

L'étude de l'orage et sa matérialisation



La météorologie consiste à étudier des phénomènes atmosphériques tels que les nuages, le vent ou la pluie. Cette étude a pour but de comprendre ces phénomènes : leur formation et leur évolution, grâce à nos connaissances sur les facteurs qui influencent ces faits tels que la pression, la température, l'humidité. Grâce à cette science, nous pouvons désormais prédire certains phénomènes climatiques. L'orage est un phénomène climatique courant sur lequel nous sommes questionnés. Le but de notre étude est de non seulement comprendre comment fonctionne les orages, mais également de tenter d'en créer un, et de finalement prendre compte de la difficulté des scientifiques à maîtriser une telle énergie qui pourrait être une révolution dans notre société. L'orage est une perturbation atmosphérique composée d'un nuage appelé cumulonimbus, qui implique des précipitations parfois fortes, et de décharges électriques appelées "foudre" et de tonnerre.

On se demande quelles sont les conditions nécessaires pour qu'un orage apparaisse, afin de comprendre comment en matérialiser un si cela est réalisable. Dans une première partie nous expliciterons le phénomène nuageux tandis que dans une seconde partie nous aborderons en détail la création de la foudre. Nous proposerons par la suite des expériences liés à certains phénomènes puis discuterons des usages possible si cette énergie était maîtrisable.

SOMMAIRE

I/ Le nuage

p3-p5

II/ La foudre

p6-p9

III/ Expériences

p10-p11

IV/ Utilisations

p12-p14

Conclusion

p15

I/ Le nuage

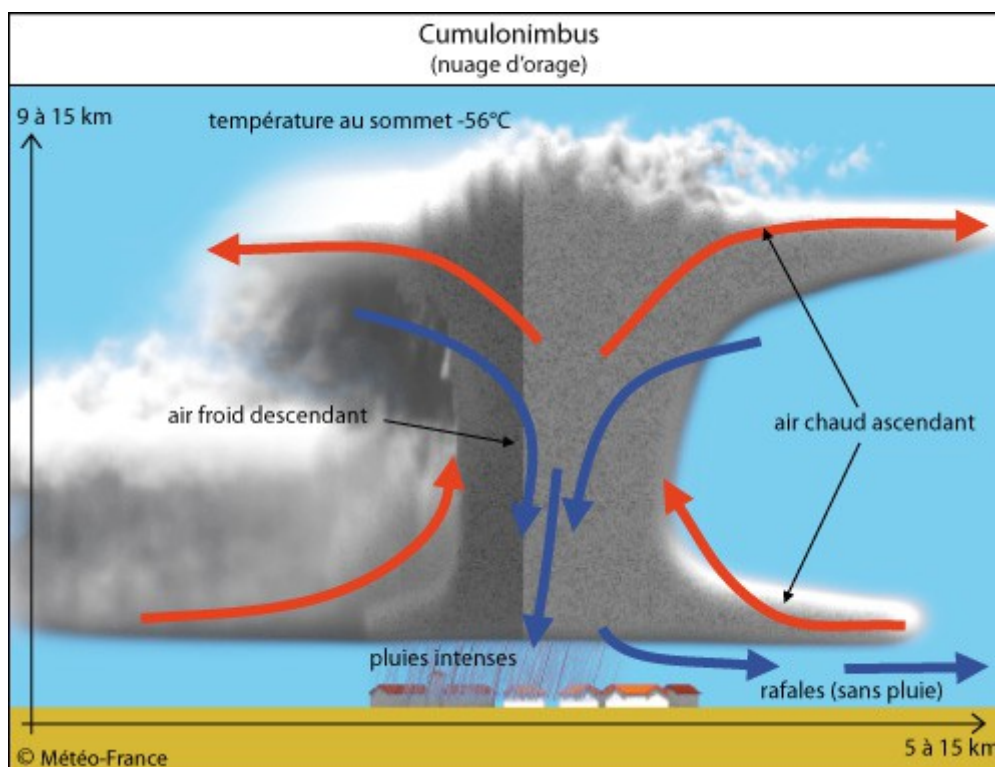
Les systèmes nuageux se développent dans la couche de l'atmosphère la plus proche du globe : la troposphère. Les nuages sont formés de fines particules d'eau assemblées à l'état liquide (gouttelettes d'eau) ou à l'état solide (cristaux de glace de 1 à 100 microns de diamètre) obtenus par l'adsorption de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère autour de minuscules impuretés appelées noyaux de condensation (cristaux de sel marin, pollens, produits polluants).

L'Organisation Météorologique Mondiale reconnaît actuellement dix genres de nuages, distingués selon l'altitude à laquelle ils se forment et leur apparence générale. Il y a les cirrus, cirrocumulus, cirrostratus, altostratus, nimbostratus, cumulonimbus, stratocumulus, stratus, cumulus. Les nuages responsables des orages sont les cumulonimbus.

