

1.4.3 Le nuage d'orage : le cumulonimbus

Le cumulonimbus, nuage caractéristique des phénomènes orageux est une véritable usine thermodynamique, qui se nourrit d'air chaud et humide pour fournir l'énergie nécessaire aux mouvements 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 même nuage peut renvoyer la surface terrestre 4000 tonnes d'eau, sous forme d'eau liquide, de neige ou de grêle.

Ce nuage géant et menaçant, large de 5 à 15 km, peut s'élever jusqu'à 15 km d'altitude sous nos latitudes. À son sommet, le cumulonimbus se heurte à la stratosphère et s'étale largement, ce qui lui donne sa forme générale d'enclume (ou, parfois, de panache ou de chevelure ébouriffée). Ci-dessous un cumulonimbus capillatus incus (enclume en latin).



Figure 5 : Cumulonimbus capillatus

Source wikimedia

Pour avoir formation d'un cumulonimbus il faut trois conditions importantes :

- ✓ un sol plus chaud que l'air qui le surmonte
- ✓ une humidité importante
- ✓ de l'air instable

1.4.3.1 Structure et développement du nuage d'orage

Si la durée moyenne de vie d'un cumulonimbus modéré générateur d'averses est d'une vingtaine de minutes, celle d'un cumulonimbus orageux est de l'ordre d'une ou deux

heures. On peut schématiser grossièrement l'évolution d'un nuage d'orage en trois étapes : développement, maturité et dissipation.

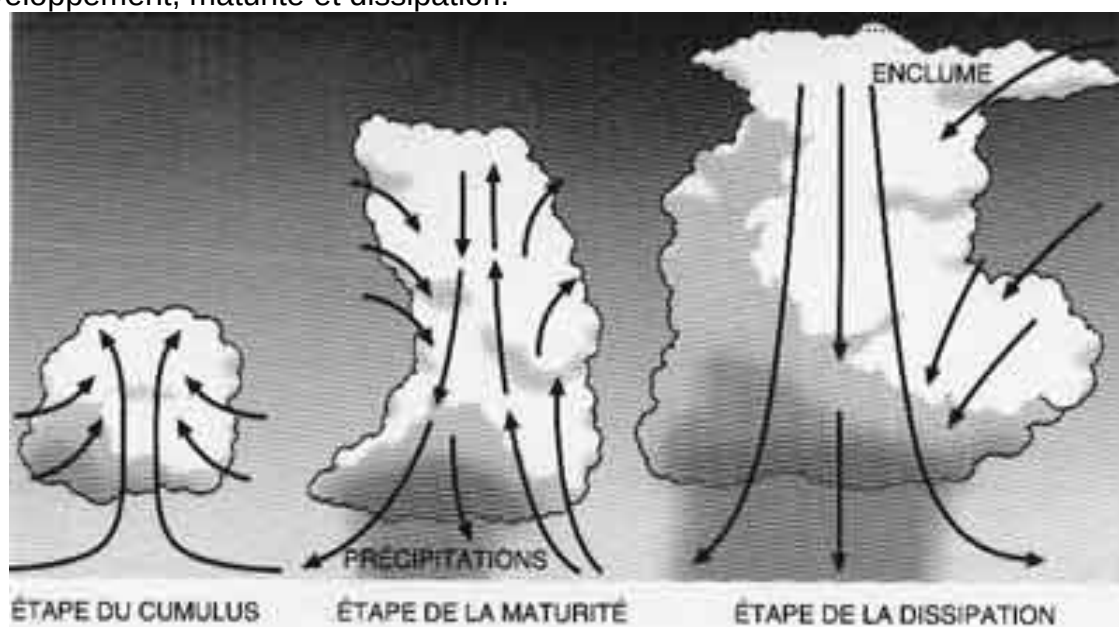


Figure 6 : Développement des cumulonimbus

Source : Meteolafleche

1.4.3.2 Le développement

Dans la phase de développement, le nuage, plus chaud que l'air ambiant, monte rapidement ; il accroît l'instabilité propre de la masse d'air originelle au fur et à mesure que la vapeur d'eau se condense en altitude. La chaleur latente de condensation (la condensation dégage de la chaleur) vient ainsi prendre le relais et le nuage atteint rapidement des altitudes où la température extérieure est très au-dessous de 0 °C. Dans les parties élevées du nuage, des courants ascendants supérieurs à 30 m/s sont alors fréquemment observés.

