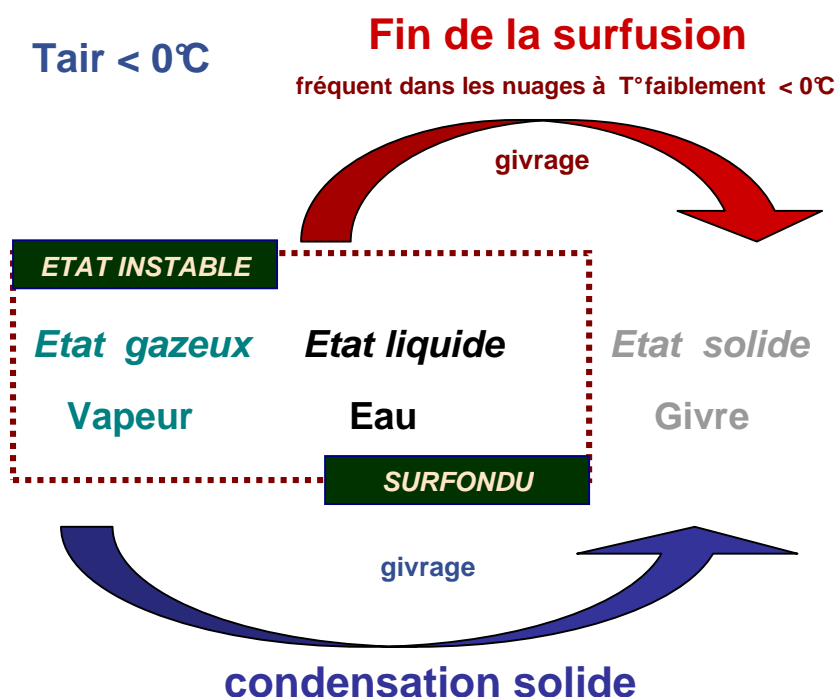


## QU'EST CE QUE LE GIVRAGE ?



Le **givrage** est dû à la **présence d'eau** sous forme **liquide** à des **températures négatives**.

En **impactant**, elle se transforme en **glace** : il y a **accrétion** sur l'avion.



La **congélation** est le processus par lequel l'eau passe de son état liquide à son état solide.

La **condensation solide** est le processus par lequel l'eau passe de son état gazeux directement à son état solide.

Les gouttelettes liquides ne se congèlent pas nécessairement à 0°C ; elles peuvent rester à l'état **surfondu**, c'est-à-dire sous forme de gouttes liquides à température négative. Cet état instable cesse lorsqu'il y a contact sur un objet, ou au contact d'un noyau glaçogène (particule microscopique qui agit comme déclencheur de la congélation de la gouttelette).

## PARAMETRES INFLUENTS

### LE CONTENU EN EAU LIQUIDE ( CEL ) OU LIQUID WATER CONTENT ( LWC )

- Le **CEL** exprime la quantité d'eau liquide condensée présente dans un mètre cube d'air humide (g/m<sup>3</sup>)
- Le **CEL** n'est pas homogène et varie rapidement dans les nuages stables **et** instables, le long d'une trajectoire horizontale du nuage, dans l'épaisseur d'un nuage

### Ordre de grandeur du CEL

**Nuages stables (St, As, Ns) :** de 0,1 à 0,5 g/m<sup>3</sup>

**Brume et brouillard :** de 0,1 à 2 g/m<sup>3</sup>

**Nuages instables (Cu, Ac, Cb) :** de 1 à 5 g/m<sup>3</sup> ( jusqu'à 15 g/m<sup>3</sup> dans certains nuages instables tropicaux )

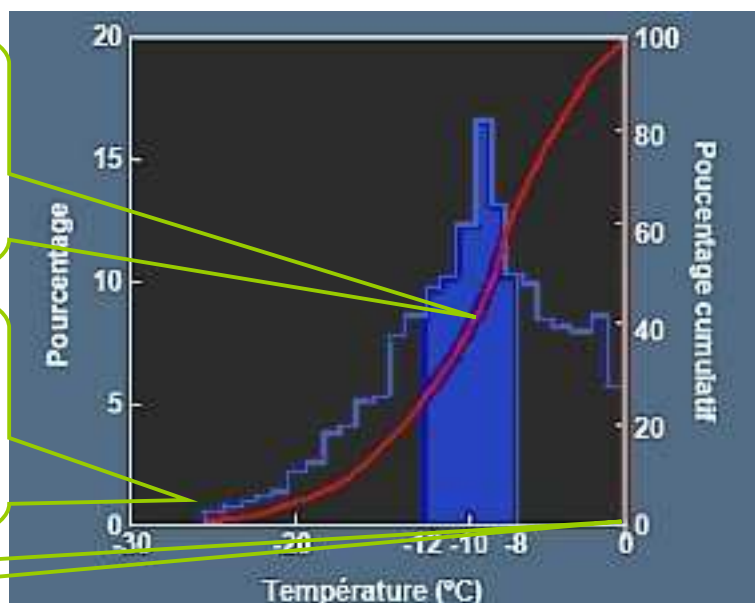
**Précipitations :** quantités supérieures

### LA TEMPERATURE

Entre 0° et -12° - 15°C très peu d'aérosols constituent des noyaux glaçogènes. L'eau condensée est majoritairement liquide et surfondue. Le nuage présente **un fort potentiel givrant.**

**Pas d'eau liquide surfondue à T < - 40°C**, les noyaux glaçogènes sont tous actifs à partir de - 35°C. On peut considérer que **le potentiel givrant est nul en dessous de - 35°C.**

L'eau ne congèle qu'à des **T° négatives**



Rapport eau liquide condensée / glace condensée + eau liquide condensée

### LA TAILLE DES GOUTTES



La **taille** des gouttelettes nuageuses **conditionne l'accrétion** (captation, forme et zone contaminée) et donc la sévérité.

A partir de **40 microns** une gouttelette devient **goutte (SLD)**.

Au delà de **200 microns** → **précipitations surfondues** (FZDZ et FZRA).



## DIFFERENTS TYPES DE GIVRE

### GELEE BLANCHE « HOAR FROST »



Aspect : cristallin en forme **d'aiguilles, d'écailles ou de plumes** qui la rend friable.

Formation : **condensation solide**, passage direct de la vapeur d'eau en cristaux de glace. Peut se produire en dehors des nuages

Conditions météo : anticycloniques en hiver, par nuits froides et peu ventées

Conséquences : l'accrétion apparaît au sol sur un avion au parking par des températures froides. Ou lors d'une descente ou d'une montée rapide dans une couche humide lorsque l'avion est froid.

Sévérité : le givrage associé est généralement **faible**.

### GIVRE BLANC « RIME ICE »

Aspect : blanc et **opaque**, plutôt **friable** et fragile.

Formation : sur une surface froide, dans un milieu nuageux homogène froid. Les gouttelettes en surfusion **congèlent très rapidement** et *emprisonnent beaucoup d'air* en touchant l'avion.

Conséquences : le givre s'accumule en pointe sur les parties exposées (bords d'attaque, etc...). Il s'entasse et s'étend vers l'avant.

Sévérité : le givrage associé est généralement **faible à modéré**.

