

UNITÉS

Pascal : Pa

Hecto Pascal : hPa

Millibar : mb

Pouce de mercure : in.Hg

RAPPEL

1013 hPa = 29,92 in.Hg

1 hPa = 1 mb

1 hPa = 0,003 in.Hg

Atmosphère Standard :

P = 1013,25 hPa

T = 15° C ou 288 K

Δ = -2° / 1000 ft

-56,5° C jusqu'à 11 km (36 000 ft)

Au-delà : constante jusqu'à 20 km, soit 65 000 ft, puis elle augmente lentement.

Valeurs clés :

Pression hPa	Altitude à laquelle règne cette pression	
	ft	m
1013	Niveau de la mer	
850	5 000 ft	1 500 m
700	10 000 ft	3 000 m
500	18 000 ft	5 500 m
400	24 000 ft	7 200 m
300	30 000 ft	9 100 m
200	39 000 ft	11 800 m

La masse volumique de l'air est égale à la masse de l'air contenu dans une unité de volume. Elle est désigné par la lettre ρ (rho) et s'exprime en kg/m^3 .

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Pour une température T données, le produit $P.V$ reste constant :

$$\text{- Si } P \nearrow \Leftrightarrow V \searrow \Leftrightarrow \rho \nearrow$$

$$\text{- Si } P \searrow \Leftrightarrow V \nearrow \Leftrightarrow \rho \searrow$$

Pour une pression P données, le rapport $\frac{V}{T}$ reste constant :

$$\text{- Si } T \nearrow \Leftrightarrow V \nearrow \Leftrightarrow \rho \searrow$$

$$\text{- Si } T \searrow \Leftrightarrow V \searrow \Leftrightarrow \rho \nearrow$$

CONVERSIONS

Pour convertir 990 hPa en in.Hg :

$$\frac{990}{1013} \times 29,92 = 29,24 \text{ in.Hg}$$

Pour convertir 29,35 in.Hg en hPa :

$$\frac{29,35}{29,92} \times 1013 = 994 \text{ hPa}$$

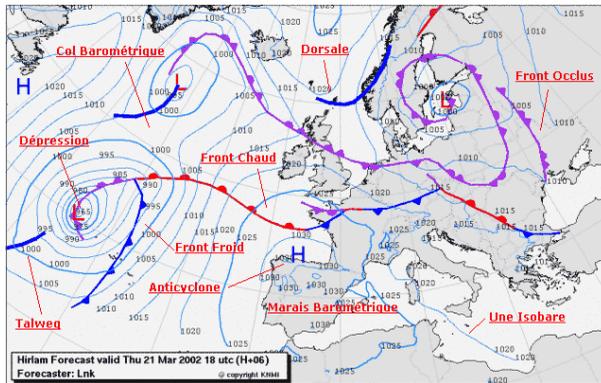
DÉPRESSIONS, ANTICYCLONES

Isobares :

Lignes reliant entre eux tout les points où il règne la même pression.

Isohypses :

Lignes reliant entre eux tout les points pour lesquels l'altitude à laquelle il règne une même pression, ce qui donne une courbe de niveau.



Col :

Région située entre deux dépressions. Il s'agit d'une zone de calme relatif. Les vents sont faibles et peuvent être relativement variables.

Marais barométrique :

Région où les isobares sont espacées et désorganisées. Il s'agit d'une zone où les vents sont calmes ou faibles et très variables (les isobares étant espacées). La pression barométrique dans cette région est souvent moyenne (autour de 1013 hPa). La présence d'un marais barométrique dénote une zone de mauvais temps stagnante.

Talweg :

Excroissance d'une dépression. Les talwegs sont analogues à une vallée géographique. Les isobares s'emboîtent les unes dans les autres et forment un "V". La pression décroît en allant vers la concavité. Généralement, un front froid se trouve dans l'axe du talweg. Lors du passage d'un talweg, l'observateur remarquera un saut de vent.

Dorsale :

Excroissance d'un anticyclone ou d'une haute pression. La dorsale est constituée d'isobares en forme de "U" inversé. La pression augmente

en allant vers la concavité. Le temps est souvent beau dans ce genre de zone.

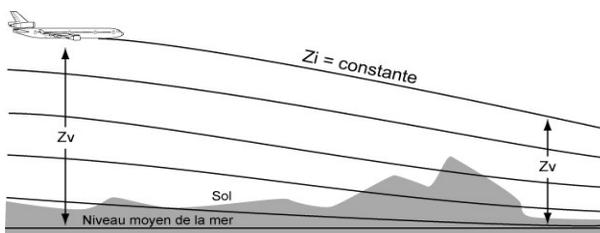
EFFET DE LA PRESSION ET DE LA TEMPÉRATURE SUR L'ALTITUDE

Lorsque l'on vole à une altitude constante indiquée par l'altimètre, cela revient à suivre une surface isobare.

Si l'altitude réelle de cette surface isobare diminue, l'altitude vraie de l'avion va également diminuer. Il y a **DANGER**.

Lorsqu'on se dirige vers une zone dépressionnaire, il y a donc danger.

- Vers une dépression : Si Z_i est constant, alors $Z_v \searrow$
- Vers de basses températures : Si Z_i est constant, alors $Z_v \searrow$



On retiendra la règle des quatre D :

Dépression = dérive droite = Danger

LE VENT

Le vent correspond à un déplacement d'une masse d'air. On appelle vent la composante horizontale de ce déplacement.

La direction du vent est donnée par rapport au Nv. Elle est exprimée par un angle qui peut varier de 000° à 360° . Seul les tours de contrôle donnent la direction d'où souffle le vent par rapport au Nm.

La vitesse du vent appelée force, correspond à la vitesse de déplacement de la masse d'air. Elle est exprimée en kt ou en m/s.

$1 \text{ m/s} = 3600 \text{ m/h} = 2 \text{ kt}$

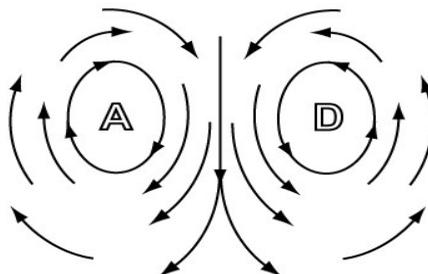
Un vent de 24 kt correspond à 12 m/s (24/2).

Origine du vent :

La cause primaire du vent est une différence de pression. L'air se déplace des zones de haute pression vers les zones de basse pression.

La trajectoire des particules d'air est **parallèle aux isobares**.

Le vent tourne dans le sens des aiguilles d'une montre autour des centres de hautes pressions (A), et dans le sens inverse des aiguilles d'une montre autour des centres de basses pressions (D). Les mouvements sont inversés dans l'hémisphère sud.