Après avoir dépassé l'isotherme (la ligne imaginaire où la température est de 0 °C), ce stade de développement vertical peut durer encore entre dix et vingt minutes, pendant lesquelles le nuage peut grimper jusqu'à une altitude de 10 km, et parfois davantage, à la limite donc de la tropopause. Par examen au radar, on observe des échos importants, correspondant à la présence de précipitations solides ou liquides, maintenues en altitude par les fortes vitesses verticales des ascendances.

Les plus grosses gouttes de pluie, à la limite de rupture par instabilité, ne dépassent pas 5 à 6 mm de diamètre, ce qui correspond à une vitesse limite de chute de l'ordre de 8 m/s au niveau du sol. Seuls les grêlons de diamètre et de poids plus importants ont des vitesses pouvant atteindre 20 ou 30 m/s.

1.4.3.3 La maturité

Lorsque l'accumulation de l'eau, à l'état solide ou liquide, devient telle que les courants ascendants ne peuvent plus la supporter, la pluie est prête à tomber et la phase de maturité commence avec les premières précipitations.

Des courants descendants prennent naissance, par suite de l'entraînement visqueux de l'air par les éléments de précipitation.

Ces courants descendants n'atteignent cependant pas les vitesses des courants ascendants. Ils sont localisés en général près du milieu de la partie frontale avant du nuage, sur sa trajectoire de déplacement ; l'air froid ainsi amené au sol se répand vers l'avant du nuage, et donne à l'observateur la sensation caractéristique d'un renversement de la direction du vent au sol, correspondant à une baisse de température. Immédiatement après, la pluie commence à tomber et s'intensifie rapidement puisque c'est dans cette zone frontale descendante que se localise au maximum la chute des éléments précipitants. Associés à cette zone de précipitation, on observe des rafales de vent et un accroissement brutal et passager de la pression. Pendant cette phase de maturité, dont la durée peut s'étendre d'un quart d'heure à plus d'une heure, la cellule orageuse peut se développer encore et atteindre des altitudes de 9 km à 15 km. Parfois, lorsque la méso-structure des cellules convectives du nuage est favorable et que la concentration en noyaux glaçogènes est insuffisante, la grêle peut se former, sous certaines conditions encore mal comprises.

La dissipation

Les courants ascendants et descendants coexistent ; ceux-ci finissent par l'emporter, et la phase de dissipation prend place. Les précipitations qui viennent de tomber au sol s'évaporent, refroidissant les basses couches de l'atmosphère et contraignant donc l'ascension.

Le nuage répand alors ses dernières précipitations décroissantes avec le déclin des ascendances qui les alimentaient. Il se "dissout" par évaporation dans le réchauffement adiabatique des courants descendants, ou bien se fragmente, en laissant un voile de cirrus à la partie supérieure et des débris inorganisés de nuages au voisinage du sol.

Cette dernière phase marque la fin de l'orage qui aura duré, la plupart du temps, environ 30 minutes à 2H. Exceptionnellement, certains orages peuvent durer plusieurs heures. Notons que il existe plusieurs types de cumulonimbus selon les conditions ou lieu de formation qui sont les : les cb de masse d'air, les cb orographiques, les cb frontales.

I.5 Les phénomènes météorologiques associés aux orages

Les phénomènes météorologique liés à l' orages sont les raison pour lequel les orages représente un danger pour l' aéronautique et la société, les phénomènes les plus dangereux pour l' aéronautique sont les turbulences au sein du nuages d'orages , la grêle les forte précipitation et quand ils se manifeste les tornade qui sont enfaite les phénomènes les plus dangereux pour l'aéronautique ,il est assez fréquent dans certains pays comme les USA mai assez rare à Madagascar.

1.5.1 La foudre

Même l'orage le plus bénin comporte par définition de la foudre. Celle-ci est une décharge électrique à travers l'air entre une partie du nuage et un autre ou le sol. Cette décharge se fait sous une haute tension, crée un plasma et cause des dégâts si elle passe à travers un objet. Lorsque la foudre va du nuage vers le sol, elle emprunte le chemin le plus court et frappe donc généralement le point le plus élevé de ce dernier. Lorsque foudroyé, un arbre, une maison ou un humain sera soumis à ce courant intense qui causera des dommages importants et souvent la mort.

Les accidents liés à la foudre sont rares avec les avions et les planeurs. Bien qu'ils puissent être frappés, ils constituent une cage de Faraday qui isole leurs occupants. Le courant suit donc l'extérieur de la carlingue et continue vers le sol ou un autre nuage.