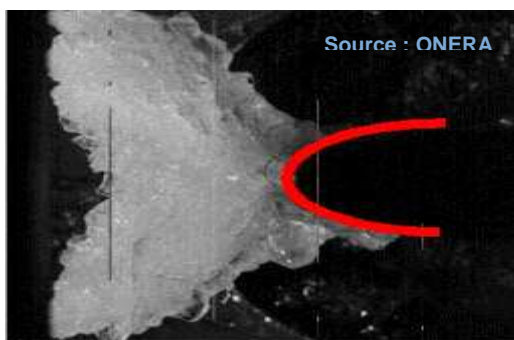


### GIVRE DUR OU CLAIR OU TRANSPARENT « CLEAR ICE »

Aspect : **homogène**, lisse, **transparent**, compact et **très solide** par absence d'inclusion d'air

Formation : sur une surface froide, dans un milieu nuageux homogène, les gouttelettes en surfusion s'étalent et **congèlent lentement**

Conditions météo : T° **proche de 0°C**, avec un contenu en eau liquide CEL important



Conséquences : création de formes. **Le dépôt peut s'étaler** en dehors des zones dégivrées

Sévérité : le givrage associé est généralement **modéré à fort**.

## DIFFERENTS TYPES DE GIVRE

### GIVRE MIXTE « MIXED ICE »



Aspect : givre **hétérogène**, avec des accrétions de glace claire et compacte mêlées à des accrétions plus blanches et friables

Conséquences : similaires au givre transparent

Formation : sur les surfaces froides, dans un milieu nuageux **hétérogène** où varie la température et la taille des gouttes

Sévérité : le givrage associé est généralement **modéré à fort**.

### VERGLAS “GLAZE ICE” ( LIÈS A LA PLUIE GIVRANTE « FREEZING RAIN » OU BRUINE GIVRANTE « FREEZING DRIZZLE »)



Aspect : identique au givre transparent, couche de **glace dure**

Formation : **précipitations surfondues** se congelant à l'impact – grosses gouttes

Conséquences : similaires au givre transparent – tout l'avion peut être touché.

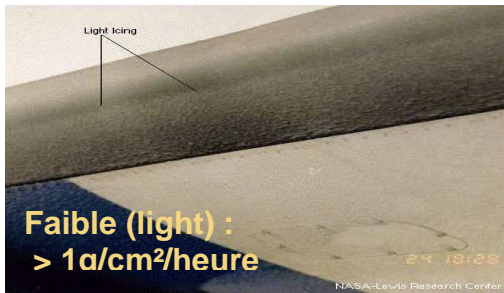
Conditions météo : **perturbations**

Sévérité : le givrage associé est généralement **fort**.

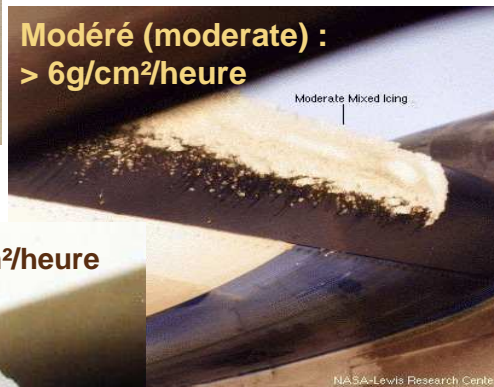




## INTENSITE DU GIVRAGE



**FAIBLE (LIGHT)** n'implique pas de contraintes particulières sur la conduite de l'avion



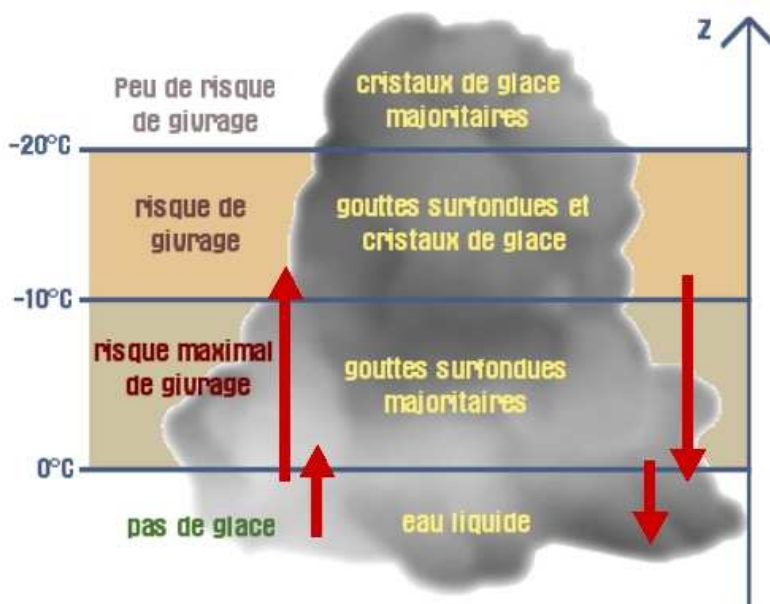
**MODERE (MODERATE)** conditions de givrage pouvant amener l'équipage à juger utile de changer de cap ou d'altitude



**FORT (SEVERE)** conditions de givrage amenant l'équipage à changer **immédiatement** de cap ou d'altitude

L'intensité du givrage est cependant difficile à quantifier. Lorsque les conditions d'intensité « faible » durent, le risque lié au givrage augmente. De plus, cette classification se base sur les conséquences pour l'avion au cours d'un vol et non sur les conditions météorologiques mises en cause.

Il faut retenir qu'il n'y a pas « une » sévérité de givrage pour tous les avions passant dans la même zone. Il y a des conditions givrantes qui, selon le type d'avion, la phase du vol, sa vitesse, le moment où il traverse la zone, et les conditions rencontrées au préalable vont provoquer un givrage plus ou moins fort.



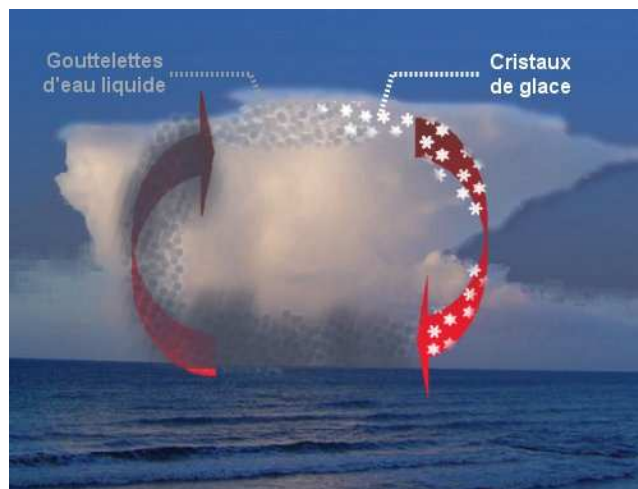
La présence et la quantité de gouttelettes sont conditionnées par la température de l'atmosphère. Le nombre de gouttelettes surfondues est plus important près de l'iso 0°C. Des mouvements ascendants et descendants brassent les cristaux de glace et les gouttelettes entre les différentes altitudes, ceci alimente le nuage en gouttelettes d'eau surfondue. L'importance des **mouvements augmente** le **brassage** et permet de trouver **des gouttelettes surfondues** à des températures allant en moyenne **jusqu'à -20°C**.