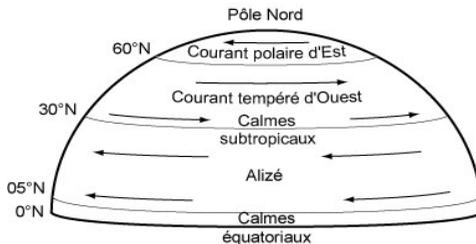
En pratique lorsque vous volez vers les basses pressions, le vent vient de votre gauche et votre dérive est à droite (d'où la règle des « 4 D » Dépression = Dérive Droite = Danger).

Lorsqu'il y a convergence des isobares ou des isohypses, celles-ci se resserrent. Le gradient de pression est alors plus élevé, le vent se renforce. À l'inverse, lorsque l'on vole vers une zone où les isobares ou les isohypses divergent, le gradient de pression diminue, le vent va également diminuer.

Circulation générale dans l'atmosphère :

Les variations de pression à la surface de la terre font apparaître :

- Un centre anticyclonique au Pôle Nord (≈ 1020 hPa).
 - Un axe dépressionnaire sur le 60° N, correspondant au front arctique (≈ 1000 hPa).
 - Une cassure de la courbe sur le 40° N, correspondant au front polaire.
 - Un axe anticyclonique sur le 30° N, correspondant à la ceinture anticyclonique subtropicale (≈ 1025 hPa).
 - Au environ de l'équateur une bande dépressionnaire à gradient extrêmement faible (≈ 1010 hPa).
-
- les vents sont calmes au pôle Nord (courant polaire d'Est).
 - d'Est du pôle Nord au 60° N.
 - d'Ouest du 60° N au 30° N (courant tempéré d'Ouest). C'est ce courant qui nous touche en France.
 - Calmes dur le 30° N (calmes subtropicaux).
 - d'Est du 30° N au 5° N (Alizés).
 - d'Est très faibles puis nuls du 5° N à l'équateur (calmes équatoriaux).



La circulation est symétrique dans l'hémisphère Sud.

Circulation en altitude :

L'altitude de la surface de 300 hPa augmente du pôle Nord jusqu'au 15° N (de 8500 à 9700 m), puis décroît faiblement jusqu'à l'équateur (9700 à 9600 m).

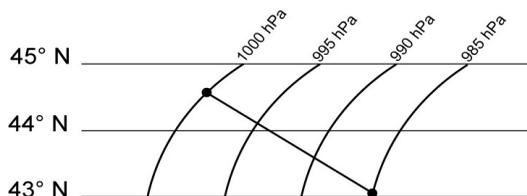
En fait, au dessus de l'altitude pression de 700 hPa, le pôle devient dépressionnaire, contrairement à la situation en surface. Il en résulte un gigantesque tourbillon d'Ouest bordé par une zone étroite de vents d'Est aux latitudes faibles.

Gradient de pression :

En termes plus scientifiques, pour définir le vent, nous devons parler du gradient de pression. Le gradient de pression est la différence de pression existant entre deux points divisée par la distance qui les séparent.

Donc, $(P1-P2)/distance$.

$$\frac{P1 - P2}{Distance} = \frac{1000 \text{ hPa} - 985 \text{ hPa}}{1,5^\circ} = 10$$



Couche de friction :

Le vent souffle parallèlement aux isobares et isohypses. Ce résultat simpliste n'est valable qu'en atmosphère dite « **atmosphère libre** », c'est-à-dire au dessus de 1500 m.

La couche d'atmosphère comprise entre le sol et 1500 m est appelée **couche de friction**.

Variation du vent dans la couche de friction :

Lorsque l'on est près du sol, la force de frottement doit être prise en compte. Ainsi par rapport au vent en altitude, dans les basses couches l'air est dévié d'environ **20° au dessus d'une étendue maritime** et **30° au dessus d'une étendue terrestre, vers les basses pressions**.

D'autre part la force de friction étant opposée au déplacement, la force du vent est plus faible lorsqu'on se rapproche du sol.

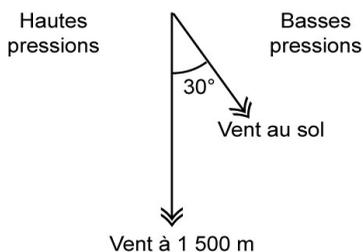
Conséquences au plan météorologique : *Près du sol les vents ont tendance à s'éloigner des anticyclones (zone de hautes pressions) et à converger vers les dépressions (zone de basses pressions). Dans les basses couches, l'air s'éloigne d'un anticyclone et doit être remplacé par de l'air qui descend (**subsidence**) des couches supérieures. Il crée des phénomènes générateurs de beau temps.*

A l'inverse, dans les basses couches, l'air se dirigeant vers les dépressions, il chasse vers le haut une quantité d'air qui provoque un mouvement ascendant qui peut amener du mauvais temps.

C'est pour cette raison que les anticyclones sont synonymes de beau temps et les dépressions de mauvais temps.

Conséquences au plan pilotage : *Au décollage, lorsque l'on prend de l'altitude, le vent subi va augmenter en force sa direction va tourner vers la droite (hémisphère Nord).*

Inversement, lors d'une percée IFR par exemple, on doit s'attendre à voir la force du vent diminuer et sa direction tourner vers la gauche.



TURBULENCE

La turbulence correspond à l'effet produit sur un avion par des mouvements « désordonnés » de l'air.

On distingue cinq catégories de turbulence :

- **La turbulence de frottement** : Elle est due au frottement de l'air sur le sol. Ce type de turbulence apparaît que lorsque la vitesse du vent est > 20 kt.

Elle est de se faire sentir du sol à une hauteur de **1500 à 2000 m**.

Au dessus de cette couche turbulente, l'atmosphère est dite « libre ».

- **La turbulence convective** : Lorsque le sol se réchauffe sous l'effet de l'insolation, à son contact l'air se réchauffe. Devenant plus léger, il s'élève. Il se crée une colonne ascendante, alors que des colonnes d'air descendant s'établissent au-dessus des zones qui s'échauffent moins rapidement.

Elle peut être ressentie dans toute l'épaisseur de l'atmosphère.

- **La turbulence orographique** : Elle est due à la perturbation de l'écoulement de l'air provoquée par le relief.

- **La turbulence en air clair (CAT – Clair Air Turbulence)** : Elle est due à un gradient important de la vitesse du vent, ou une variation brusque de la direction du vent (cisaillement).

Cette turbulence se manifeste à partir de 4500 m d'altitude. Elle se rencontre principalement dans les jets ainsi qu'au voisinage de la tropopause.