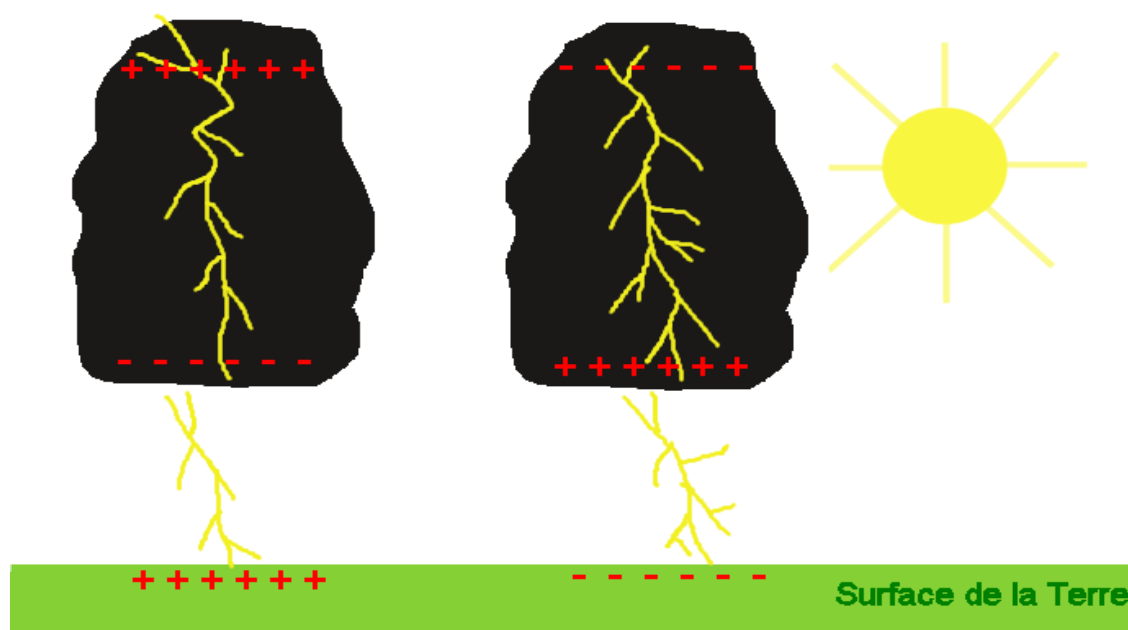


Figure 7 : Schémas représentatif de la foudre.

Source : meteolafleche

On voit très bien que la foudre ne peut surgir que si les charges électriques sont radicalement opposées. On ajoute entre les charges négatives et les charges positives l'énergie dégagée par les mouvements de convection verticaux : on obtient alors une différence de potentiel assez élevée permettant le cheminement de l'électricité.

Toutefois, aujourd'hui, on hésite quant à la répartition des charges négatives et des charges positives : on sait juste qu'il existe trois types de foudre :

- ☞ la foudre entre deux nuages.
- ☞ la foudre entre le nuage et le sol : dans ce cas, le sol chargé de signe contraire avant l'impact voit ses charges électriques changer de signes.
- ☞ la foudre à l'intérieur du nuage.

Quel que soit le type de foudre, la foudre peut culminer sous une différence de potentiel de 100 Millions de volts et 100 000 ampères et atteint de préférence les objets élevés (parce que la foudre choisit le chemin le plus court) tels que les arbres, les églises, les montagnes et les objets pointus (parce que ce sont les meilleurs conducteurs d'électricité).

1.5.2 L'éclaire

L'éclair est une lumière très vive qui compose la foudre. C'est donc une étincelle qui provient d'un cumulo-nimbus et qui peut se diriger soit vers un autre nuage, soit à l'intérieur de ce même nuage, soit le plus souvent vers la Terre : en fait, l'éclair traduit toutes les propriétés de la foudre.

Cependant, lorsqu'on observe l'orage, nous avons l'impression qu'un seul éclair jaillit du cumulonimbus : en fait, comme la vitesse de l'éclair est très grande (entre 40 et 50 km par secondes), il est impossible (ou presque de voir à l'œil nu tous les "petits éclairs») d'où la distinction de trois types d'éclair (comme la foudre):

- ☞ ceux qui se divisent en plusieurs branches : éclairs ramifiés.
- ☞ ceux qui ont une trajectoire légèrement rectiligne : éclairs fulminants.
- ☞ ceux qui ne vont pas droit vers leur cible : éclairs sinueux.

1.5.3 Le tonnerre

Le tonnerre est la manifestation d'un bruit sourd qui intervient plus ou moins longtemps après que la foudre ait frappée (la vitesse du son étant très inférieure à celle de la lumière : 340m/s contre 300 000 km/s) :ce bruit sourd est dû au réchauffement très rapide de l'air engendré par la foudre (dont la température dépasse les 30 000 degrés) : c'est comme si on avait laissé une casserole pendant un certain sur le gaz et qu'on l'avait tout d'un coup mouillée avec de l'eau plus froide .

