tension d'amorçage (en kV)	Présence de décharge
24,9	30	25,5	oui
24,8	30	22 ⁺	oui
24,8	30	21 ⁻	non
24,8	30	22 ⁻	oui
24,8	30	21,5	oui

Série 1 :

Température (en °C)	Taux d'humidité (en %)	Tension d'amorçage (en kV)	Présence de décharge
25,0	35	21 ⁻	non
25,0	35	19	oui
25,0	36	20	non
25,0	36	20,5	non

Série 2 :

Température (en °C)	Taux d'humidité (en %)	Tension d'amorçage (en kV)	Présence de décharge
25,0	66	21 ⁻	oui
25,0	66	20	oui
25,0	66	19,5	non

Série 3 :

Température (en °C)	Taux d'humidité (en %)	Tension d'amorçage (en kV)	Présence de décharge
25,0	79	20	non
25,0	90	20	non

Ces séries de mesures bien que peu significatives, à cause de la température du témoin différente, nous font penser que plus l'humidité est importante, plus l'étincelle se déclenche facilement (comparaison de la série 1 et de la série 2). **Nous constatons avec la série 3 qu'à partir d'une humidité supérieure à 85% la condensation empêche le système de fonctionner.**

Nous décidons de renouveler les expériences le lendemain dans de meilleures conditions. La première série est un échec. Après avoir fait apparaître une étincelle pour une température de 25°C une humidité de 47% et une tension de 19 kV, aucun autre arc ne se forme bien que nous augmentions l'humidité. Nous espérons que ce problème vient de la déformation de la pointe en «patatoïdes». Ce phénomène peut arriver après plusieurs impacts de l'étincelle. **Nous changeons donc la pointe.** De cette série nous tirons tout de même un point positif : **nous avons réussi à conserver la température constante au moment de prendre les mesures.**

Nous recommençons alors une série de mesures dont voici les résultats.

Conditions initiales : - distance entre les électrodes : 26mm
- température : 25°C

Témoin :

Taux d'humidité (en %)	Tension d'amorçage (en kV)	Présence de décharge
52	22	oui
52	21	oui
51	20	non
51	20,5	non

Série 1 :

Taux d'humidité (en %)	Tension d'amorçage (en kV)	Présence de décharge
68	21	oui
68	20	oui
71	19	non
66	19,5	non

Avec cette série de mesure nous remarquons que pour une augmentation de l'humidité de 16 % (passage de 52% à 68%), la tension d'amorçage diminue d'un peu moins de 1 kV (passage de 21 kV à 20 kV)

Ces résultats obtenus, avec le générateur créé par M. Durand, ne pouvaient pour des raisons citées précédemment nous convenir. Nous décidons donc de recommencer l'expérience avec le matériel approprié.

Conclusion

Ce projet nous a permis d'acquérir de nombreuses connaissances sur un phénomène intéressant mais compliqué. Nous avons entrepris une recherche à laquelle il n'existe pas de solution aujourd'hui. De plus, il n'existe plus de laboratoire en France travaillant sur le coup de foudre qui aurait pu nous aider dans notre recherche.

Récemment nous avons trouvé un compte rendu, d'un ancien laboratoire étudiant les éclairs : les Renardières, concluant des recherches sur l'influence de l'humidité sur chaque étape d'un éclair. Il en ressort bien qu'elle a une influence sur les différentes séquences du coup de foudre. Mais cette influence peut faciliter l'apparition de certains phénomènes tout comme elle peut avoir l'effet inverse.

Notre recherche, tout comme l'étude citée précédemment, ne permet pas de conclure sur l'influence générale de l'humidité et de savoir si elle facilite ou non l'apparition d'un éclair. De plus, notre expérience ne modélise pas correctement le coup de foudre. L'arc électrique que nous faisons apparaître n'a pas de traceur. Il faut, en effet une distance entre les électrodes supérieure à un mètre pour faire apparaître dans l'air un arc électrique formé par un traceur.

Nous savons tout de même, grâce à notre étude théorique, que l'humidité est indispensable, au moins pour la formation du cumulonimbus et des charges.

Nous pouvons aussi dire que le rapprochement que nous faisons entre un coup de foudre et la pluie peut s'expliquer, simplement, par la présence d'un cumulonimbus.