## CONDITIONS METEOROLOGIQUES FAVORABLES

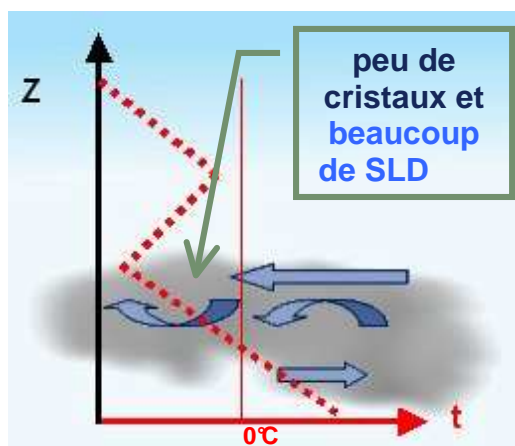
### NUAGES INSTABLES CONVECTIFS : CB Cu Sc Ac

Des forts **mouvements ascendants** entraînent les gouttelettes d'eau des basses couches vers des niveaux **où les températures sont négatives**.

On est en présence d'eau liquide surfondue



### INVERSION DE TEMPERATURE

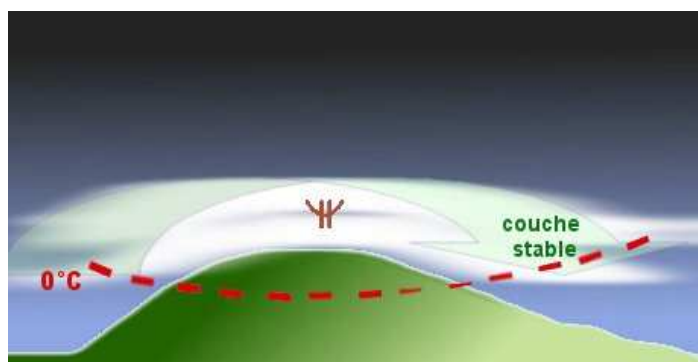
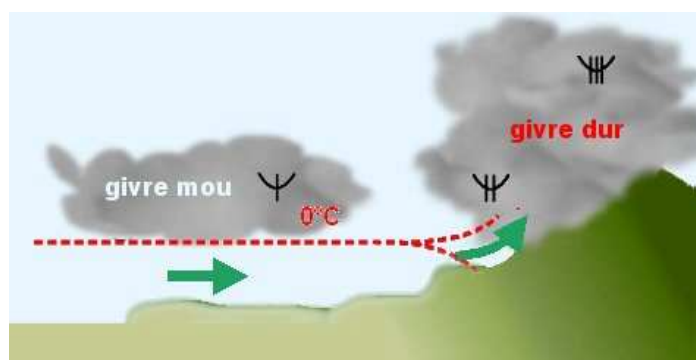


L'**inversion bloque** le transport **vertical** et **favorise** un fort **contenu en eau** vers le sommet du nuage ainsi que la présence de **grosses gouttelettes** (SLD super liquid droplets).

### OROGRAPHIE

Le potentiel givrant augmente au-dessus des montagnes, en raison du soulèvement.

Au soulèvement au vent, le niveau de l'isotherme 0°C s'élève avec de l'air instable et descend avec de l'air stable



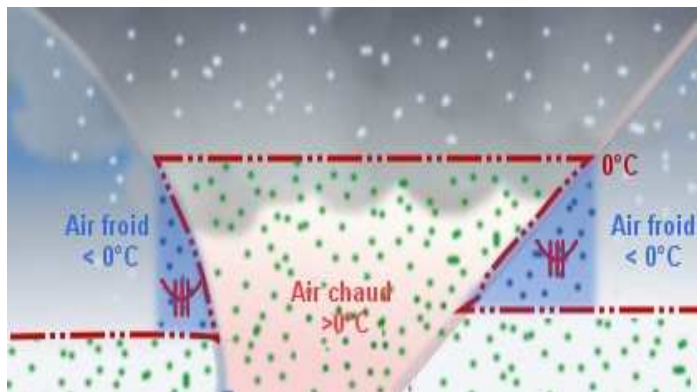
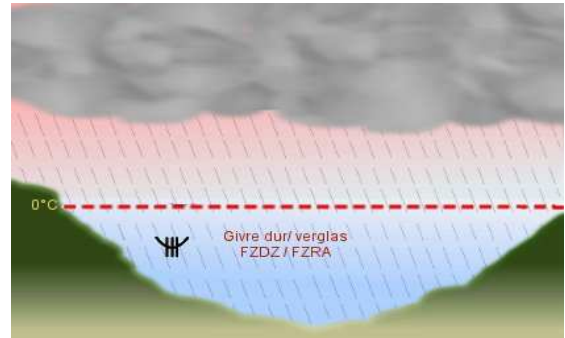
Les nuages **stables** de soulèvement **orographique** peuvent concentrer beaucoup **d'eau liquide surfondue**.



## CONDITIONS METEOROLOGIQUES FAVORABLES

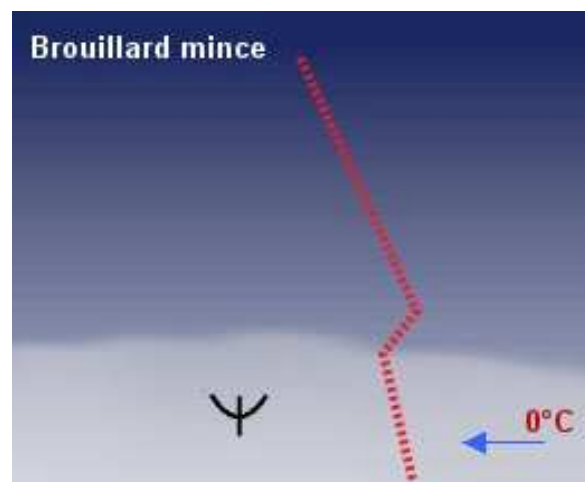
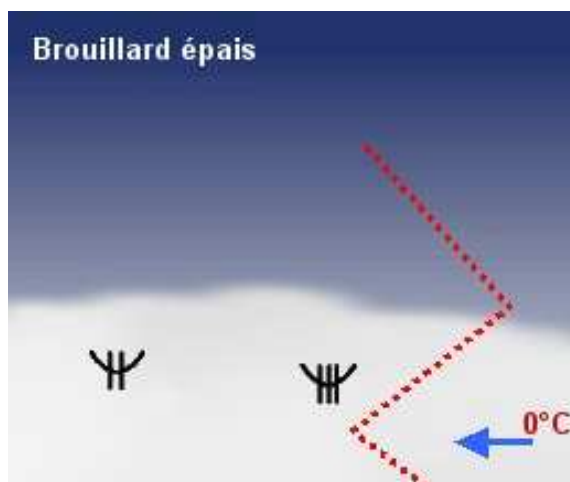
### OROGRAPHIE

L'air froid reste dans les vallées et est surplombé par des arrivées d'air chaud humide et précipitant, **produisant du verglas.**



Les régions de **fort potentiel givrant** sont généralement plus étendues **devant les fronts chauds, au cœur des occlusions**

### BROUILLARD GIVRANT



Le **brouillard** sera d'autant plus **givrant** que le **refroidissement** est **important et rapide**

## POUR UNE BONNE COMPREHENSION MUTUELLE : LES DIFFERENTS POINTS DE VUE



Le **scientifique** (recherche météorologique) parle de **POTENTIEL GIVRANT**

- Contenu en eau liquide, taille de gouttes, température
- Stabilité /instabilité

Le **météorologiste** (en opérationnel) parle de **CONDITIONS GIVRANTES**

- Observation, image satellite, image radar,
- Prévion : Modèle numérique de prévision qui donne des champs de températures, d'humidité et de vitesse verticale à différents niveaux et échéances
- Outils élaborés : fusion de données



Le **pilote** parle de **GIVRAGE**, d'accrétion de givre, de comportement sur l'avion, d'anti-givrage, de dégivrage, du type, de la certification de l'avion, des contraintes extérieures : niveau de vol, vitesse...