De plus le tonnerre est très utile pour savoir à quelle distance se trouve le point culminant de l'orage : il existe plusieurs manières pour calculer la distance entre nous et l'orage :

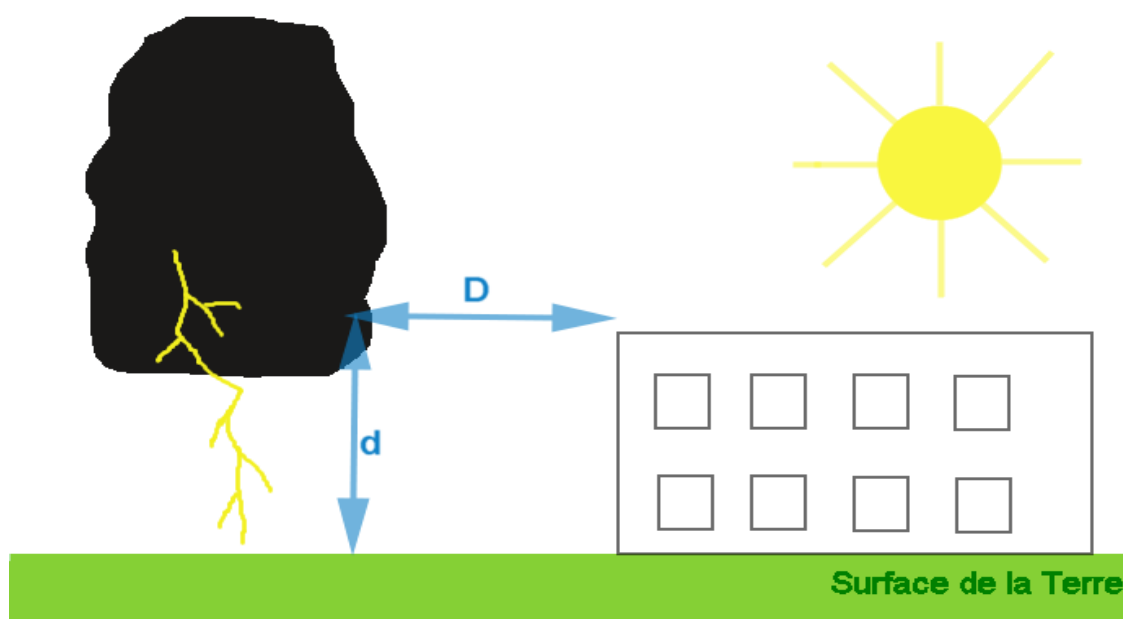


Figure 8 : Schéma tonnerre

Source : meteolafleche

- Première méthode :

Soit D la distance en mètres séparant de la maison.

On a alors :

$$D \text{ avec (Vitesse du son)} = 340 \text{ m/s}$$

(Intervalle de temps entre l'éclair et le tonnerre)

- Deuxième méthode (peu fiable) :

d est la distance parcourue par l'éclair entre le cumulonimbus et le sol terrestre.

$$D = d \cdot \cos 90 \text{ avec une vitesse de son} = 340 \text{ m/s}$$

(Temps mis par l'éclair pour atteindre le sol)

1.5.4 La rafale descendante (down burst)

Courant descendant allant sur le sol ou près du sol, ce qui provoque le plus souvent des rafales de vent dévastatrices.

Ces courants descendants, s'ils ont une intensité forte, ont la possibilité de s'écouler horizontalement au niveau du sol. L'air l'accompagnant étant très dense c'est de l'air froid qui s'infiltre au niveau du sol et s'enroule autour de l'air chaud.

Les courants descendants sont presque systématiquement des courants froids. Il existe deux types de rafales descendantes : les macrorafales («macroburst" en anglais) et les microrafales («microburst" en anglais).

- ☞ Les macrorafales s'étendent horizontalement sur au moins 5 km avec une intensité atteignant parfois les 200 km / h et durent en général pas plus de 30 minutes (parfois quelques minutes).
- ☞ Les microrafales s'étendent horizontalement sur moins de 5 km avec une intensité atteignant parfois les 280 km / h et durent en général moins de 10 minutes. Les microrafales ne sont pas détectés suffisamment bien par la technologie d'aujourd'hui pour effectuer un suivi particulier du fait de leur forte concentration dans le temps et dans l'espace. Des "burst swath" peuvent sévir sur une étendue inférieure à 400 m au sein des microrafales avec une intensité plus forte.