- **La turbulence de sillage** : Ce n'est pas une turbulence « naturelle ». Elle est provoquée par le passage d'un avion. Elle est dangereuse car très forte.

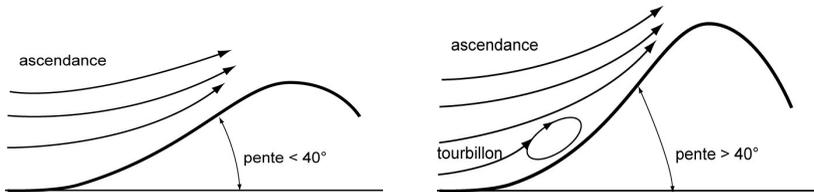
EFFET DU RELIEF

Passage d'un chaîne de montagne

Le relief constitue obstacle qui s'oppose au mouvement de l'air. D'une part il freine l'air, d'autre part il le dévie. Ces deux effets sur le vent sont générateurs de turbulences.

Coté au vent :

La turbulence est assez faible et la déviation des filets d'air est régulière, surtout si la pente est faible.

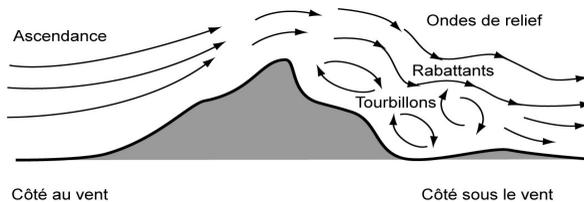


Si la pente est supérieure à 40 %, il apparaît un tourbillon au pied de la pente.

Coté sous le vent :

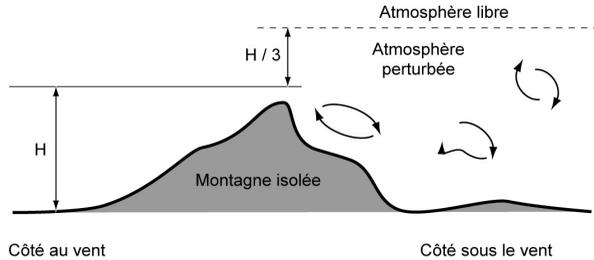
L'air redescend sous l'effet de son poids. Il apparaît des ondes de relief. Ces systèmes d'ondes dégénèrent lorsque l'on se rapproche du sol et donnent naissance à des petits tourbillons isolés appelés rotor.

*On rencontre donc des rabattants et des tourbillons synonymes de turbulence. **Le vol près du sol du côté sous le vent est dangereux.***



Hauteur d'influence :

En présence d'un relief isolé, une partie de l'air peut contourner le relief et l'autre partie est déviée par-dessus le relief. L'atmosphère est perturbée jusqu'à une hauteur environ égale au tiers de celui-ci.



Lorsque le vent bute sur une chaîne de montagne tout l'air est obligé de passer par-dessus le relief. Dans ce cas l'atmosphère est perturbée jusqu'à une hauteur pouvant atteindre 4 à 5 fois celui-ci.

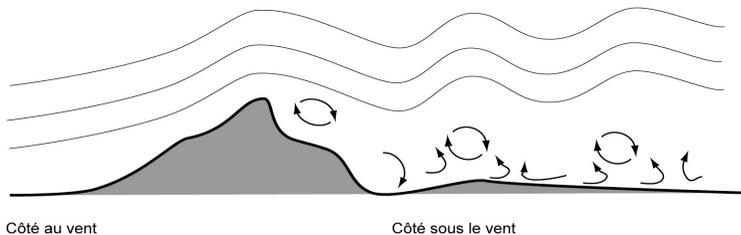
Distance horizontale d'influence :

L'influence du relief peut se faire sentir, suivant le relief et la force du vent, jusqu'à 3 à 7 km après le relief.

Ondes stationnaires ou orographiques

Si la masse d'air est suffisamment stable, les particules d'air rejoignent leur niveau d'équilibre après avoir passé le relief. Elle rejoignent leur équilibre après une série d'oscillations, qui se traduisent par une succession de rabattants et d'ascendants en altitude.

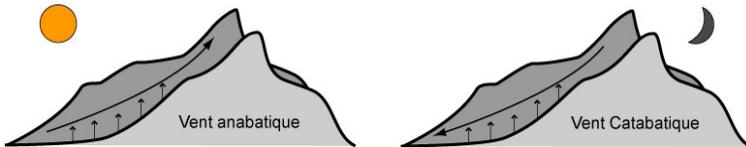
Ces ondes de relief, correspondant à des ondes stationnaires sont également appelées ondes orographiques (mountain waves MTW) et peuvent s'étendre jusqu'à 25 km sous le vent du relief.



VENTS LOCAUX

Vents anabatiques et vent catabatiques

En l'absence de nuage, le soleil réchauffe le sol pendant la journée qui à son tour réchauffe l'air. L'air plus chaud monte. Du fait de la pente cet air se retrouve à côté d'air plus froid, il a tendance à remonter la pente. C'est une **brise montante** ou **vent anabatique**.



L'air pendant la nuit va se refroidir et s'alourdir, le phénomène inverse se produit, l'air va descendre la pente. C'est la **brise descendante** ou **vent catabatique**.

Brise d'amont, brise d'aval :

L'origine de ces brises correspond à un échauffement diurne de l'air dans une vallée. L'air au contact du sol sur les versants et au fond de la vallée se réchauffe plus vite que l'air qui est au milieu. L'air chaud monte le long des versants de la vallée et est remplacé par de l'air plus froid qui descend au milieu de celle-ci.

Il se crée ainsi une **brise montante** ou **brise d'aval**.

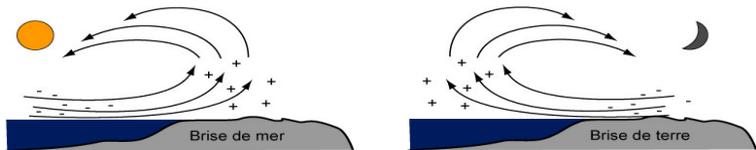


La nuit le phénomène s'inverse et donne naissance à une **brise descendante** ou **brise d'amont**.

Brise de mer, brise de terre :

*De jour, la terre se réchauffe plus que la mer. L'air au dessus de la terre a tendance à s'élever et à être remplacé par de l'air plus dense, donc plus froid qui vient de la mer. Il se crée un déplacement de l'air de la mer vers la terre, c'est la **brise de mer**.*

*Au cours de la nuit, c'est l'inverse avec de l'air plus chaud au dessus de la mer qui se refroidit moins vite que l'air au dessus de la terre. Il se crée un déplacement de l'air de la terre vers la mer, c'est la **brise de terre**.*



Effet venturi :

Le vent qui pénètre dans une vallée voit sa vitesse se renforcer par effet venturi.