Ce nuage géant et menaçant, large de 5 à 15 km, atteint fréquemment la tropopause (entre 8 et 16 km d'altitude suivant la latitude) et parfois même la dépasse, exige en général pour sa formation des masses d'air instable, humide et chaud, donc de fortes variations de température sur des épaisseurs importantes. Ils se développent alors de manière épisodique, souvent en cours d'après-midi, au-dessus des endroits où la topographie ou la nature du sol favorisent la surchauffe des masses d'air dans les basses couches.

L'air chauffé se dilate et devient plus léger que l'air des couches supérieures, ce qui entraîne une ascension. Si l'air chaud est suffisamment humide, la vapeur d'eau contenu dans l'air va se condenser et ainsi former un nuage de type cumulus. Si l'atmosphère est instable, les mouvements verticaux seront intenses et favoriseront le développement du nuage et augmenter son altitude. Les gouttelettes les plus élevées se transforment alors en cristaux de glace : le cumulus devient un cumulonimbus.

Ils sont facilement reconnaissables, car ils se déplacent avec les fronts et atteignent des altitudes élevées, à leur sommet ils se heurtent à la stratosphère et s'étalent largement ce qui leur donne la forme caractéristique d'une enclume.



Évolution d'un nuage d'orage :

L'évolution d'un cumulonimbus peut se résumer en 3 étapes : développement, maturité et dissipation.

Le développement :

Le cumulonimbus s'alimente constamment d'air chaud et humide, pour fournir l'énergie nécessaire pour créer des courants ascendants. Son énergie est considérable : chaque seconde, un gros cumulonimbus peut aspirer 700 000 tonnes d'air et absorber ainsi 8 800 tonnes de vapeur d'eau. Le nuage va donc monter rapidement en altitude ce qui va entraîner la condensation de la vapeur d'eau qu'il contient. Cette condensation va dégager de la chaleur qui s'ajoutant à la chaleur du nuage va accélérer sa monter. Le nuage va donc rapidement atteindre des altitudes où la température est au dessous de 0 °C. Dans les couches supérieures du nuage des courants ascendants dépassant les 30m/s sont fréquemment observés. Le développement vertical peut encore durer entre dix et vingt minutes après que le nuage est dépassé la ligne imaginaire où la température est de 0 °C : l'isotherme. Pendant ce dernier développement vertical le nuage peut atteindre jusqu'à 10 km en altitude il se retrouve donc à la limite de la tropopause. Les précipitations sont maintenues en altitude pas les forte vitesses verticales des ascendances.

La maturité :

La phase de maturité commence lorsque l'accumulation de l'eau dans le nuage devient telle que les courants ascendants ne peuvent plus la supporter. Cela se remarque avec les premières précipitations. Les précipitations rendent l'air visqueux se qui va créer des courants descendants. Ces courants descendants sont localisé près du milieu de la partie frontale avant du nuage, ils ont une vitesse inférieure au courants ascendants. Les courants descendants transporte de l'air froid qui va être amené au sol et se répandre vers l'avant du nuage. L'observateur aura la sensation d'un changement de la direction du vent au sol, cela correspond en réalité à une baisse de température. Ensuite la pluie commence à tomber et s'intensifie rapidement. Cette zone frontale descendante est la zone où se localise les précipitations. Un nuage peut renvoyer à la surface terrestre 4 000 tonnes d'eau, sous forme d'eau liquide, de neige ou de grêle. En plus des précipitations, on observe dans cette zone des rafales de vent et un accroissement brutal et passager de la pression. Le nuage orageuse peut encore se développer et atteindre jusqu'à 15km d'altitude pendant cette phase de maturité qui peut durer de 15 minutes à plus d'une heure.

La dissipation :

La dissipation commence lorsque les courants descendants sont plus important que les courants ascendants, les précipitations ayant atteint le sol s'évapore ce qui refroidie les basses couches de l'atmosphère et diminue les courants ascendants. Cette diminution engendre les dernières précipitation du nuage. Le nuage s'évapore avec le réchauffement des courant descendant, ou se fragmente, en un voile de cirrus et des débris inorganisés de nuages proche du sol. Cette dernière phase marque la fin de l'orage. La durée moyenne de vie d'un cumulonimbus générant uniquement des averses est d'une vingtaine de minutes, Mais celle d'un cumulonimbus orageux est de l'ordre d'une ou deux heures.