**Le météorologiste établit un diagnostic** sur les conditions givrantes de l'atmosphère. Il qualifie, localise et quantifie le phénomène à partir de paramètres pertinents (température, estimation de CEL...).

**Information adaptée aux usagers  
aéronautiques**

**Retour d'expérience aéronautique \*\*  
nécessaire à l'amélioration des prévisions**

La partie **aéronautique évalue le risque** selon l'avion, le pilote, le contrôleur, le responsable aéroport ou plus généralement le système aéronautique.  
**Les effets induits**  
réclament des décisions opérationnelles appropriées pour éviter la dégradation de la sécurité.



**\*\*Ce retour d'information**, primordial pour valider les méthodes et les outils de la prévision et faire progresser la qualité du service météorologique fourni à l'aviation **se fait en cours de vol** par le biais de rapports AIREP transmis **par radio à la tour de contrôle puis après l'atterrissage sur Aeroweb©** ( <https://aviation.meteo.fr> )

Il faut donc garder à l'esprit que le prévisionniste détermine des conditions givrantes, c'est-à-dire des zones où toutes les conditions sont réunies pour qu'il y ait accréation de givre sur l'avion à partir des paramètres pertinents dont il dispose. Cependant, en raison du caractère instable de l'eau surfondue, et des paramètres propres à l'avion (phase de vol, vitesse, type d'avion, temps passé dans les conditions, ...) les conséquences ne seront pas nécessairement les mêmes pour deux avions différents. Le pilote doit adapter sa vigilance en fonction des propres paramètres de l'avion.

## SIGNALEMENT SUR LES PRODUITS DE METEOROLOGIE AERONAUTIQUE

### DANS LES MESSAGES METAR, TAF ET SPECI

Dans le groupe « temps présent » ou « prévu » ou « récent significatif » :  
 FZ, suivi des descripteurs des temps présents (DZ, RA, FG, etc.)

### SUR LES TEMSI (CARTES DE TEMPS SIGNIFICATIF) EUROCC ET FRANCE (BASSES COUCHES)

Attention également aux symboles :

Givrage modéré 

Givrage fort 

Pluie se congelant 

Brouillard givrant 

# LA GRÊLE

## Définition

La **grêle** constitue une précipitation de **grêlons**.

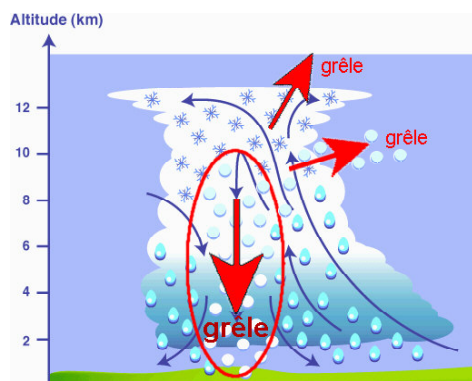
Le **grêlon** :

- **particule de glace** d'un diamètre généralement compris entre **5 et 50 millimètres**, certains peuvent atteindre les 15 cm.
- **masse volumique** de l'ordre de 0,85 à 0,90 g/cm<sup>3</sup>. 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**.



Moins de **10%** des cumulonimbus donnent de la grêle atteignant le sol mais on peut estimer qu'un pourcentage beaucoup plus important fabrique de la grêle sans que celle-ci ait le temps d'atteindre le sol.

Plus rarement des grêlons peuvent être **éjectés latéralement**, notamment dans la partie supérieure du nuage sous l'enclume, et **verticalement** par le sommet.

## Situations météorologiques favorables

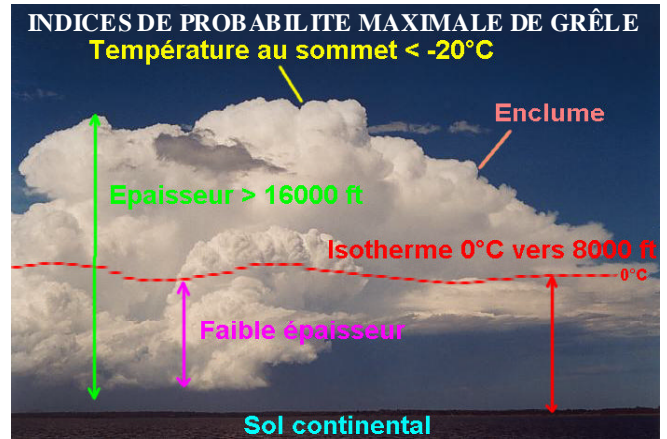
La grêle est toujours définie comme étant liée à la présence d'un **cumulonimbus**. En réalité, les limites ne sont pas aussi tranchées et la production de grêlons peut se réaliser bien avant que le stade de cumulonimbus soit atteint. La prudence est donc de mise face à un **cumulus congestus** (TCU) ou un **altocumulus castellanus** bien développé verticalement.

## Des indices de grêle

Quelques indices basés sur des éléments statistiques et des méthodes empiriques permettent d'appréhender le « risque » de grêle :

### Probabilité maximale en région tempérée:

- de la **fin du printemps** au **début de l'été**,
- au-dessus des **régions continentales** plutôt que maritimes,
- nuage **épais** (au moins 16000 ft),
- température au sommet **froide** (inférieure à  $-20^{\circ}\text{C}$ ),
- partie sommitale au stade de l'**enclume**,
- influence de la hauteur de l'**isotherme  $0^{\circ}\text{C}$**  (grêlons les plus gros pour un iso  $0^{\circ}\text{C}$  voisin de 8000 ft),
- **entre 11500 et 35000 ft** zone de formation des grêlons (cellule grêligène),
- **cisaillement du vent** entre les basses couches et le sommet de la troposphère, **un vent fort vers la tropopause** ou des conditions anticycloniques (divergence) d'altitude.

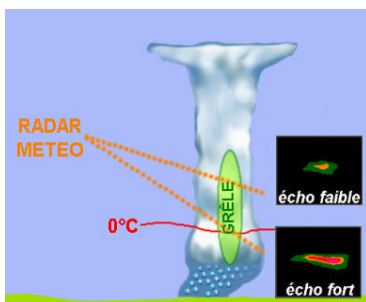


## Moyens d'observation embarqués

Seul le **radar météorologique** permet de « visualiser » la présence de grêle.

Nombreux **problèmes d'interprétation** du signal reçu car la grêle selon sa composition est un **très inégal réflecteur** du signal radar :

- un grêlon **entièrement constitué de glace** offre une **réflectivité radar très faible**,
- **recouvert d'une pellicule d'eau** par fusion, la **réflectivité augmente** rapidement jusqu'à devenir identique à celle d'une goutte de pluie de même dimension.
- il est difficile si ce n'est **impossible de distinguer les grêlons de petites tailles des gouttes de pluie**.
- Par contre, un signal radar très fort appelé « **bande brillante** » peut être la signature d'une **zone de gros grêlons** surtout si celui-ci est rencontré **au voisinage de l'isotherme  $0^{\circ}\text{C}$** .