Quelques applications

Durant nos recherches nous avons aussi découvert certaines applications à l'arc électrique :

- **la découpe au plasma (ou la soudure à l'arc)** : comme nous l'avons vu précédemment, le plasma est le gaz conducteur dans lequel une décharge se crée, formant ainsi un arc électrique. Cet arc chauffe alors le métal ce qui permet de le découper.

- **l'électroérosion** : elle permet de faire des découpages très précis avec un fil en métal. On applique une tension entre le fil et le métal jusqu'à la formation d'un plasma. Ce dernier va permettre de faire fondre le métal. Cette méthode offre plus de puissance que la découpe au laser.

Les arcs électriques sont aussi utilisés pour des activités étonnantes comme :

- **Purifier un milieu (air ou eau)**. Le principe est de faire passer l'élément à purifier dans un tuyau dont le centre est occupé par un fil tendu. En lui appliquant une tension il se produit une décharge qui permet la décomposition de particules toxiques. Les chercheurs du L.E.M.D. travaillent actuellement sur la purification de l'eau.

- **Casser des pierres**. Pour cela il suffit d'appliquer un arc électrique important qui produit ensuite une vibration (onde de choc) pouvant détruire la pierre.

ANNEXES

1. Expériences préliminaires

Une de nos premières expériences a été réalisée dans le but de vérifier si l'humidité avait un rôle vraiment significatif pour notre expérience finale. Pour cela, nous bénéficions d'un générateur de 5 kV récupéré sur une ancienne photocopieuse, d'électrodes pointe-plan pour former un condensateur. L'expérience a été réalisée dans une petite salle close. L'écartement entre les deux électrodes était de 3 mm. Pour le témoin, les conditions ne variaient pas (*le taux d'humidité était de 71% et la température de 25°C*). Elle a duré une heure et pendant cette période, il ne s'est produit aucun arc électrique. Dès lors, nous avons fait augmenter l'humidité de la pièce dans laquelle nous nous trouvions grâce à de l'eau chaude. Peu de temps après, nous avons pu constater que l'humidité augmentait de plus en plus. Durant cette augmentation progressive, il se produisait de plus en plus d'arc et cela de manière plus fréquente. Nous vous présentons un relevé de ces décharges pendant une quinzaine de minutes.

Taux d'humidité (en %)	Température (en °C)
84	25,5
87	25,5
88	26
88	26,5
90	26,5
89	27
88	27

(Une ligne correspond au minimum à un arc électrique)

Grâce à ses résultats, nous avons donc déduit que l'humidité influençait de manière significative la tension d'amorçage, c'est pour cela que nous avons décidé de poursuivre nos recherches.

Une autre journée, nous avons étudié les variations du taux d'humidité dans notre aquarium qui recevra notre montage final afin de connaître au mieux ces variations. Nous avons procédé à six manipulations avec différents facteurs pouvant varier comme la quantité d'eau insérée, la température de l'eau, ambiante... Cette expérience a été réalisée avec une température de 15°C soit 10 degrés de moins que la précédente.

Notre première manipulation se caractérisait par une quantité de 30 g d'eau froide insérée via un gant de toilette. La température à l'intérieur de l'aquarium était de 15°C et le taux d'humidité initial était de 51%. En 10 minutes, ce taux n'a augmenté que de 1%. Nous constatons donc que cette augmentation n'est pas assez importante.

Dans la manipulation suivante, nous avons décidé d'augmenter la quantité d'eau insérée dans le gant. Elle est passée à 40g. L'augmentation du taux d'humidité est toujours trop lente : 2% en 10 minutes.

La troisième manipulation a vu augmenter encore plus la quantité d'eau froide insérée. Le taux initial était de 57% pour finir à 60% en 10 minutes. Les résultats nous poussent à croire qu'il faut que l'eau insérée ait une température plus élevée.

C'est pour cela que la manipulation suivante est caractérisée par une quantité d'eau identique à la manipulation précédente (70g) mais est à une température plus élevée (l'eau est maintenant chaude). Nous avons remarqué une augmentation du taux d'humidité (10%) légèrement plus rapide mais pour nous, elle est toujours insuffisante.