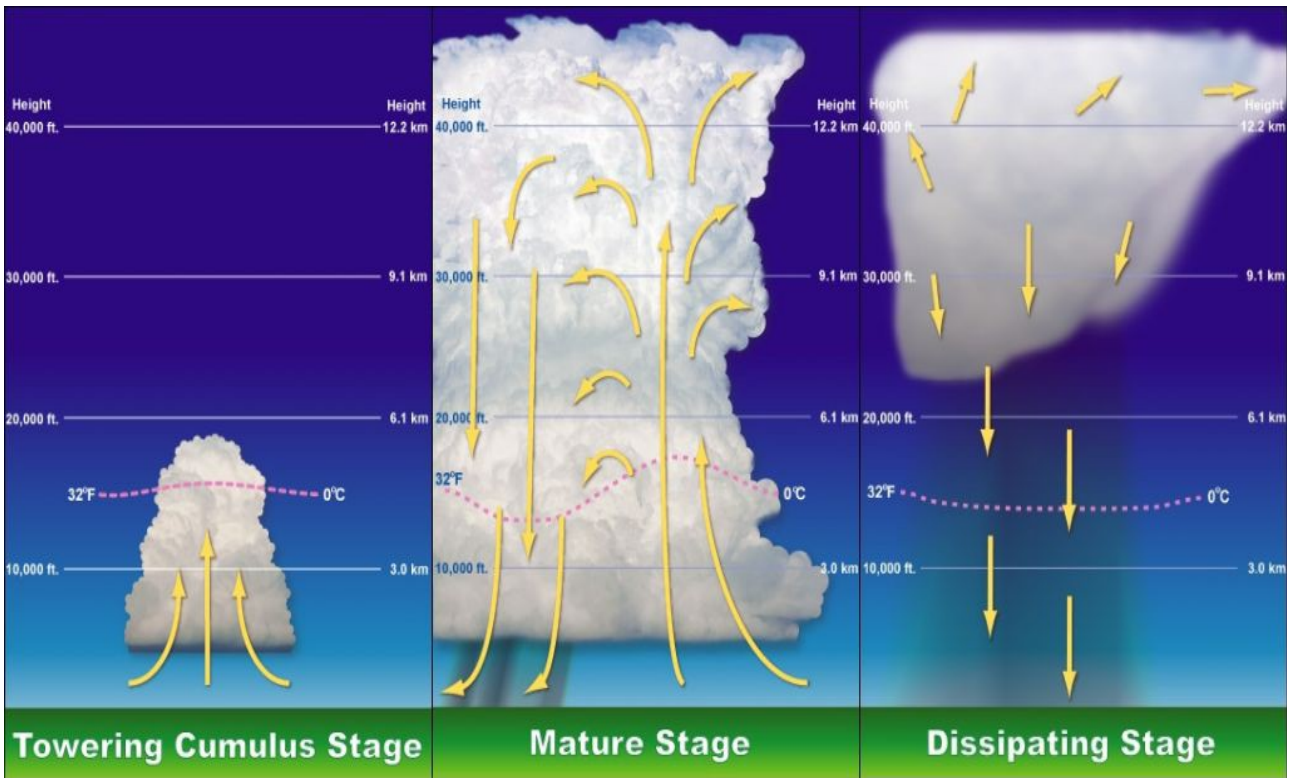


Schéma des trois phases dans le cycle de vie du cumulonimbus
 Crédit : NOAA - Licence : CC0

II/ La foudre

Il existe beaucoup d'activité électrique comme les décharges entre les nuages, la majorité se déroule donc en intra et inter nuages. Cependant, il existe également des décharges entre les nuages et le sol, telle que la foudre par exemple. Ce phénomène a longtemps fait l'objet d'études car il représente un danger pour notre population et car il se produit fréquemment : 1 millions d'éclairs par an en France.

La foudre est un phénomène naturel qui produit des décharges électrostatiques disruptives, c'est à dire une décharge électrique associée à une impulsion de courant transitoire de très forte amplitude. Le mot "disruptive" est employé afin d'exprimer une rupture brutale.

La foudre chauffe l'air à plus de 30 000°C, elle se produit au sein des nuages, et se manifeste par des effets lumineux : les éclairs, et par des effets sonores : le tonnerre.

Pour mieux comprendre le phénomène, il faut effectivement s'intéresser à la séparation des charges électriques dans le nuage. La partie supérieure, l'enclume, est chargée positivement, alors que la partie inférieure du nuage est chargée négativement. (Il faut noter qu'il y a cependant une certaine quantité de charges positives qui est enserrée dans cette partie inférieure).

L'estimation de la charge totale formée est de quelques dizaines voire centaines de Coulomb, ces valeurs sont très variables.

Ainsi, le nuage étant fortement chargé négativement à sa base, s'approche du sol et provoque une montée du champ électrique terrestre, passant d'une valeur moyenne environnant 150V/m à 15kV/m. (Le volt par mètre, noté V/m, est l'unité de mesure de l'intensité du champ électrique exerçant une force de 1 newton sur une charge électrique de 1 coulomb).

Cette augmentation de l'intensité du champ électrique terrestre est le premier signe annonciateur d'une éventuelle chute de foudre. Nous savons également que la foudre frappe de préférence les objets proéminants, par effet de pointe (ex: le bout du parapluie qui amplifie le champ magnétique environnant).