Ce qui explique qu'en vol, le **balayage vertical** (par une fonction appelée **TILT**) du radar météo embarqué est fortement recommandé pour détecter une zone de grêle.

De manière générale, tout indice d'une **manifestation orageuse de forte intensité** dans l'environnement proche (présence de CB bien développé, activité électrique, forte turbulence, forte précipitation,...) doit laisser supposer la **présence de grêle**.

Tout équipage qui rencontre au cours de son vol de la grêle doit impérativement et immédiatement en informer les services compétents par un message **AIREP SPECIAL**

## Signalisation par les services météorologiques

### Observation et prévision au sol

*Messages d'observation d'aérodrome METAR et SPECI*

Ex. : METAR LFBO 131500Z 21012KT 6000 **TSGRRA** FEW010 BKN015**CB** 25/22 Q1005=

*Messages de prévision d'aérodrome TAF*

Ex. : TAF LFBO 131100Z 131221 20004KT CAVOK BECMG1416 SCT020**CB** SCT100 TEMPO 1518 24015G35KT 5000 **TSGRRA** BKN015**CB**=

**CB** cumulonimbus au-dessus du terrain ou à proximité

**TS** orage (activité électrique) au-dessus du terrain ou à proximité

**GR** grêle au lieu d'observation

### Observation et persistance ou prévision en route

*Messages SIGMET*

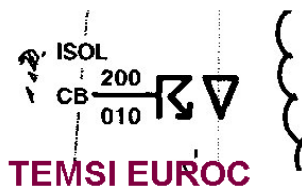
LFMM SIGMET NR 2 VALID 270800/271200 LFMM

FIR MARSEILLE **EMBD TS GR** OBS ON MAR BTN FRANCE AND CORSICA TOPS FL360 MOVE NE INTSF=

Le code **GR** indique l'observation et la persistance ou la prévision de grêle en route


### Prévision en route

*Cartes de temps significatif TEMSI ou SIGWX*



Le symbole  ou la mention **CB** implique turbulence, givrage modérés ou forts et **grêle**.



Le symbole  indique une prévision de grêle en surface (uniquement sur les TEMSI basses altitudes).

### Observation satellite et radar

L'image satellite, que ce soit dans les domaines du visible ou de l'infrarouge, **ne permet pas la détection explicite de la grêle**. Cependant, **un météorologiste qualifié** peut détecter des **indices d'occurrence** de grêle fonctions de la dynamique des cellules orageuses et de leur intensité. La

présence d'un radar météorologique au sol peut donner une information complémentaire sur l'activité de ces cellules mais uniquement dans les basses couches de l'atmosphère.

### Conséquences aéronautiques

Les **dégâts** sont en rapport avec la **vitesse de chute** des grêlons et donc de leur taille :

- avec un diamètre de 2 cm,  $v_z = 75$  km/h,
- avec un diamètre de 5 cm :  $v_z = 115$  km/h
- avec un diamètre de 10 cm :  $v_z = 160$  km/h

Un cumulonimbus peut fabriquer en quelques minutes quelques **300 milliards de grêlons** représentant une masse totale de **50.000 tonnes de glace**.

Les dégâts peuvent être:

- l'arrêt voir la **destruction des moteurs**,  
→ La certification JAR-E 790 impose aux turboréacteurs de pouvoir ingérer pendant moins de 5 secondes et à pleine puissance dix grêlons de 25 mm et dix de 50 mm par m<sup>2</sup> de surface sans qu'aucune perte de poussée ne soit tolérée.
- la **perte des moyens de communication** par le bris des antennes,
- le **bris des vitres** du cockpit,
- le **bosselage de la cellule** et de toutes les surfaces exposées à la grêle notamment au niveau du bord d'attaque des ailes.





## Rubrique d'aide des terminaux Aéroweb : INTERPRETATION DE L'IMAGERIE SATELLITE et RADAR

### 1. IMAGERIE SATELLITE

#### Pour toutes les images satellite

L'imagerie satellite doit, au sens de la réglementation, être considérée par l'utilisateur comme une observation météorologique dont les limites sont rappelées par l'annexe 3 OACI, paragraphe 4.1.9.

D'une manière générale, la complexité des images issues des satellites, rend délicate leur interprétation météorologique, notamment en raison de l'existence d'artefacts ou de nuages élevés masquant les couches nuageuses inférieures.

#### Image visible

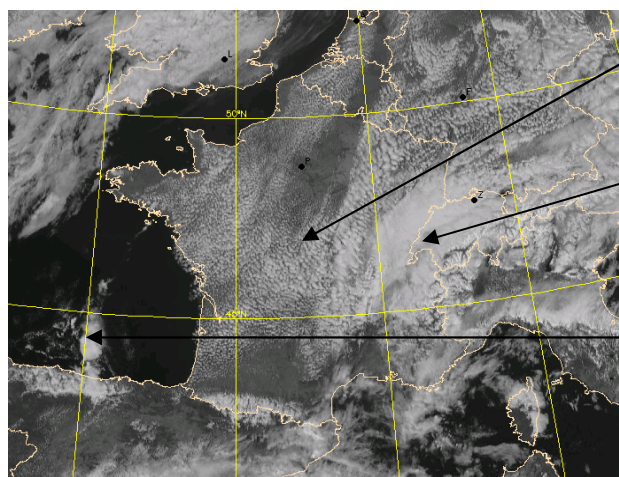
Cette image prise dans les canaux visibles, visualise, en première interprétation, la densité des masses nuageuses éclairées par le soleil (quantité de lumière réfléchiée par les nuages ou la surface de la terre). Elle ressemble à une photographie noir et blanc.

#### Exemple de lecture d'une image canal visible :

La mer apparaît en noir (ou très foncée) car l'eau est un mauvais réflecteur.

Les sols (donc les zones sans nuages) apparaissent dans une gamme de gris. Les systèmes nuageux apparaissent très blancs, d'autant plus blancs qu'ils sont épais.

Ces images sont inexploitable la nuit (elles sont noires sans soleil).



Traîne, nuages cumuliformes

Front surmonté par bande de cirrus épais

Amas convectifs (Cb)