1.5.5 Le front de rafale (gust front)

C'est en fait le bord antérieur du courant froid laissant croire à un front froid qui est à l'origine de ce phénomène. Il a en moyenne une épaisseur de 800m mais fraîchissant jusqu'à 1 km lors de super cellules.

Repérable grâce à un nuage en forme de bourrelet (arcus) sous la base avant du Cumulonimbus, il est le siège de rotation des vents à 180° (rencontre air chaud-air froid).

D'importants gradients horizontaux de pression et de gradients verticaux de pression font que le vent souffle en rafales avec une intensité parfois supérieure à 100 km / h.

1.5.6 Turbulence associée aux Orages et Cb.

La turbulence est observée dans le Cb et autour de celui-ci. Le volume atmosphérique affecté par la turbulence peut s'étendre dans le cas d'un Cb isolé:

Latéralement jusqu'à 10 à 20 Nm.

Verticalement entre le sol et plusieurs milliers de pieds au-dessus de la limite supérieure de l'enclume.

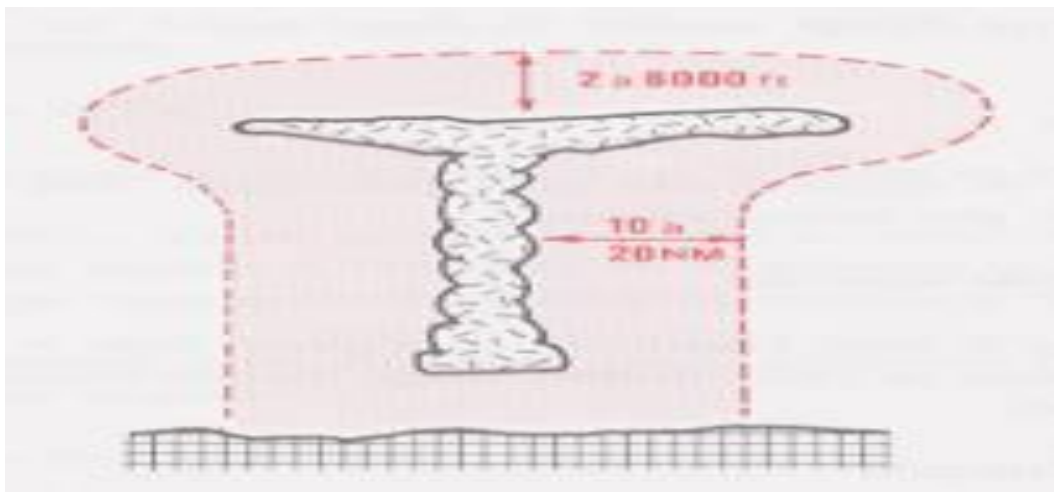


Figure 9 : Turbulence

Source : Auteur M.bielle

1.5.7 La turbulence dans la cellule orageuse

Le diamètre des cellules est de l'ordre de 1 à 5 Nm. Les vitesses verticales les plus fortes peuvent atteindre et dépasser:

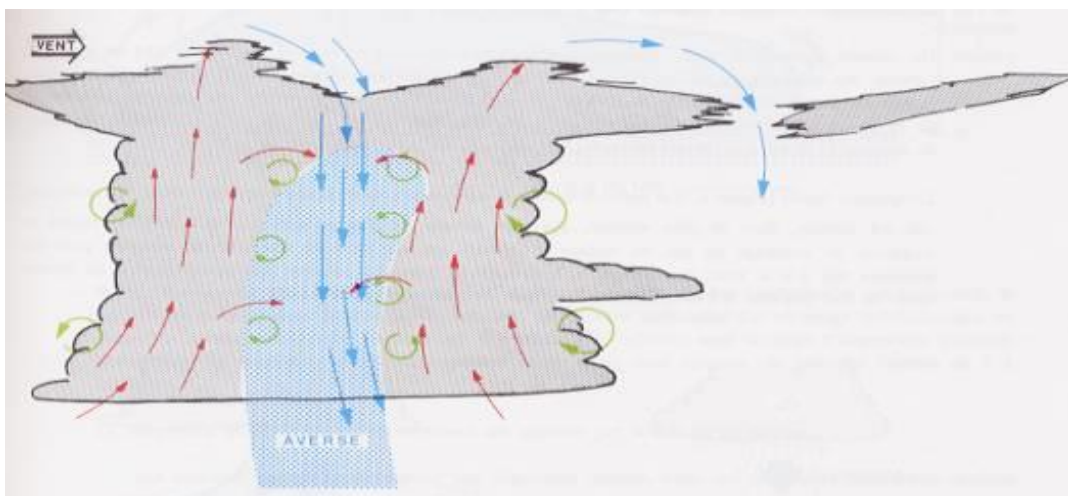


Figure 10 : Turbulence dans la cellule orageuse

Source : Auteur M.bielle

- ☞ Pour les courants ascendants : 35 m/s
- ☞ Pour les courants descendants : 15 m/s