Divers vents locaux :

***Le Mistral :** Vent du secteur Nord dans la vallée du Rhône. Sa vitesse peut atteindre 50 kt. Il donne naissance à des courants rabattants très violents. Il souffle sur une épaisseur de 1500 à 2000 m.*

***La Tramontane :** Vent du secteur Nord-Ouest, qui subit une accélération entre la Montagne Noire et les Corbières. Elle souffle sur le Bas Languedoc et le Roussillon.*

***Autan :** Vent du secteur Sud-Est, qui subit une accélération entre la Montagne Noire et les Corbières. Il souffle sur le Haut Languedoc (vallée de la moyenne Garonne).*

Marin : Vent du secteur d'Est-Sud-Est qui souffle entre Perpignan et Montpellier.

Sirocco : Vent du secteur Sud qui prend naissance dans la région saharienne. C'est un vent chaud qui souffle en Provence et sur le Midi de la France.

Bora : Vent du secteur d'Est-Nord-Est sec et froid à travers l'Adriatique en hiver.

NOTIONS D'ÉQUILIBRE

L'état de stabilité ou d'instabilité d'une particule d'air dépend de la température de cette particule par rapport à la température de l'air environnant.

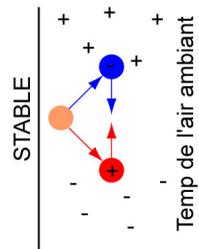
On peut rencontrer 3 cas suivants :

- La particule d'air est plus chaude que l'air ambiant, elle va s'élever.
- La particule d'air est plus froide que l'air ambiant, elle va descendre.
- La particule d'air est à la même température que l'air ambiant, elle va rester immobile.

On distingue 4 types différents d'équilibres.

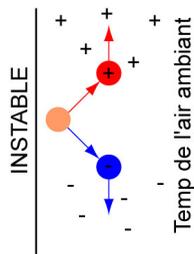
- **Équilibre stable :** A partir de sa position d'équilibre, si une particule d'air est déplacée vers le haut, si à ce moment elle est plus froide que l'air ambiant elle va redescendre, c'est-à-dire revenir à sa position d'équilibre.

Inversement, si elle est déplacée vers le bas et qu'elle se trouve plus chaude que l'air ambiant, elle va remonter et revenir à sa position d'équilibre.



Dans ces deux cas on dira que l'atmosphère est **stable**.

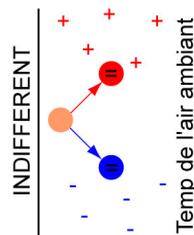
- **Equilibre instable** : A partir de sa position d'équilibre, si une particule d'air est déplacée vers le haut, si à ce moment elle est plus chaude que l'air ambiant elle va continuer à monter, c'est-à-dire s'éloigner davantage de sa position d'équilibre.



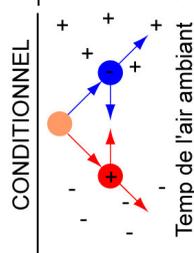
Inversement, si elle est déplacée vers le bas et qu'elle se trouve plus froide que l'air ambiant, elle va continuer à descendre, c'est-à-dire s'éloigner davantage de sa position d'équilibre.

Dans ces deux cas on dira que l'atmosphère est **instable**.

- **Equilibre indifférent** : A partir de sa position d'équilibre, si une particule d'air est déplacée vers le haut ou vers le bas et qu'elle se trouve la même température que l'air ambiant, elle va rester à sa nouvelle position. Cette position est aussi une position d'équilibre.



- **Equilibre conditionnel** : Tant que le déplacement de la particule à partir de sa position d'équilibre reste faible, elle revient à sa position initiale, qui est dans ce cas une position d'équilibre stable. Si le déplacement l'emmène au-delà d'un certain point, elle va continuer à s'éloigner de sa position initiale et deviendra instable. Suivant l'importance de la perturbation l'équilibre est stable ou instable.

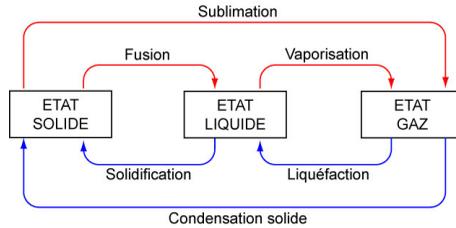


L'HUMIDITÉ

La richesse en vapeur d'eau décroît en altitude, à mesure qu'on s'éloigne de ces sources. L'eau existe dans l'atmosphère sous ses trois phases :

- **Gazeuse** : l'eau se forme de vapeur est invisible à l'œil nu.
- **Liquide** : l'eau se présente sous forme de pluie, de bruine, de nuages, de brouillard et de rosée.
- **Solide** : l'eau se présente sous forme de neige, de grêle, de grésil, de gelée blanche.

Changement d'état de l'eau :



La fusion
La vaporisation } → **Absorbent** de la chaleur
La sublimation }

La solidification
La liquéfaction (condensation) } → **Libèrent** de la chaleur
La condensation solide }

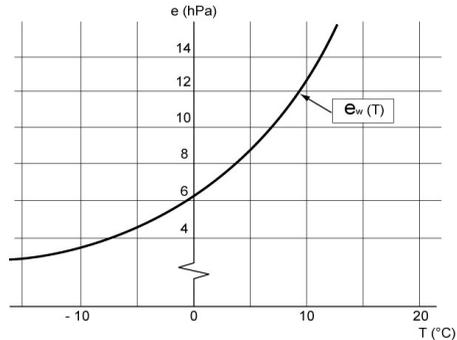
L'air humide :

Par définition : **Air humide** = Air sec + vapeur d'eau

L'air saturé :

Au-delà d'une certaine quantité de vapeur d'eau, une particule d'air ne peut plus en absorber davantage. L'air est alors **saturé** en vapeur d'eau.

La pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air lorsqu'il est saturé, appelée **pression saturante**, est notée e_w . Elle décroît lorsque la température décroît. Ce la traduit le fait pour les phénomènes de givrage, que **plus l'air est froid, moins il peut contenir de vapeur d'eau**.



Par définition : **Air saturé = Air sec + vapeur d'eau saturante**

L'humidité relative :

La formation des nuages débute en général dès que l'air humide devient saturé. Les risques de formation nuageuse sont d'autant plus grands que l'air est proche de la saturation. Il est donc important de connaître l'état de l'air par rapport à la saturation.