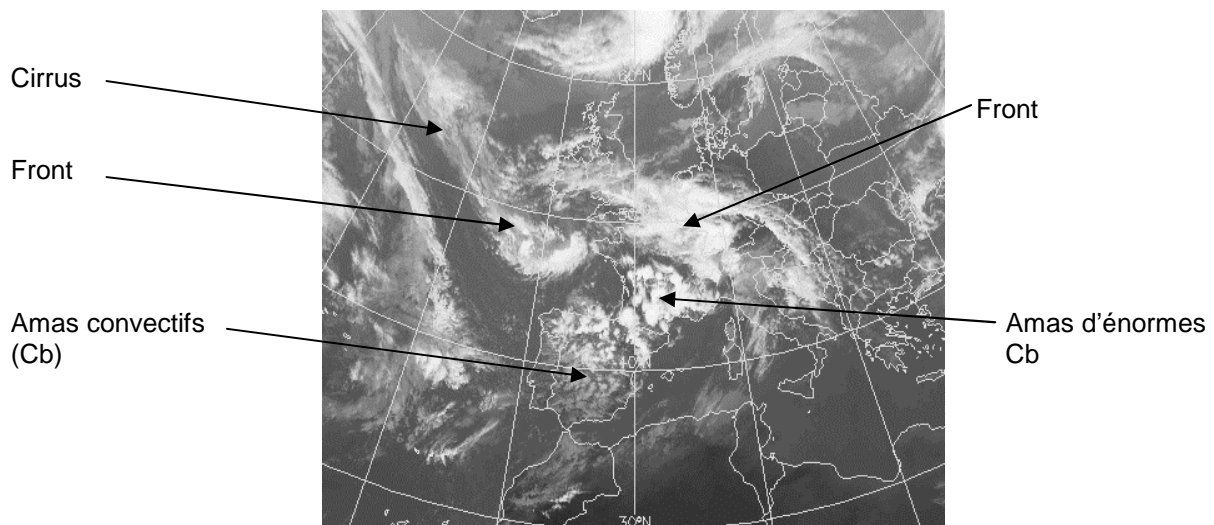
*Image visible sur la France*



## Image infrarouge

Cette image, prise par une caméra thermique, permet de visualiser, en première approximation, la température (radiative) de la couche observée (sommet des nuages ou sol/mer). Pour cela, les valeurs obtenues sont converties en couleurs (dégradés de blancs à gris). Cependant les nuages fins (semi transparents) d'altitude (cirrus notamment) perturbent cette mesure comme les amas de nuages de petite taille, n'occupant pas la totalité la surface d'observation (pixel). Enfin, certains sols peuvent avoir des 'réflectivités' (neige par exemple) qui les font confondre avec des nuages.

### Exemple de lecture d'une image infrarouge :



## Image Composition colorée

Cette image est élaborée à partir des canaux infrarouges et visibles. Aussi son interprétation est complexe. Cette imagerie, utilisant des canaux visibles, varie suivant l'heure solaire de la région observée.

- **Aux nuances jaunes**, nous associons les nuages bas, plus chauds, plus ou moins blanchis suivant leur température de sommet (composante bleue dépendante de l'infrarouge thermique). Nous pouvons les classer, suivant leur texture, comme Stratus, Stratocumulus et petits Cumulus.

- **Le bleu** concrétise les nuages élevés, constitués de cristaux de glace et quelquefois transparents. Ce sont les nuages cirriformes.

Les nuages d'étage moyen, tels les Altocumulus, ou Stratocumulus élevés, et les sommets de Cumulus congestus, se reconnaissent dans des tons crème à blanc cassé, les Cirrostratus et Cirrus épais s'identifient par un gris clair bleuté etc...

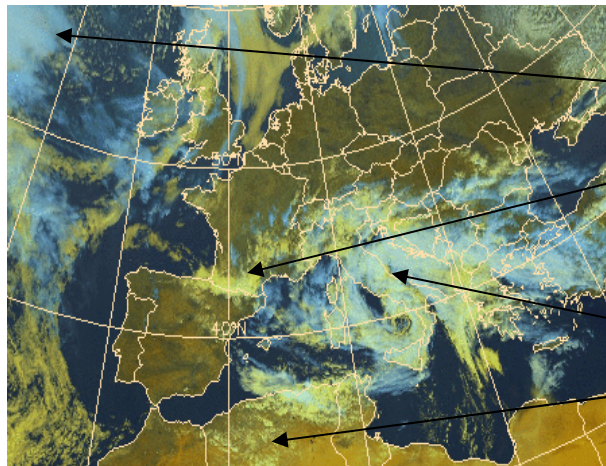


Sur les océans, tous ces nuages apparaissent sur fond bleu outremer. Quant aux couleurs des sols, elles alternent du vert grisé au brun verdâtre pour les plus froids et les plus absorbants, à l'ocre jaune et au jaune or pour les régions désertiques africaines.

En condition crépusculaire ou aurorale, le dégradé des couleurs permet le passage du jour à la nuit, avec un bon suivi de la reconnaissance des nuages moyens et élevés, dans la gamme bleutée de l'infrarouge.

Cependant de nombreuses ambiguïtés existent : confusion entre les sols siliceux chauds d'Afrique et les stratus (couleur orangé); les nuages bas sont peu (voire pas) détectables la nuit. Leur interprétation nécessite donc les précautions d'usage.

### Exemple de lecture d'une composition colorée :



Composition colorée sur l'Europe.

Cette image est élaborée à partir des canaux infra-rouge et visible (interprétation complexe).

Les teintes bleues caractérisent les nuages élevés constitués de cristaux de glace, souvent transparentes (nuages cirriformes).

Les nuances jaunes correspondent plutôt aux nuages bas, plus chauds (St, Sc, petits cumulus).

Les teintes blanches correspondent plutôt aux nuages denses, épais et froids, généralement précipitants (Ns).

Confusion possible entre les sols chauds (Afrique) et les stratus (nuages bas indétectables la nuit).

## 2. IMAGERIE RADAR

### Comment lire une image radar ?

Ces images servent à visualiser les zones de précipitations, sans renseigner sur leur nature et leur état (liquide ou solide), en temps réel. L'image radar est perturbée par des obstacles fixes comme les montagnes ou les constructions au voisinage immédiat de l'antenne. On détermine l'intensité de la précipitation par une couleur correspondant à des millimètres d'eau par heure. Un millimètre d'eau égale un litre par mètre carré.

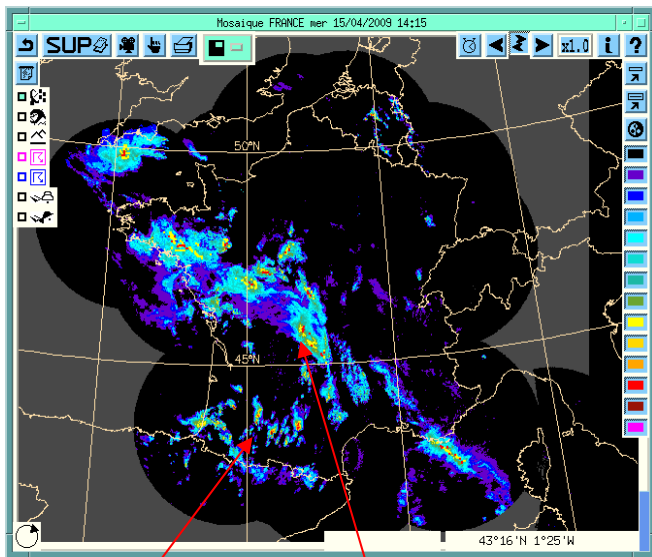
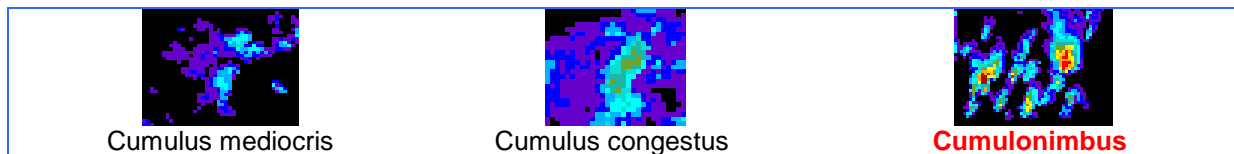
### Code des couleurs :