Après, nous avons changé de mode opératoire, nous optons pour un récipient au lieu d'un gant de toilette. Dans ce récipient nous avons versé une quantité importante d'eau

tiède mais l'augmentation de l'humidité ne nous satisfaisait toujours pas. Nous avons opté pour de l'eau chaude

Nous avons donc inséré ce récipient avec 200g d'eau chaude et à partir de là, nous avons observé une forte augmentation du taux d'humidité (jusqu'à 80% soit 15-20% de plus qu'au taux initial de cette manipulation). Nous avons malheureusement observé que de la condensation se formait sur les parois de l'aquarium. Nous pensons que cela risque de se reproduire sur les électrodes. Nous allons donc changer de voie pour la variation du taux d'humidité. La condensation étant due au refroidissement de l'air humide, il nous faut maîtriser le facteur température.

A travers ces différentes manipulations, nous avons donc décidé de chercher un système permettant de conserver une température afin que nous puissions faire varier l'humidité sans provoquer de condensation sur les électrodes.

2. Correspondances

En réponse à notre demande pour rechercher des scientifiques travaillant sur la foudre, nous avons reçu cela : *Nous ne sommes pas des spécialistes de la foudre, et je n'ai pas de réponse très précise à votre question concernant la relation entre l'humidité et la tension de claquage de l'air (il existe une relation, mais je n'ai pas de données précises à vous fournir). Pour réaliser une expérience de claquage dans l'air, il vous faut beaucoup plus de matériel qu'un simple condensateur ! Au minimum : une alimentation haute tension (plusieurs dizaines de kV), un condensateur haute tension, un système d'électrodes. De plus tout cela est relativement dangereux, et il faut prendre des précautions (utilisation de très haute tension). Si vous avez la possibilité de vous déplacer jusqu'à Grenoble dans notre laboratoire, je peux vous montrer le matériel nécessaire, de même que des expériences de claquage dans l'air, si cela vous intéresse. Olivier LESAIN le 26/02/03*

*Laboratoire d'Electrostatique et de Matériaux Diélectriques (LEMD)
CNRS, 25 Avenue des Martyrs BP 166 , cedex 9 38042 Grenoble (France)*

Nous avons aussi recherché des données pour comparer à nos résultats : *Le centre opérationnel de METEORAGE est situé à Pau (64), mais notre réseau de capteurs couvre le territoire national, et permet ainsi une détection complète de la France.*

Les données obtenues sont essentiellement :

- la datation à la seconde
- la localisation en longitude-latitude du point d'impact (et donc une localisation possible par une distance en kilomètres et un angle en degré par rapport à un site).
- la polarité de la décharge
- l'intensité en kA

Eventuellement une ellipse de précision peut être fournie afin de juger de la qualité de détection (<1 km pour l'ensemble du territoire dans 90% des cas).

Stéphane Schmitt le 21/03/03

Voilà un exemple de nos échanges avec M. Filippini :

Merci pour les nouvelles concernant vos expériences.

Oui, à mon avis ces résultats sont assez satisfaisants pour que vous poursuiviez les recherches.

Je suis quand même surpris qu'il y ait une si grande différence entre les deux séries d'expériences : série 1 (expérience témoin, humidité 71%, température 25°C) et série 2 (humidité 84 % à 90%, température 25°C à 27°C) pour une si faible différence de taux d'humidité. N'y a-t-il pas d'autres différences entre les essais ? Refaites dès que possible l'expérience témoin, et cela plusieurs fois, pour bien connaître son niveau de reproductibilité.

Si l'IUT peut vous procurer un petit générateur réglable de 0 à 30 kV c'est très bien. Il est important que vous ayez une mesure de la tension (il faut donc demander le vu-mètre qu'ils proposent).

A propos du phénomène curieux que vous aviez observé en juin avec la machine de Wimshurst, je crois avoir l'explication : quand l'humidité augmente la machine n'est plus capable de fournir la même tension et l'arc entre les deux électrodes s'éteint car la tension est insuffisante. Lorsqu'on diminue la distance, une tension plus petite est suffisante pour produire l'ionisation de l'air (application de la loi de Pashen qui donne la tension d'amorçage en fonction du produit masse volumique x distance ; on est sur la branche montante de la loi car la distance est de l'ordre du mm). Dans les deux cas vous parlez d'arc. Avant de faire croître l'humidité je pense que vous aviez vraiment un arc, c'est à dire un éclair (dont on entend le crépitement). Ensuite, avec l'humidité et la distance plus petite, il ne devait pas y avoir un arc mais un effluve, phénomène qui se manifeste par la présence d'une zone bleutée et peu lumineuse et qui apparaît dès que la tension de Pashen est atteinte. Si vous aviez pu augmenter la tension vous auriez eu ensuite un arc.