On définit dans ce but l'**humidité relative**.

$$U \% = 100 \frac{e}{e_w(T)}$$

e = pression partielle de la vapeur d'eau

$e_w(T)$ = pression maximale de la vapeur d'eau que peut contenir l'air à la température T (pression saturante)

Si l'air est sec : $e = 0$ et $U = 0 \%$

Si l'air est saturée à la température T : $e = e_w(T)$, alors $U = 100 \%$

Saturation de l'air :

L'air humide peut arriver à la saturation en vapeur d'eau suivant deux processus :

- Par apport de vapeur d'eau : e augmente et atteint, à température constante, la valeur de e_w .
- Par refroidissement : la particule d'air contient la même quantité d'eau. Si elle se refroidit, e_w diminue jusqu'à atteindre la valeur de e .

Point de rosée – Td ou DP :

Le point de rosée (Dew Point en anglais) est la température à laquelle une particule d'air, contenant une certaine quantité de vapeur d'eau, devient saturée lorsqu'elle subit un refroidissement à pression constante.

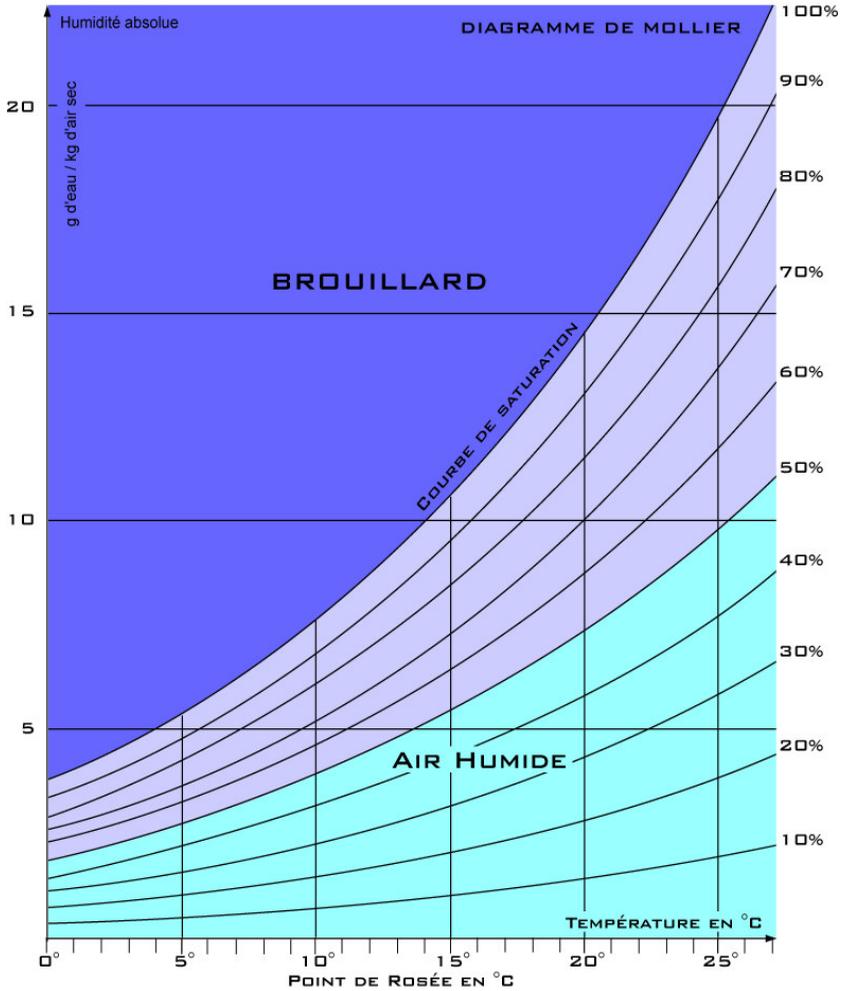
Plus la différence entre la T et Td est grande plus l'air est sec.

Lorsque la température de l'air diminue et devient égale à Td, l'humidité relative U atteint 100 %, du fait de la diminution de e_w . A cette température l'air est juste saturé. Il n'y a pas encore de condensation.

Si la température de l'air diminue encore, l'air ne peut plus contenir autant de vapeur d'eau. la vapeur d'eau en trop se condense sous forme d'eau.

Diagramme de Mollier :

Il permet de déterminer le point de rosée lorsque l'on connaît l'humidité relative et la température de l'air.



Point de condensation :

*Au lieu de refroidir une particule d'air humide à pression constante, on la fait s'élever. Il y a diminution de la température et de la pression. L'humidité relative augmente. A un certain niveau l'humidité relative arrive à 100 %, l'air a atteint le **point de condensation**.*

Ce phénomène survient lorsque le relief oblige les particules d'air humide à s'élever pour franchir un obstacle (montagne). C'est l'effet orographique (foehn)

Surfusion :

En règle générale, quand U atteint 100 %, la vapeur d'eau se transforme en eau liquide à température positive, en glace à température négative.

On rencontre souvent des zones de précipitations surfondues, c'est-à-dire de l'eau liquide à une température négative (entre 0° C et -40° C, mais plus généralement entre -4° C et -7° C).

*Cette **eau surfondue**, donc liquide, faite de très fines gouttelettes en suspension dans l'air, est **très dangereuse**. Les gouttelettes se transforment en **verglas** sur les bords d'attaque de l'avion lors du passage de celui-ci dans cette zone.*

TRANSFORMATIONS ADIABATIQUES

Une transformation adiabatique est une transformation de l'air (compression ou détente) au cours de laquelle il n'y a pas d'échange de chaleur avec l'extérieur.

*Une **compression adiabatique** de l'air provoque un réchauffement de cet air.*

*Une **détente adiabatique** de l'air provoque un refroidissement de cet air.*

Adiabatique sec :

Il y a adiabatique sec lorsque au cours de la transformation d'une particule d'air, à aucun moment cette particule n'atteint la saturation en vapeur d'eau.

Ainsi au cours d'un mouvement vertical de cette particule :

- élévation \Rightarrow détente \Rightarrow refroidissement
- descente \Rightarrow compression \Rightarrow réchauffement

Adiabatique humide :

Il y a adiabatique humide lorsque au cours de la transformation d'une particule d'air, il y a changement d'état de l'eau contenue dans cette particule.

Ainsi au cours d'un mouvement vertical de cette particule :

- élévation \Rightarrow détente \Rightarrow refroidissement \Rightarrow saturation ($e=e_w$) \Rightarrow condensation
- descente \Rightarrow compression \Rightarrow réchauffement \Rightarrow évaporation

Gradient adiabatique :

On appelle **gradient adiabatique sec** ou plus simplement **gradient adiabatique** le rapport :

$$\frac{\Delta T}{\Delta Z} = -3^\circ\text{C} / 1000 \text{ ft}$$

Gradient pseudoadiabatique :

on appelle **gradient pseudoadiabatique saturé** ou **gradient pseudoadiabatique** le rapport :

$$\frac{\Delta T_s}{\Delta Z}$$

Valeurs à retenir :

- Gradient standard : - 2°C / 1000 ft
- Gradient adiabatique sec : - 3°C / 1000 ft

STABILITÉ VERTICALE DE L'ATMOSPHÈRE

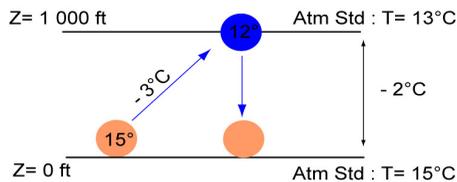
La stabilité verticale de l'atmosphère est très importante pour la formation de nuages.