1.5.8 Turbulence sous le Cb

Sous le CB les cellules rencontrées sont à différents stades et il se côtoie de fortes ascendances et suite à l'expulsion froide que constitue l'averse de fortes descendances ou rabattants. La rotation du vent à l'approche du Cb peut être brusque et de forte intensité provoquant un cisaillement de vent préjudiciable aux aéronefs.

L'aspiration du Cb en tête de son déplacement peut-être suivie brusquement en opposition par la rafale dégagée par l'averse et le courant descendant interne.

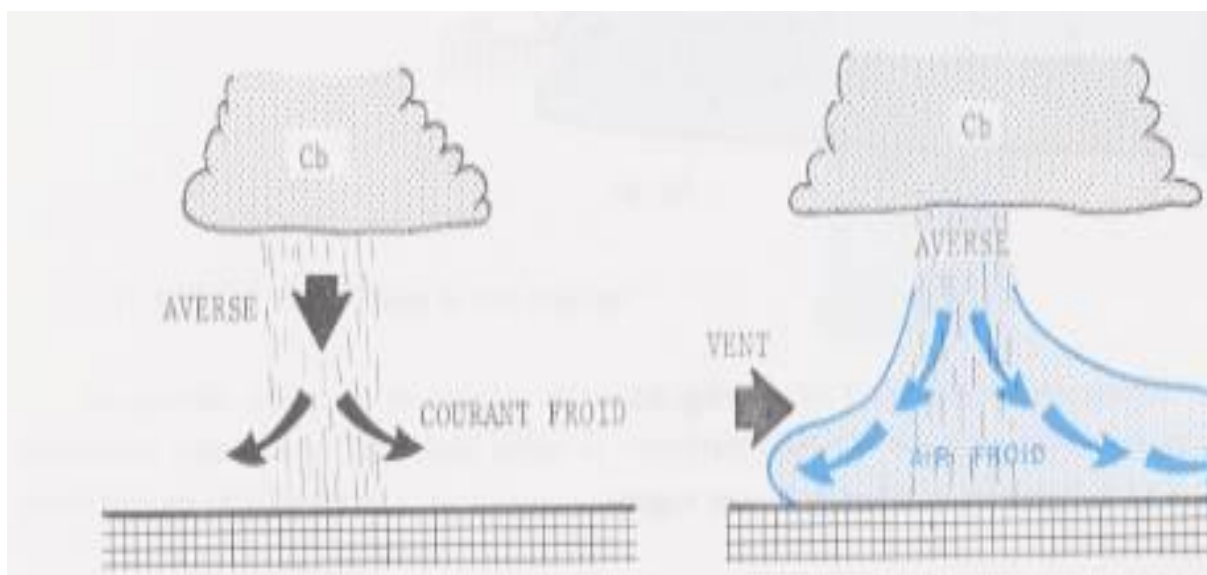


Figure 11 : Turbulence sous le Cumulonimbus

Source : M.bielle

1.5.9 Les précipitations dues aux orages

1.5.9.1 La pluie

La quantité de pluie sous un orage est variable selon son type mais se produit toujours rapidement. Cependant, le relief de la région où il tombe peut influencer l'effet de celle-ci. Dans les zones montagneuses, le ruissellement dans les pentes peut amener des inondations dans la vallée en concentrant les quantités reçues vers une région restreinte. La déforestation et la saturation des sols vont accentuer les effets d'une pluie sous un orage. La pluie peut causer une liquéfaction du sol dans certaines conditions, ce qui donnera des coulées de boue.

En aviation, il existe des exemples d'écrasements sous des orages, dont celui du Vol 358 Air France à Toronto (Canada) en août 2005, où la pluie semble avoir mené également à de l'aquaplanage ce qui lui a fait manquer de freinage et sortir de piste.

1.5.9.2 La grêle

La grêle constitue une précipitation de grêlons, le grêlon : particule de glace d'un diamètre généralement compris entre 5 et 50 millimètres, certains peuvent atteindre les 15 cm.