J.C.Filippini le 23/09/03

3. Bibliographie

Sciences et vie Junior, Juillet 2002.

Sciences et Avenir, Mars 2002.

Sciences et vie, Février 1999.

Ça m'intéresse, Août 2000.

Site Internet de Météorage.

Un compte-rendu d'une conférence de Serge Chauzy, scientifique travaillant sur l'électrostatique lié à l'atmosphère.

Site de Patrice Pezillier, personne travaillant sur la foudre dans le cadre d'un T.I.P.E

4. Protocole de sécurité

Avant l'utilisation :

- **Vérifier que l'extrémité du fil de la T.H.T est isolée de tout**
- **Prérégler le système avant de le mettre sous tension.**

Pendant l'utilisation :

- **Toujours commencer par une tension peu importante.**
- **Ne jamais faire fonctionner la T.H.T trop longtemps.**

Après l'utilisation :

- **Débrancher le générateur.**
- **Décharger le condensateur avec le câble en créant un contact avec les deux électrodes.**

LEXIQUE

? **Avalanche électronique** : c'est l'enchaînement des chocs des électrons libres pour des molécules qui s'ionisent. Pour que ce phénomène se déroule il faut que l'énergie de l'électron libre se situe entre 10 et 16 eV. Les chocs créent des électrons et des ions en nombre croissant.

? **Champ disruptif** : limite où l'isolant d'un diélectrique s'ionise, il devient conducteur.

? **Champ électrique** : différence de potentiel entre 2 points en fonction de la distance. Entre deux plans parallèles situés à la distance d , le champ est : $E = \frac{U}{d}$

E est en $V.m^{-1}$, U en V et d en m .

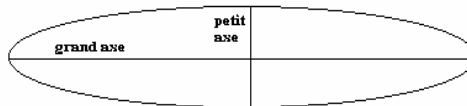
? **Effet de pointe** : effet provoquant une augmentation du champ électrique au niveau des reliefs (pointe, arbres.... Plus l'objet est pointu ou le rapport grand / petit axe est important, plus le champ électrique est important.

$$E_p = \frac{2U}{r_p \ln\left(\frac{4d}{r_p}\right)}$$

représente le champ électrique au niveau de la pointe, U la tension, r_p le rayon de la pointe et d , la distance entre les deux électrodes (l'un étant une pointe et l'autre un plan perpendiculaire à l'axe de la pointe).

? **Effet couronne** : ou feux de Saint-Elme. Où il y a l'effet de pointe, il peut se former une faible avalanche électronique au niveau d'un objet pointu. Les molécules retrouvent rapidement leur état d'origine en créant de la lumière (photons).

? **Ellipsoïde** : schéma d'une ellipsoïde



? **Energie de l'électron libre** : $q = f \cdot e$. C'est le produit du champ électrique auquel l'électron est soumis à la charge électrique (charge élémentaire). C'est son libre parcours moyen.

? **Graupel** : c'est un type de particule de neige dense ou de glace qui peut se former dans l'atmosphère.

? **Hydrométéore** : c'est l'ensemble de toutes les particules d'eau (gouttelettes, gouttes, neige, grêle, etc.) qu'on trouve dans l'atmosphère.

? **Libre parcours moyen d'un électron** : distance que parcourt en moyenne un électron avant de percuter une particule.

? **Plasma** : gaz complètement ionisé (il est considéré comme le quatrième état de la matière).

? **Point de rosée** : température à laquelle l'air humide soumis à un refroidissement atteint la saturation. Il y a alors apparition de fines gouttelettes et condensation sur le support.

? **Radioactivité** : réaction nucléaire spontanée (les noyaux se transforment d'eux-mêmes, sans intervention extérieure).

- ? **Rayons cosmiques** : flux de particules de haute énergie (supérieure à quelques millions d'électronvolts et inférieure à 10^{20} eV) d'origine solaire, galactique et extragalactique.
- ? **Streamers** : c'est un canal gazeux ionisé qui peut se former dans un milieu soumis à un champ électrique lorsqu'il y a suffisamment de charges électriques. Il émet de la lumière.