Afin d'explicitier l'activité électrique dans le nuage, voici un schéma :

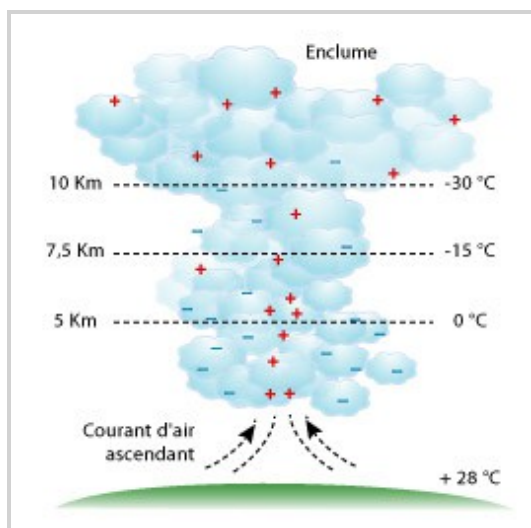
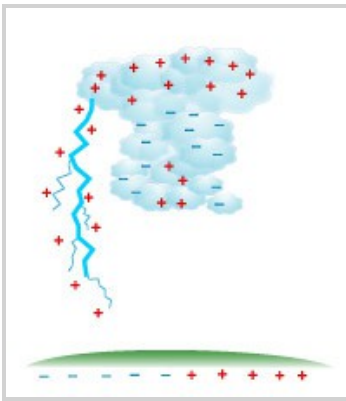
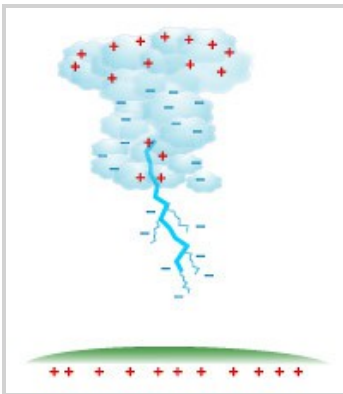


Schéma illustrant la distribution des charges électriques dans le cumulonimbus.

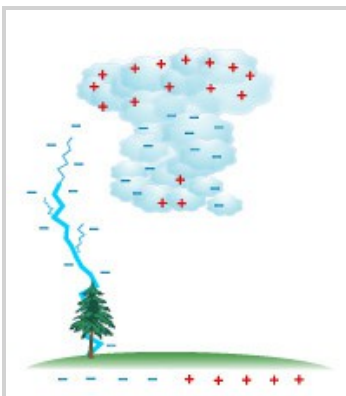
Il existe quatre types de décharges :



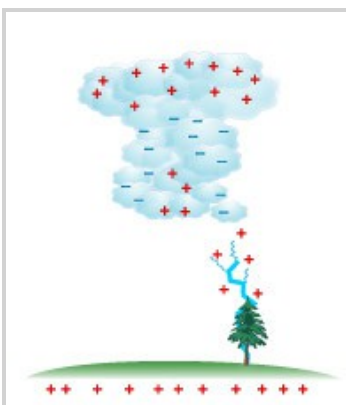
Décharge descendante dont le leader est positif. (10% des cas)



Décharge descendante dont le leader est négatif. (90% des cas)



Décharge ascendante dont le leader est négatif. (rare)



Décharge ascendante dont le leader est positif. (rare)

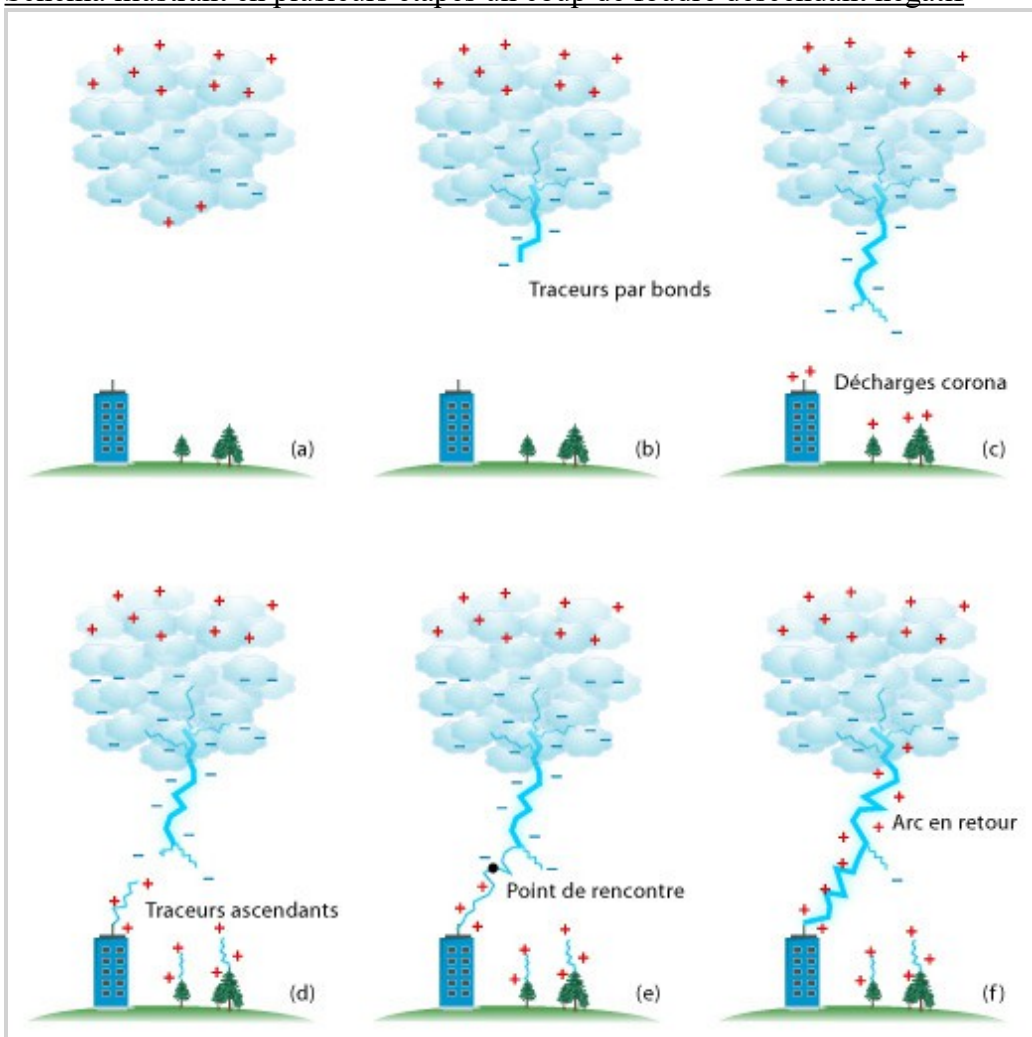
La foudre est due à la différence de potentielle électrique, qui vallant de 10 à 20 millions de volts, créer un plasma engendrant une expansion explosive de l'air par dégagement de chaleur. (D'où les 30 000 degrés C). Alors en se dissipant, le plasma crée un éclair de lumière, puis un son fort : le