Air non saturé en vapeur d'eau :

On considère une particule d'air. Dans son mouvement ascendant, la température de cette particule diminue. Si elle reste non saturée en vapeur d'eau, la diminution de température suit le gradient adiabatique sec.

Si les conditions dans l'atmosphère sont telles que le gradient réel de variation est plus faible (-2°C) que le gradient adiabatique sec (-3°C), alors la température de la particule va se retrouver inférieure à la température de l'air ambiant. Elle va redescendre à sa position d'origine. L'atmosphère est stable.

Exemple :



Air saturé en vapeur d'eau :

Le même raisonnement peut être tenu si la particule est saturée. Cette fois il faut comparer le gradient réel de température et le gradient pseudoadiabatique (qui n'a pas une valeur constante).

L'air saturé est donc moins stable que l'air non saturé.

Stabilité conditionnelle :

Si une particule d'air se sature en cours d'ascension, elle peut être stable jusqu'à un certain niveau puis instable au dessus.

Critère de stabilité :

On retiendra q'un fort gradient vertical de température, en valeur absolue, est favorable à l'instabilité. A l'inverse lorsque la température diminue lentement avec l'altitude, l'atmosphère est stable.

A la limite lorsque le gradient de température devient positif (cas de l'inversion de température) l'atmosphère est très stable.

- Le gradient de température diminue lorsque :

- *l'atmosphère est refroidie « par le bas ». C'est-à-dire l'hiver au-dessus du sol, l'ensoleillement étant faible.*
- *l'atmosphère se réchauffe « par le haut ». C'est le cas lorsque le ciel est couvert. Les nuages sont chauffés par le soleil ; de plus ils récupèrent la chaleur rayonnée par le sol*

*C'est conditions sont favorables à la **stabilité verticale de l'atmosphère.**
Plus l'air est **sec plus l'atmosphère est stable.***

- Le gradient de température augmente lorsque :

- *l'atmosphère est réchauffée « par le bas ». C'est le cas l'été lorsque le sol est réchauffé par le soleil est chauffe à son tour les basses couches de l'atmosphère.*
- *l'atmosphère se refroidit « par le haut ». C'est le cas lorsque le ciel est dégagé. Les couches élevées de l'atmosphère ne sont pas réchauffées par les nuages qui captent la chaleur rayonnée par le sol.*

*C'est conditions sont favorables à l'**instabilité verticale de l'atmosphère.***

Les conditions sont différentes au dessus de la mer. L'hiver la mer est plus chaude que le sol. Elle réchauffe donc davantage les basses couches de l'atmosphère, ce qui est favorable à 'instabilité. L'été c'est le phénomène inverse qui se produit.

En résumé :

Sol froid (hiver), ciel nuageux \Rightarrow STABILITE

Sol chaud (été), ciel clair \Rightarrow INSTABILITE

Mer chaude (hiver) \Rightarrow INSTABILITE

Mer froide (été) \Rightarrow STABILITE

LES NUAGES

Un nuage est un ensemble de particules d'eau liquide ou de glace, ou des deux à la fois, en suspension dans l'atmosphère.

Formation des nuages :

Deux conditions sont nécessaires :

- Il faut qu'il y est condensation : $e = e_w$

- *soit par abaissement de la température par détente adiabatique, lorsque l'air est soulevé. C'est le cas le plus fréquent ;*
- *soit par refroidissement, lorsque de l'air chaud et humide arrive au-dessus d'un sol froid ;*
- *soit par apport de vapeur d'eau, par évaporation au dessus d'une étendue maritime, ou par évapotranspiration ;*
- *soit par mélange entre deux masses d'air de température différentes. Le mélange de deux masses d'air non saturées peut amener à la saturation.*

*- Il faut de plus la présence de particules solides microscopiques appelées **noyaux de condensation** en quantité suffisante.*

Constitution des nuages :

Ils peuvent être constitués :

- *d'eau liquide température positive ;*
- *d'eau liquide température négative (eau surfondue) ;*
- *de cristaux de glace*
- *les trois à la fois.*

Classification des nuages :

Il existe 10 genres de nuages classés en 3 étages :

- étage bas ou inférieur de 0 à 2 500 m ;
- étage moyen, de 2 500 à 6 000 m ;
- étage haut ou supérieur, de 6 000 à 13 000 m.

Les noms de **cumulus** et **stratus** se retrouvent à tous les étages. Ceux de l'étage moyen sont précédés du préfixe « **alto** », et ceux de l'étage supérieur du préfixe « **cirro** ».

Lorsque les nuages se forment dans une atmosphère **stable**, ils sont des genres **stratiformes** : *stratus, altostratus, cirrostratus*.

Lorsque les nuages se forment dans une atmosphère **instable**, ils sont des genres **cumuliformes** ; *cumulus, altocumulus, cirrocumulus, cumulonimbus*.

CLASSIFICATION DES NUAGES		
Genre de Nuage	Abréviation usuelle	Etage
Cirrus	Ci	Supérieur de 6 000 m à 13 000 m (20 000 ft à 40 000 ft)
Cirrostratus	Cs	
Cirrocumulus	Cc	
Nimbostratus	Ns	Moyen de 2 500 à 6 000 m (8 000 ft à 20 000 ft)
Altostratus	As	
Altocumulus	Ac	
Stratus	St	Inférieur du sol à 2 500 m (0 à 8 000 ft)
Stratocumulus	Sc	
Cumulus	Cu	
Cumulonimbus	Cb	

Genres des nuages de l'étage inférieur :

Stratus :

- **Genre :** *St* ;
- **Aspect :** *Uniforme ou déchiqueté. Lorsqu'il est déchiqueté, se trouve souvent au dessous d'une masse nuageuse précipitant ;*
- **Précipitations associées :** *Stables et très fines (bruine) ;*
- **Luminance :** *Gris et Gris-blanc ;*
- **Hauteur moyenne de la base :** *Inf. à 1 000 ft (300 m).*



Stratocumulus :

- **Genre :** *Sc* ;
- **Aspect :** *En galets, dalles, rouleaux ;*
- **Précipitations associées :** *Généralement faibles et stables, jamais sous forme d'averses ;*
- **Luminance :** *Gris-blanc ;*
- **Hauteur moyenne de la base :** *Entre 1 000 et 8 000 ft (300 à 2 500 m).*



Cumulus :

- **Genre :** Cu ;
- **Aspect :** Mamelons avec bourgeonnements faibles, modérés ou importants en forme de chou-fleur. Contours souvent bien délimités au sommet ;
- **Précipitations associées :** Toujours sous forme d'averses ;
- **Luminance :** Base sombre, généralement grise. Nuage blanc éclatant au soleil ;
- **Hauteur moyenne de la base :** Entre 1 000 et 8 000 ft (300 à 2 500 m).