- ☞ La masse volumique est de l'ordre de 0,85 à 0,90 g/cm
- ☞ La masse des plus gros peut avoisiner le kilogramme.
- ☞ Formation

La condition première à l'apparition de grêlons est la présence de quantité importante d'eau liquide en surfusion rencontrée au sein des puissants mouvements verticaux ascendants que l'on retrouve au niveau d'un cumulonimbus.



Figure 12 : La grêle

Source : Thunderstorm forecasting

Moins de 10% des cumulonimbus donnent de la grêle atteignant le sol.

1.5.9.3 La neige

Il est question d'orage de neige quand de nuage convectif se forme en hiver dans de l'air très instable et donne des précipitations neigeuses accompagnées de manifestations électriques comme le tonnerre et des éclairs.

Ce phénomène est relativement rare mais il peut être trouvé dans une masse d'air très froide, et donc polaire, rencontrant des zones plus chaudes et humides.

I.6 Classification générale des orages

On distingue d'une manière générale quatre types d'orages :

- ☞ les orages de masse d'air,
- ☞ les orages orographiques,
- ☞ les orages frontaux,
- ☞ les orages d'occlusions

I.6.1 Les orages de masse d'air

Les Cb se développent au sein d'une masse d'air homogène surtout l'été lorsque le sol est réchauffé. Une cellule d'air se réchauffe au contact du sol ensoleillé et développe une ascendance (convection) qui génère de façon isolée un CB, ou une masse d'air humide et froide se réchauffe ponctuellement au contact d'un sol surchauffé et développe une cellule orageuse.



Figure 13 : Les orages de Masses d' air

Source : Auteur M.Bielle

I.6.2 Les orages orographiques

Tout relief montagneux impose aux masses d'air en mouvement un soulèvement brutal. Si la masse d'air soulevée est préalablement en instabilité convective des Cb se développent au vent de la montagne. Lorsque le courant de basse et moyenne troposphère est perpendiculaire à la chaîne de montagne, les Cb s'organisent suivant la ligne de crêtes formant parfois une muraille quasi continue.

L'activité orageuse des Cb orographiques se conserve jour et nuit en passant par une valeur maximale au cours de l'après-midi. Ce qui est le cas des orages des hauts plateaux de Madagascar à Antananarivo

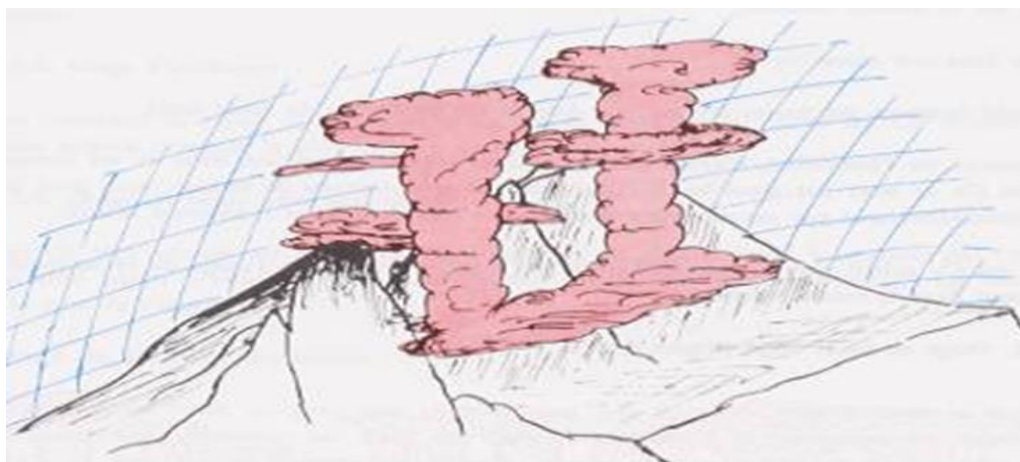


Figure 14 : Les orages orographique

Source : M.bielle

1.6. 3 Les orages frontaux

Nous avons vu dans l'étude de la frontologie comment les masses d'air subissaient des évolutions verticales en se superposant. En se rappelant les différences de pentes entre le front chaud et le front froid on peut en déduire :

Que dans les fronts chauds :

- ☞ Le lent soulèvement provoque des Cb épars sur la surface frontale
- ☞ Ils sont noyés dans une masse de Ns
- ☞ L'activité est moins intense que dans le front froid.

Ne pouvant les distinguer facilement, l'usage du radar météo est indispensable pour éviter les noyaux actifs.