tonnerre. On remarque par ailleurs que le tonnerre est entendu après l'apparition de l'éclair (la célérité de l'éclair vaut entre 70 et 2000 km/s selon les types de décharges) : la vitesse de la lumière est supérieure à celle du son. Une foudre proche lance un craquement sec tandis qu'une foudre lointaine résonne un long grondement.

Du fait de la fréquence du type de décharge : 90% de coup de foudre descendant négatif, nous allons nous intéresser à ce cas. L'étude de cette décharge résulte d'hypothèses.

Nous pensons cependant qu'il existe en fait une décharge bidirectionnelle au sein du nuage : la positive se déplacerait horizontalement en haut du nuage tandis que la négative serait verticale dont le sens irait vers le sol. La suite de l'hypothèse est la suivante : la décharge se déplace par série de bonds lumineux successifs. Chaque bond possède une longueur de quelques dizaines de mètres et le leader apporte une quantité de charge négative d'environ 10 Coulombs vers le sol avec une vitesse moyenne comprise entre 0,15 et 1 mètre par microseconde.

Schéma illustrant en plusieurs étapes un coup de foudre descendant négatif



La décharge qui est descendante négative se rapproche du sol avec un potentiel électrique d'environ -10 millions de Volts, elle entraîne une intensification du champ électrique terrestre et engendre donc des décharges ascendantes. On arrive alors au point de rencontre, c'est le processus d'attachement qui s'effectue enfin à quelques dizaines de mètres au dessus du sol.

Par la suite, la décharge verticale qui était négative est déchargée. Puis le premier arc en retour se propage vers le nuage et neutralise les charges négatives à une vitesse d'environ 1/3 de la vitesse de la lumière soit environ 100 000 km/s. (Arc en retour : puissant courant électrique qui remonte le canal ionisé préalablement établi entre le nuage et le sol -> seule phase visible d'un éclair à l'oeil

nu). Le courant d'environ 30 kA remonte en quelques microsecondes. C'est donc à cet instant que le phénomène produit ses 30000 degrés C, impliquant la création d'un nouveau canal : à haute pression qui est à l'origine du tonnerre.

Enfin, soit l'éclair disparaît et l'orage s'arrête, soit il reste une quantité résiduelle de charges dans le nuage, auquel cas un leader "obscur" se développe dans le canal à une vitesse de $3 \cdot 10^6$ m/s apportant une charge d'environ 1 C. Le leader obscur déclenche de nouvelles séries d'arc en retour; le dernier pouvant atteindre 100 A afin de drainer la charge résiduelle du nuage.

III/ Expériences

Afin de réaliser un orage, il faut en un premier temps réaliser un nuage de type cumulonimbus. Donc la première partie de notre expérience sera dédiée à la création d'un nuage. Puis dans un deuxième temps, nous nous consacrerons à la création d'un éclair.

I) Le nuage.

Pour réaliser l'expérience il nous faut :

- Un réceptacle
- De la glace carbonique -> gaz carbonique à l'état solide -78°C
- De l'eau bouillante
- Un papier plastique transparent de largeur A4 et de longueur supérieure au périmètre du réceptacle

On place la glace carbonique dans le réceptacle, on ajuste le papier plastifié sur les cotés de façon à ce que la hauteur du réceptacle augmente pour avoir une meilleure visibilité. Puis, on verse l'eau bouillante dans le réceptacle.