<2 mm/h	<10 mm/h	<20 mm/h	<40 mm/h	<60 mm/h	<100 mm/h	>300 mm/h

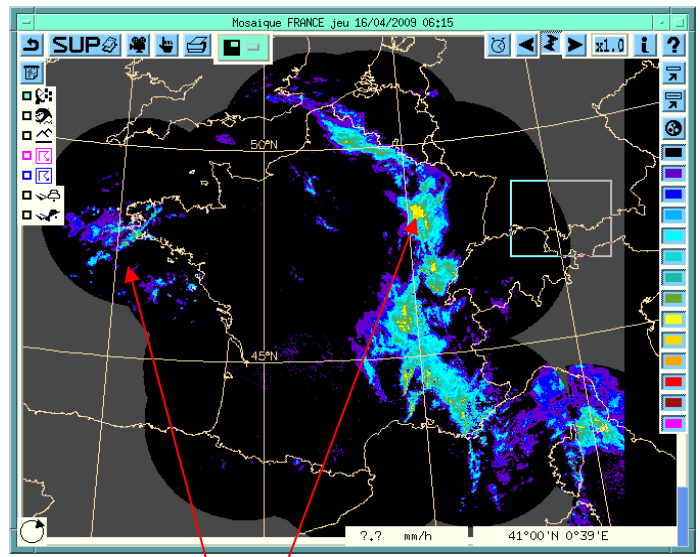
Un front se visualise par une bande de précipitations. Un front stratiforme est généralement constitué de couleur bleu et verte. Dans un front pluvio-instable, on observe dans les zones stratiformes de petites taches d'intensité supérieure (vert foncé, jaune, orange ou rouge), qui visualisent les averses. Une tache de couleur jaune, orange, ou rouge, est représentative d'un Cb précipitant, le rouge laisse supposer des précipitations sous forme de grêle dans la plupart des cas.

### Exemple de lecture d'imagerie radar :

#### Différenciation des nuages convectifs :



1. Exemple de front pluvio-instable, avec des orages (Cb), impacts rouges dans la masse nuageuse du front, et à l'arrière.



2. Exemple de front pluvio-instable avec traîne peu active : averses faibles loin à l'arrière

☞ Il est recommandé une attention particulière pour les situations de traîne active ou les situations convectives : une image satellite ou radar n'est représentative de la situation qu'à l'heure de validité indiquée sur son cartouche, et ne donne pas directement d'indication sur l'évolution d'une situation, qui peut être très rapide.

# LA TURBULENCE

## Généralités:

La turbulence est un phénomène souvent observé et génère des mouvements parfois violents pouvant perturber le vol. Même si les accidents avec destruction des aéronefs restent exceptionnels, **les accidents corporels dus à la turbulence sont nombreux**, surtout en aviation commerciale (passagers, et majoritairement équipages).



On ne peut éviter ces incidents que par une bonne information sur **l'état de l'atmosphère**, une bonne compréhension des **paramètres entrant en jeu**, et des **réactions appropriées**.

## Définition:

La turbulence désigne des **mouvements aléatoires** de l'air se superposant au mouvement moyen

La turbulence aéronautique est associée à toute **variation de la direction et/ou de la vitesse du vent (cisaillement)** engendrant des accélérations verticales ou horizontales pouvant modifier les paramètres de vol non compensées par des méthodes normales de pilotage.

## Classification et signalement:

Intensité de la turbulence potentielle	Classification	Racine cubique de l'EDR ( $m^{2/3}s^{-1}$ )
1	Faible	< 0.4
2 	Modérée	Entre 0.4 et 0.7
3 	Forte	> 0.7

**La turbulence forte fait l'objet de SIGMET. Les symboles de turbulence modérée ou forte font partie des phénomènes significatifs décrits dans les cartes TEMSI.**

Le critère de turbulence choisi par l'OACI (Annexe3 à la convention de Chicago) est la racine cubique du taux de dissipation des tourbillons de turbulence ou EDR) avec les valeurs seuils décrites dans le tableau ci-dessus. Il convient de distinguer :

→ La **turbulence potentielle**, qui décrit le potentiel turbulent de l'atmosphère sous forme d'échelle objective indépendant de l'aéronef.

→ La **turbulence effective**, qui est la conséquence du potentiel turbulent atmosphérique sur les aéronefs. Elle se traduit par les rafales verticales subies pouvant entraîner des variations importantes et soudaines du facteur de charge.

## Turbulence d'origine mécanique :

- **Turbulence de frottement** *Interaction entre la surface terrestre et le vent dans la couche limite de surface (CLS) (entre SFC et 150ft)*

→ elle ne se manifeste donc que dans les très basses couches.

- **Turbulence d'écoulement** *Résultat du frottement de la viscosité à l'intérieur d'une même tranche, ou entre deux tranches atmosphériques de caractéristiques différentes en termes d'écoulement. Elle intéresse toute l'atmosphère et se décline sous de multiples formes :*

→ turbulence **orographique et ondes de relief**

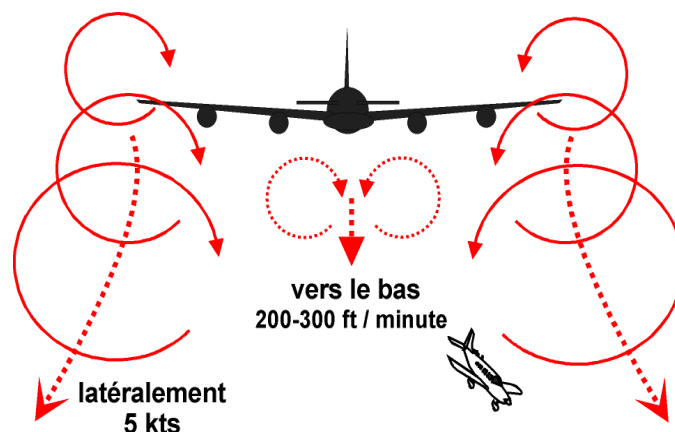
→ turbulence en air clair (**CAT**) due aux **jets**

→ turbulence près des **surfaces frontales** – due au contraste thermique des masses d'air, au cisaillement horizontal, ainsi qu'aux mouvements verticaux induits.

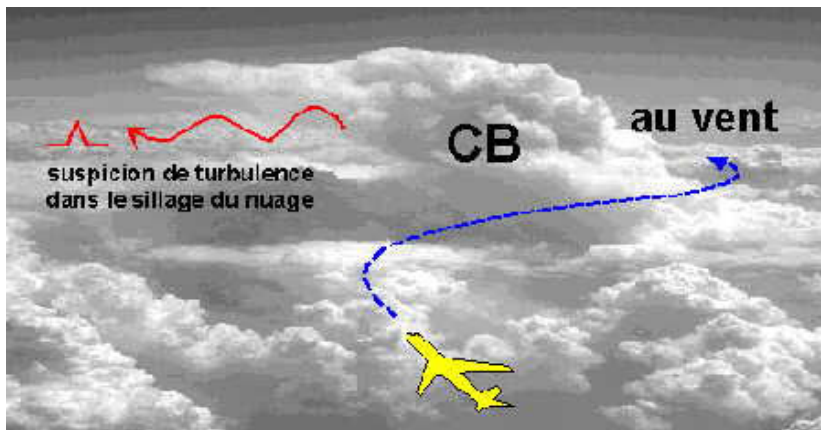
→ turbulence due à une **forte inversion thermique** - le refroidissement crée une bulle d'air calme en surface. La force de frottement étant réduite, l'air glisse sur cette bulle et, vers le sommet de l'inversion, la vitesse du vent peut être plus d'une fois et demi supérieure à la vitesse du vent géostrophique, créant ainsi du cisaillement.

→ turbulence due aux **brises** - vent de directions quasiment opposées entre le sol et le sommet de la circulation de brise, qui se situe généralement vers 1000ft.