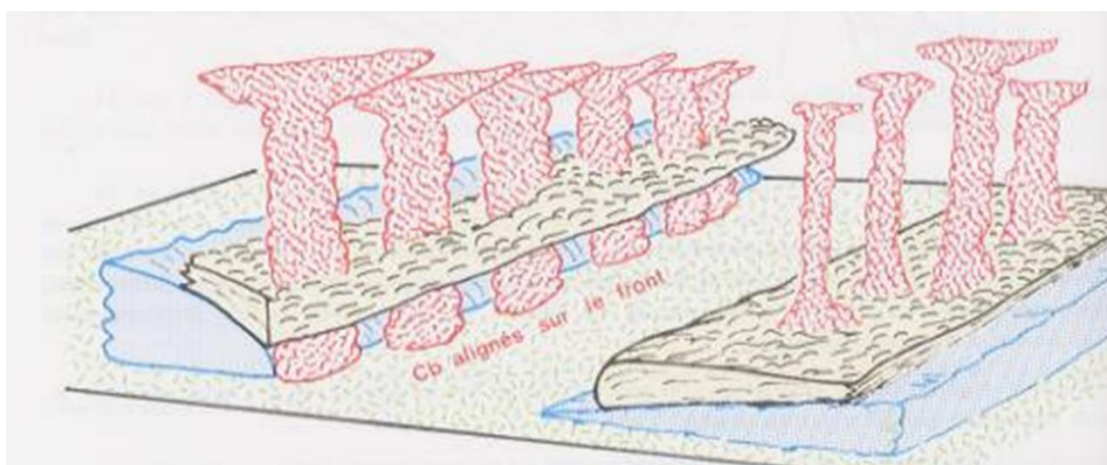


Figure 15 : Les orages frontaux

Source :M.bielle

Sur le front froid la pente de la surface frontale est plus accentuée, le soulèvement de l'air chaud est énergique, il s'en suit que les Cb sont alignés le long du front froid sur plusieurs centaines de km de longueur et plusieurs dizaines de profondeur.

Pouvant être soudés les uns aux autres comme pour les Cb Orographiques ils en diffèrent à cause du mouvement de translation qui peut atteindre 30 à 40 kT.

Sur le plan aéronautique ces orages forment un danger majeur tant dans le Cb qu'au voisinage de ceux-ci.

Les orages d'occlusion sont atténués par la dégénérescence du front ou frontolyse. Ils se forment dans la vallée chaude rejetée en altitude et sont noyés dans la couche de Ns.

I.7 Cellule / Système

Cellules orageuses et de système orageux :

- ❖ les cellules orageuses sont des cellules isolées (entre 1km et 80km de largeur - environ)
- ❖ un système orageux est toujours composé d'une seule ou de plusieurs cellules orageuses organisées entre-elles (entre 1km et +1000km de largeur - environ).

Il existe plusieurs systèmes orageux:

- ❖ un (système orageux) monocellulaire est composé d'une seule cellule orageuse et d'un seul nuage cumulonimbus.
- ❖ un (système orageux) multicellulaire est composé de minimum 2 cellules orageuses.
- ❖ un (système orageux) supercellulaire est composé d'une seule cellule orageuse et qui possède un méso-cyclone, c'est à dire une rotation profonde et durable de la colonne ascendante, surtout dans la partie basse de la cellule orageuse

I.8 Echelle d'intensité des orages

La nouvelle échelle est bâtie sur 5 niveaux et conserve comme pivot la définition nord-américaine de l'orage fort (severe storm). Les critères de classement sont les suivants :

ORAGES FAIBLES : orages peu intenses, ne générant pas de grêlons de diamètre supérieur à 1 cm, ni de rafales convectives supérieures à 58 km/h, ni de tornade, ni de pluies intenses productrices d'inondations.

ORAGES MODERES : orages accompagnés de grêlons de 1 à 2 cm de diamètre, et/ou de rafales convectives de 58 à 89 km/h, mais sans tornade, ni pluies intenses productrices d'inondations.

ORAGES FORTS : orages accompagnés de grêlons de 2 à 4 cm de diamètre, et/ou de rafales convectives de 90 à 119 km/h, et/ou de tornade d'intensité EF0 ou EF1, et/ou de pluies intenses productrices d'inondations (typiquement > 50 mm/1h).

ORAGES VIOLENTS : orages accompagnés de grêlons de 5 à 9 cm de diamètre, et/ou de rafales convectives de 120 à 149 km/h, et/ou de tornade d'intensité EF2 ou EF3.

ORAGES EXTREMES : orages accompagnés de grêlons de plus de 10 cm de diamètre, et/ou de rafales convectives de plus de 150 km/h, et/ou de tornade d'intensité EF4 ou EF5.