On observe la création d'une fumée blanche épaisse semblable à celle d'un cumulus.

Seulement, on remarque que la fumée obtenue ne se regroupe pas en un point de hauteur comme les nuages le font...

II) L'éclair

Tout d'abord, nous avons vu précédemment qu'un éclair avait un fort potentiel électrique, de plus, de nos jours, il n'est pas encore possible de capter cette énergie. On comprend donc qu'il soit difficile de produire un éclair dans des conditions de sécurité (haute tension).

Ceci explique que nous ne puissions pas réaliser un réel éclair.

Nous allons cependant présenter une expérience permettant de créer de l'énergie lumineuse grâce à de l'électricité statique, qui pourrait illustrer la luminosité d'un éclair dans un orage.

Nous avons d'abord pensé utiliser la machine de Wimshurst.

Cet objet est un mécanisme permettant de mettre en évidence la présence d'électricité statique. En effet, la machine de Wimshurst fonctionne de cette manière : une énergie mécanique tourne une petite manivelle reliée à une courroie qui entraîne la rotation d'un disque sur lequel se trouve de nombreuses étiquettes métalliques. Devant le disque sont placées des boules en métaux qui par les étiquettes collées sur le disque se chargeront par frottement. Or les électrons qui sont en face des protons ont le besoin de migrer, ce qui provoque des échanges de particules dans l'air entraînant des petits éclairs.

Or, il se trouve que nous avons trouvé une autre machine permettant également de créer des petits éclairs par énergie électrostatique : la machine de Van Der Graaff.

La machine de Van Der Graaf fonctionne sur le même principe, cependant, il faut préciser que notre machine comporte un générateur électrique permettant un fonctionnement autonome qui ne nécessite donc plus l'apport d'énergie mécanique. Un générateur fait tourner une courroie qui se frotte à une tige métallique. La tige se charge à l'intérieur d'une boule qui sera donc chargée positivement. Puis à côté de cette première boule, on place une deuxième tige qui sera électriquement négative dans une boule. Lorsqu'on rapproche les boules, la différence entre les charges des deux boules crée des échanges qui seront à l'origine d'étincelles électrostatiques.

On peut également utiliser cette machine afin de jouer avec le phénomène d'électrostaticité : une personne s'isole du sol en montant sur une plaque isolante, on enlève la deuxième tige, on retire le

surplus de charge afin d'éviter la décharge électrique, puis on pose sa main sur la boule. On observe que les cheveux de la personne se dressent : c'est une expression du phénomène électrostatique.



Au palais de la découverte à Paris, des scientifiques ont utilisé sur le même principe que nous ce phénomène, mais en plus grand.

IV/ Utilisations

Nous pourrions utiliser la foudre comme énergie. D'abord Il faut bien différencier l'énergie de la puissance :

- l'énergie est une mesure de la capacité d'un système à modifier un état, à produire un travail entraînant un mouvement, un rayonnement électromagnétique ou de la chaleur. l'énergie s'exprime en Joules (J).

- la puissance quant à elle est la quantité d'énergie par unité de temps fournie par un système à un autre. La puissance correspond donc à un débit d'énergie La puissance s'exprime en Watts (W).

Calculons l'énergie produite par la foudre pour un éclair d'environ 5km :

La puissance P d'un tel éclair est :

$P=U.I$ avec P en watt, U la tension en volt, et I l'intensité en ampère .

La tension d'un éclair est de 100 millions de volt et son intensité est de 3 000 à 300 000 ampère selon la taille de l'éclair, ici nous prendrons 3000 ampère. (Un petit éclair).

d'où :

$$P=10^8 \times 3.10^3 = \mathbf{3.10^{11} \text{ W}}$$

Ensuite on calcule ensuite Δt la durée d'un éclair :

$\Delta t = d / v$ avec d la distance entre le sol et le cumulonimbus (taille de l'éclair), en km et v la vitesse en km.s^{-1} :

Nous somme ici dans le cas d'un éclair de 5 km, sa vitesse est d'environ 200 km/s.

D'où :

$$\Delta t = 5 / 200 = \mathbf{2,5.10^{-2} \text{ s}}$$

Enfin nous allons calculer l'énergie produite par un éclair :

$E = P \times \Delta t$ avec E en joule

$$E = 3.10^{11} \times 2.5.10^{-2} = \mathbf{7,5.10^9 \text{ J}}$$

Nous connaissons maintenant l'énergie produite par un éclair de 5 km , nous allons maintenant calculer l'énergie produite par tous les éclairs qui touchent le sol Français en une année.

Le nombre d'éclairs qui tombe en moyenne en France est de 1 million donc :

$$E_{\text{année}} = E \times 10^6 = 7,5.10^9 \times 10^6 = \mathbf{7,5.10^{15} \text{ J}}$$

L'énergie annuelle produite par les éclairs touchant le sol Français est donc de $7,5.10^{15} \text{ J}$. En considérant P la puissance d'un petit éclair.