→ turbulence de **sillage** - turbulence aérodynamique créée par les tourbillons de l'avion.

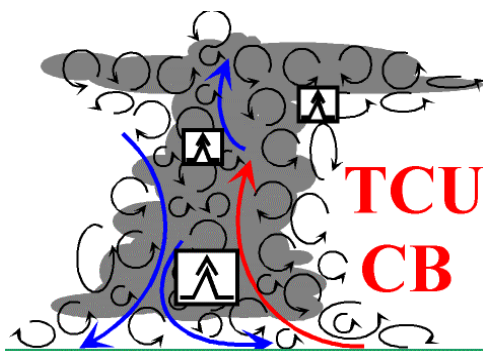


→ Turbulence de **sillage nuageux** - générée par un cumulonimbus (CB)



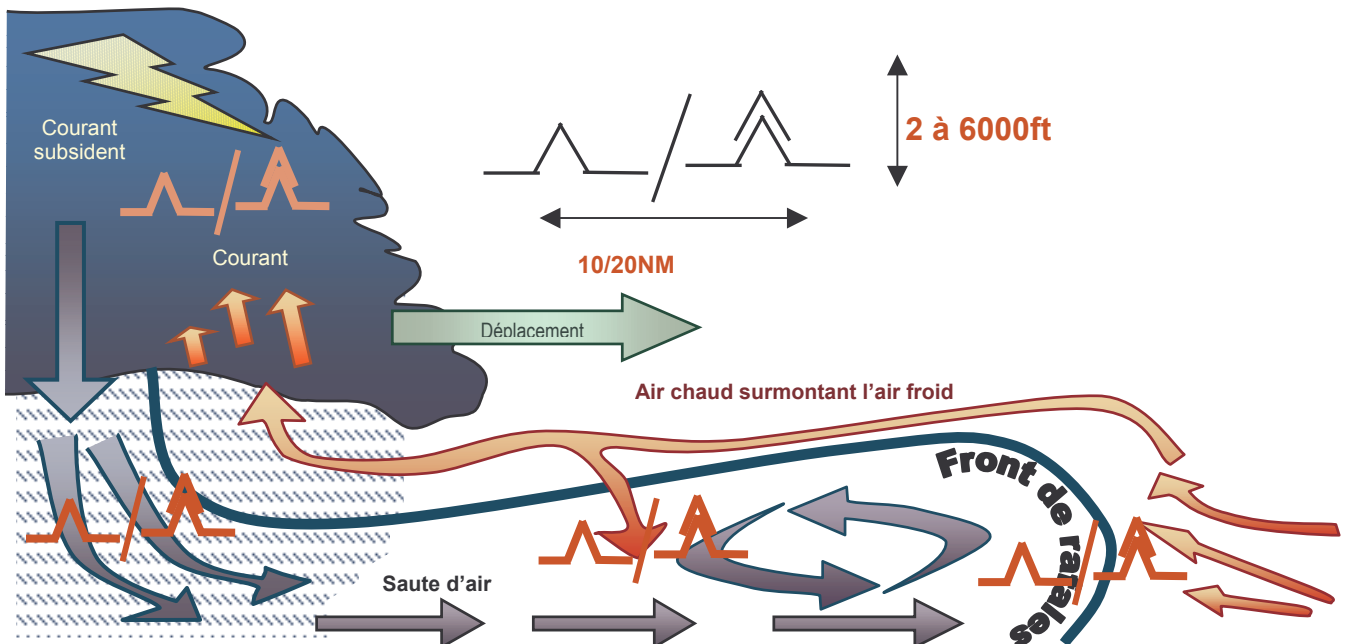
### Turbulence d'origine thermique ou convective:

→ Les nuages convectifs - *plus l'activité convective est importante, plus forte est la turbulence.*

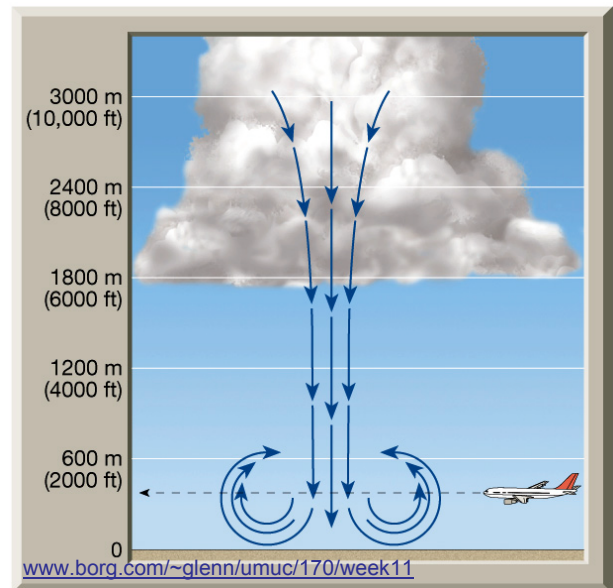


La turbulence se manifeste aussi bien dans le nuage convectif qu'au-dessus, autour et en-dessous.

→ Le front de rafale - siège de forts cisaillements, il se déplace à l'avant et avec la cellule orageuse.



→ Downburst - ces courants descendants, parfois violents peuvent modifier dramatiquement la trajectoire des aéronefs sous la cellule orageuse. Ils correspondent à une forte subsidence d'air froid, lourd, issu de la partie supérieure du nuage et sont généralement associés à des précipitations. Lorsque ces phénomènes sont de petite échelle (4km environ), on les nomme **microburst**. Ils sont alors associés à des vitesses verticales de l'ordre de 4000ft/min et peuvent engendrer des rafales horizontales de l'ordre de 100kt .



## Détection:

On peut détecter des turbulences aujourd'hui de plusieurs façons.

→ Les **nuages convectifs** (Cu Cumulus, Cb Cumulonimbus etc.) par exemple, signalent des ascendances pouvant générer des turbulences.

→ Sur les aéroports, des systèmes instrumentés peuvent être installés, comme le **LLWSAS** (Low Level Wind Shear Alert System), de plus en plus souvent remplacé par des **TDWR** (Terminal Doppler Weather Radar).

→ En vol, on peut détecter les turbulences avec des systèmes embarqués tels les **capteurs infrarouge**, les **radars micro-ondes** ou le **lidar Doppler**. Ce dernier fonctionne comme un radar doppler à technologie laser et mesure le mouvement de l'air à 500/600m devant l'avion.

## Prévention:

→ Il est important de choisir **la bonne trajectoire et le bon niveau de vol**. Dans le cas des jets, on privilégiera des routes côté anticyclonique en s'éloignant de l'axe du jet sur la verticale.

→ Il convient d'éviter d'être **sous le vent** d'un relief par vent modéré à fort (> 20kt) ou sous le vent d'un cumulonimbus pour éviter les turbulences de sillage nuageux.

→ Il peut être utile de surveiller le défilement de nuages bas lorsque la manche à air indique un vent nul au sol. Cela permet de suspecter de la **turbulence issue d'une couche d'inversion**.

→ Dans la plupart des cas le risque sur la structure de l'avion peut être diminué :

- phase en route : par une **réduction appropriée de la vitesse de l'avion en route**
- phases d'atterrissage /décollage et d'approche **par une légère majoration de la vitesse**.

Dans le cas particulier des 'super cellules' orageuses (une seule cellule, de 30 à 50 km de diamètre), **l'évitement** est nécessaire.