Cumulonimbus :

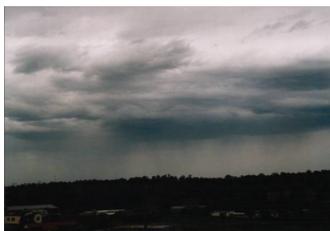
- **Genre :** Cb ;
- **Aspect :** Nuage d'orage. Tonnerres et éclairs (mais pas systématiquement). Immenses bourgeonnements. Sommet s'étalant souvent dans l'étage supérieur (forme d'enclume) ;
- **Précipitations associées :** Toujours sous forme d'averses, souvent très fortes ;
- **Luminance :** Base très sombre et très "menaçante". Nuage blanc éclatant au soleil ;
- **Hauteur moyenne de la base :** Entre 1 000 et 8 000 ft (300 à 2 500 m)



Genres des nuages de l'étage moyen :

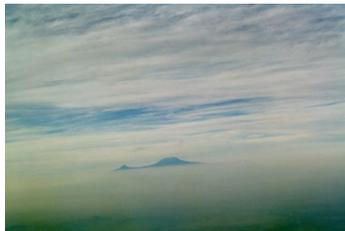
Nimbostratus :

- **Genre :** Ns ;
- **Aspect :** Immense masse informe, sombre et pluvieuse. Très grande épaisseur. Ne laisse jamais voir le soleil ;
- **Précipitations associées :** Stables, plus ou moins continues, et généralement importantes (modérées à fortes) ;
- **Luminance :** Gris très sombre ;
- **Hauteur moyenne de la base :** Sup. à 8 000 ft (2 500 m) au moment de sa formation.



Altostratus :

- **Genre :** As ;
- **Aspect :** Nappe uniforme (striée ou fibreuse). A son ombre propre, mais présente des parties suffisamment minces pour laisser voir au moins vaguement le soleil ;
- **Précipitations associées :** Stables, plus ou moins continues ;
- **Luminance :** Grisâtre ou blanchâtre ;
- **Hauteur moyenne de la base :** De 8 000 ft à 20 000 ft (2 500 m à 6 000 m).



Alto cumululus :

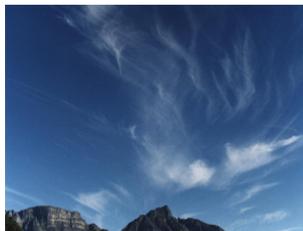
- **Genre :** *Ac ;*
- **Aspect :** *En galets et / ou en rouleaux. Eléments moyens. Ombre du nuage visible sur le sol ;*
- **Précipitations associées :** *Elles n'atteignent pas le sols ;*
- **Luminance :** *Blanc et / ou gris avec des parties ombrées ;*
- **Hauteur moyenne de la base :** *De 8 000 ft à 20 000 ft (2 500 m à 6 000 m).*



Genres des nuages de l'étage supérieur :

Cirrus :

- **Genre :** *Ci ;*
- **Aspect :** *Nuage séparés en forme de cheveux, vertèbres, arrête de poisson ou autre ;*
- **Précipitations associées :** *Jamais de précipitation du fait de la température très faible. Pas assez de vapeur d'eau ;*
- **Luminance :** *Très souvent blanc avec des parties grisâtres si le Ci est épais ;*
- **Hauteur moyenne de la base :** *Entre 16 000 et 40 000 ft (5 000 à 13 000 m).*



Cirrostratus :

- **Genre :** Cs ;
- **Aspect :** Voile uniforme ou fibreux. Ne supprime pas les ombres au sol lorsque le soleil est suffisamment élevé au-dessus de l'horizon ;
- **Précipitations associées :** Jamais de précipitation du fait de la température très faible. Pas assez de vapeur d'eau ;
- **Luminance :** Blanc souvent associé à un phénomène de halo solaire ou lunaire. Contour du soleil nettement discernable ;
- **Hauteur moyenne de la base :** Entre 16 000 et 40 000 ft (5 000 à 13 000 m).

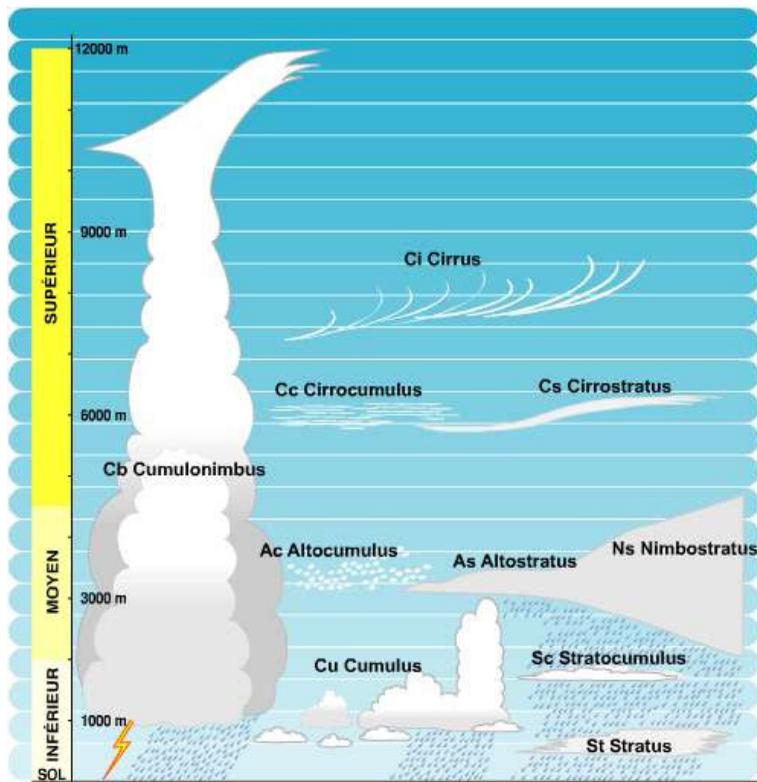


Cirrocumulus :

- **Genre :** Cc ;
- **Aspect :** En granules ou en rides. Ombre du nuage non visible au sol ;
- **Précipitations associées :** Jamais de précipitation du fait de la température très faible. Pas assez de vapeur d'eau ;
- **Luminance :** Blanc, sans parties ombrées ;
- **Hauteur moyenne de la base :** Entre 16 000 et 40 000 ft (5 000 à 13 000 m).