Calculons l'énergie produite en une année par un réacteur nucléaire :

Un réacteur nucléaire délivre 7 000 000 MWh par an, soit 7.10^9 kWh .

On sait que $1 \text{ kWh} = 3600 \text{ J}$

$$\text{d'où } 7.10^9 \text{ kWh} = 2,52.10^{13} \text{ KJ soit } \mathbf{2,52.10^{16} \text{ J}}$$

Calculons l'énergie produite en une année par une éolienne (off-shore) :

Les meilleures éoliennes (off-shore) délivrent en moyenne 17 000 MWh par an, soit $1,7.10^7 \text{ kWh}$.

On sait que $1 \text{ kWh} = 3600 \text{ J}$

d'où $1,7 \cdot 10^7 \text{ kWh} = 6,12 \cdot 10^{10} \text{ KJ}$ soit **$6,12 \cdot 10^{13} \text{ J}$**

L'énergie que pourrait fournir la foudre est donc inférieure à celle fournie par un réacteur nucléaire. Cependant elle est supérieure à celle fournie par une centrale d'éoliennes mais, seulement par une seule éolienne. Contrairement à l'énergie nucléaire, la foudre est une source d'énergie renouvelable et non polluante.

De plus, une production basée sur la récupération des éclairs a l'avantage de capter de l'électricité, et non pas de produire celle-ci à partir d'une réaction chimique ou atomique, et ne produit donc pas de déchets. Ainsi, il n'y a aucun besoin de recyclage ou de traitement, donc il n'y a aucun point écologique négatif à l'utilisation de l'énergie de la foudre.

Pour utiliser la foudre il faut d'abord la récupérer, nous avons donc regarder les régions en France et les saisons où il y a le plus d'orage.



*Carte du nombre moyen d'impacts de foudre au sol par km²/saison (période 1997-2013) ©
Météo-France / Météorage*

On peut donc voir que pendant l'hiver il n'y a pas de foudre qui tombe en France, au printemps il y a très peu d'orage. En automne la foudre tombe rarement sauf au bord de la méditerranée où cela est beaucoup plus fréquent. En été la foudre tombe très souvent sur toute la France sauf au nord ouest. Il existe des inventions comme le paratonnerre pour attirer la foudre. Le paratonnerre est une invention de Benjamin Franklin créée en 1752. Il était conçu à l'origine afin d'« écouler à la terre le fluide électrique contenu dans le nuage orageux et ainsi empêcher la foudre de tomber ». Cette invention permet d'augmenter les chances que la foudre tombe à proximité du paratonnerre. Mais pour que toute la France soit comprise dans une zone de paratonnerre il faut plus de 2 milliards de tiges de 10 mètres de haut. En effet une tige de 10 mètres de haut capte la foudre dans un rayon environ égal à sa hauteur, soit une aire de l'ordre de 300 m². Pour couvrir la France (à peu près 675 000 km²), il faudrait donc installer environ 2 milliards de tiges. Ce qui coûterait très cher et ne serait sans doute pas rentable, de plus cela ne serait pas très esthétique.

Une autre invention plus récente et plus expérimentale consiste à capter la foudre en ionisant l'air et canalisant l'énergie vers un point précis. Cette idée a été mise au point avec l'invention d'un laser

émis par un dispositif nommé Teramobile. Fruit d'une collaboration franco-allemande, l'appareil en question est un dispositif mobile qui délivre des impulsions laser ultrapuissantes et ultrabrèves. En effet, leur puissance atteint 5 000 milliards de watts soit l'équivalent de la puissance de 1 000 centrales nucléaires. La durée de chaque impulsion est à peu près de 1 centième de milliardième de seconde. Mais cette invention est encore en test en laboratoire et doit être développée pour être effective à grande échelle.

Mais le problème majeur n'est pas le fait que la production d'énergie ne serait pas assez rentable mais que nous ne savons pas comment stocker autant d'énergie électrique. On ne peut pas mettre la foudre « en bouteille » à cause de la résistance des matériaux utilisés qui dissipent l'énergie en chaleur. C'est l'« effet joule » : Tous les conducteurs qui ont une résistivité non nulle, dissipent sous forme de chaleur de la puissance électrique.

On pourrait alors utiliser un supra conducteur. C'est un objet qui, dans certaines conditions, notamment le froid, a une résistance nulle ou quasi nulle.

On ferait tourner en boucle le courant dans des bobines mais le problème c'est qu'il se formerait un champ magnétique dû aux frottements des bobines.

Il faudrait également qu'il fasse froid. Pour cela, il faudrait en produire, ce qui ne serait pas très rentable ni très écologique. Sachant que les matériaux utilisés dissipent l'énergie en chaleur, on pourrait récupérer cette énergie thermique pour l'avoir sous forme d'énergie mécanique ou électrique.

Il existe la machine à vapeur de James Watt. Une chaudière fournit de la vapeur d'eau. Puis l'énergie thermique que possède la vapeur d'eau est convertie en énergie mécanique grâce à l'énergie cinétique. Aujourd'hui il n'y a que la machine à vapeur qui a eu un résultat intéressant.

On pourrait par contre utiliser la chaleur produite par la foudre : pour se chauffer. Comme les centrales thermiques en Islande qui récupèrent l'énergie du magma du sous-sol pour se chauffer. On pourrait aussi chauffer l'eau d'un lac en dirigeant la foudre sur celui-ci (si on arrive à diriger cette foudre un jour), sachant que la foudre peut chauffer l'air jusqu'à 30 000°C . Un problème subsiste cependant : l'eau pourrait s'évaporer, et cela pourrait refroidir très vite.

Aujourd'hui de nouveaux projets se mettent en place pour mieux comprendre les orages, trouver une solution pour stocker la foudre. Le laboratoire de recherche sur la foudre est composé d'une équipe de 16 scientifiques. Leurs recherches menées au laboratoire portent spécifiquement sur l'étude et l'analyse des effets de la foudre au point d'impact. C'est donc les derniers mètres du trajet de la décharge et toutes les conséquences, manifestations et dégâts qui en résultent qui sont au cœur de leur travaux. Certains laboratoires essaient même de recréer un orage, ou créer un éclair à partir d'éléments naturels pour maîtriser le phénomène et donc ne pas se contenter de l'exploiter lorsque la foudre tombe. Le problème du stockage se poserait encore si nous arrivions à créer de la foudre d'orage car l'énergie serait trop conséquente, mais on pourrait essayer de diviser l'énergie très forte produite par la foudre. En effet si nous maîtrisions ce phénomène, nous pourrions contrôler la foudre pour qu'elle se dirige vers des petites batteries qui sépareraient l'énergie de la foudre et qui permettraient de la stocker.

Conclusion

Nous avons tout d'abord découvert que le nuage orageux se formait après développement et maturité dans cumulonimbus et qu'il disparaissait avec la phase de dissipation

On a ensuite vu que la foudre était un phénomène naturel complexe qui apparaissait souvent, suivant la répartition des charges électriques au sein du cumulonimbus.

Puis nous avons essayé de produire un orage par la création d'un nuage et avons utilisé l'énergie électrostatique pour créer des éclairs miniatures. Un orage complet miniature n'étant pas réalisable à petite échelle. Enfin il s'est avéré que si nous pouvions maîtriser cette énergie nous pourrions réussir à la stocker pour l'utiliser plus tard et nous pourrions produire plus de foudre pour avoir plus d'énergie.

Bien que les décharges inter-nuages (entre les nuages) et intra-nuages (à l'intérieur du nuage) constituent plus de la moitié des décharges atmosphériques, ce sont surtout les coups de foudre (décharges nuage-sol) qui ont été l'objet des études les plus poussées. Ceci est dû essentiellement à des raisons d'ordre pratique (cause de blessure et mort, incendies de forêts, et perturbations des systèmes de télécommunication et de transport), et aussi au fait qu'il est plus facile de mesurer les caractéristiques optiques et électriques des décharges nuage-sol.

Elle présente de nombreux dangers : électrocution, déclenchement d'incendie, interférences électromagnétiques nuisibles à l'aviation et à la navigation, etc. C'est pourquoi, plusieurs techniques ont été développées pour la détecter et la canaliser afin de protéger les êtres vivants et les équipements. La foudre en boule et les feux de saint-Elme sont des phénomènes plus singuliers et moins violents, mais qui impliquent de la même façon l'électricité atmosphérique. On les range, avec la foudre proprement dite, dans la catégorie des électrométéores.

Sources

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Nuage>
<http://eduscol.education.fr/obter/appliped/circula/theme/nuages.htm>
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Foudre>
<https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9t%C3%A9orologie>
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Orage>
http://www.foudre-ineo.com/rep-la_foudre/rub-phenomenologie.html
<http://www.cosmovisions.com/CTfoudre.htm>
https://fr.wikipedia.org/wiki/Volt_par_m%C3%A8tre
https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_corona
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Tribo%C3%A9lectricit%C3%A9>
https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9n%C3%A9rateur_de_Van_de_Graaff
https://www.notre-planete.info/terre/climatologie_meteo/nuages.php
<http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/phenomenes-meteo/les-orages#>
<http://ethicologique.org/index.php/750-eoliennes-1-reacteur-nucleaire/>
<http://la-foudre-1s2.e-monsite.com/pages/i-qu-est-ce-qu-un-orage.html>
<http://la-foudre-1s2.e-monsite.com/pages/ii-recuperation-et-utilisation-de-l-energie-produite-par-la-foudre.html>
<http://www.futura-sciences.com/planete/actualites/meteorologie-extreme-video-mystere-foudre-boule-resolu-51854/>
http://www.teramobile.org/press/svj_fr_oct_06.pdf
<http://foudre-tpe.e-monsite.com/pages/stocker-l-energie-electrique-de-la-foudre.html>