Représentation schématique des différents genres de nuages :



LE BROUILLARD

Le terme brouillard est réservé à une visibilité horizontale, à hauteur des yeux (1 m 80), inférieure à 1 000 m.

*Lorsque la visibilité est comprise entre 1 000 et 5 000 m, on utilise le terme de **brume**.*

Généralement on considère qu'il y a brouillard lorsqu'il y a 0,5 gramme d'eau condensé par kilogramme d'air sec.

Dans la masse d'air pour qu'il y ait condensation, il faut que la pression partielle (e) de la vapeur d'eau augmente jusqu'à ce que la relation $e = e_w$ soit atteinte :

- *soit par refroidissement de l'air ($T \searrow$, donc $e_w \searrow$) ;*
- *soit par apport de vapeur d'eau ($e \nearrow$) ;*
- *soit par les deux évolutions conjuguées.*

On dénombre 5 processus principaux de formation de brouillard.

1 – Brouillard de rayonnement :

Processus de formation :

Par ciel dégagé et vent faible, en fin de journée ou la nuit, le rayonnement du sol est maximum : le sol se refroidit.

L'air se refroidissant ($T \searrow$), cela entraîne une diminution de e_w , et donc une augmentation de l'humidité relative.

Caractéristiques principales :

Il est généralement très dense et réduit la visibilité à moins de 1 000 m. Il se dissipe généralement pendant le jour sous l'effet du rayonnement solaire. S'il est peu épais, il se dissipe totalement ; dans le cas contraire il évolue en stratus.

Situations privilégiant le brouillard de rayonnement :

Intervalles clairs ou eu nuageux dus :

- à un anticyclone ;
- à une dorsale ;
- à un marais barométrique.

Remarques :

*Si le vent est calme, le refroidissement ne se transmet pas en altitude et seule la couche d'air qui se trouve en contact direct avec le sol est refroidie. Dans ce cas, il y a formation de **rosée**.*

Si le vent est trop fort, il brasse une couche d'air trop épaisse qui ne se refroidit pas suffisamment. Il peut alors en résulter de la brume et / ou des stratus.

2 – Brouillard d'évaporation :

Processus de formation :

Au dessus d'une étendue d'eau, si la température de l'air est inférieure à celle de la surface, l'évaporation peut être suffisante pour entraîner la saturation de l'air, puis la condensation de la vapeur d'eau.

Caractéristiques principales :

Au processus qui vient d'être indiqué, s'ajoute un autre effet : par réchauffement à la base de l'air froid préalablement stable, il se déclenche un effet de convection (l'air plus chaud monte). Les particules d'air non saturées, mais réchauffées et enrichies e humidité, s'élèvent et se saturent dans la couche turbulente.

Le brouillard d'évaporation se présente souvent en bancs. Son épaisseur reste presque toujours inférieure à 50 m.

Conditions favorables :

Air froid stable surmontant une surface chaude et humide (10° de différence environ pour qu'il puisse se former) et vent faible.

Situations privilégiant le brouillard de rayonnement :

- *air polaire : arrivée sur la mer d'une masse d'air refroidie et stabilisée par son passage sur les glaces ;*
- *descente d'air froid des montagnes vers les lacs ou la mer ;*
- *en été ou en automne après une averse ou une pluie sur un sol surchauffé (effets limités).*

3 – Brouillard d'advection :

Il se forme lorsqu'une masse d'air chaude et humide arrive au-dessus d'une surface froide.

Caractéristiques principales :

Il est rarement très dense, mais son épaisseur verticale peut-être importante (plusieurs centaines de mètres).

Le vent nécessaire à la formation est un vent modéré (7 à 15 kt).

La cessation est liée à l'une des conditions suivantes :

- *réchauffement de la surface froide (effet lent) ;*
- *cessation du vent (effet assez lent) ;*
- *changement de masse d'air, la nouvelle étant moins chaude et moins humide (évolution rapide).*

Conditions favorables :

Passage d'une masse d'air chaud et humide au-dessus d'un sol froid, avec vent modéré.

Situations privilégiant le brouillard de rayonnement :

Sur terre et aux latitudes moyennes, c'est le brouillard spécifique des secteurs chauds de perturbation en hiver.

En automne et en hiver, lorsqu'une importante différence de température existe entre la mer et la terre (mer plus chaude que la terre).

4 – Brouillard de mélange :

Processus de formation :

Lorsque deux masses d'air fortement humide mais non saturées et de température nettement différentes, sont mélangées par un brassage important. La masse d'air résultante peut arriver à saturation.

Caractéristiques principales :

Il est peu dense en soi et le processus engendre le plus souvent de la brume.

Conditions indispensables au brouillard de mélange :

- *fort écart de température entre les deux masses d'air ;*
- *forte humidité préalable des deux masses d'air ;*
- *turbulence suffisante pour opérer le brassage (vent modéré à fort).*

Situations privilégiant le brouillard de mélange :

Il doit nécessairement y avoir conflit de deux masses d'air, d'où présence d'un front ; ce sera le plus souvent un front chaud (brouillard frontal) accompagnant ou précédant un brouillard d'advection.

Remarque :

Ce processus, qui engendre un brouillard peu dense peut, par contre contribuer à renforcer un autre processus (advection, détente, évaporation).

5 – Brouillard de détente :

Processus de formation :

Une baisse de pression provoque une baisse de température (donc de e_w) par détente adiabatique. Si e_w atteint e , il y a saturation, puis condensation.

Caractéristiques principales :

Il se présente souvent en bancs plus ou moins localisés, évoluant selon la direction et la vitesse du vent.

Conditions favorables :

- pente douce au flanc d'une colline ou d'une montagne, forçant l'air humide à se soulever ;
- le vent doit être faible à modéré et peu turbulent.

LES PRÉCIPITATIONS

Lorsque la condensation est intense, le diamètre des gouttelettes (entre 0,02 et 0,05 mm) qui forment les nuages, s'accroît rapidement. Par suite la vitesse de chute de ces gouttelettes devient appréciable et on dit qu'il y a **précipitations**.

Processus de grossissement des gouttelettes :

- grossissement par transfert de vapeur d'eau ;
- grossissement par coalescence.

Différentes précipitations :

- **pluie** : gouttes d'eau de diamètre de 0,5 à 6 mm ;
- **bruine** : gouttes d'eau de diamètre inférieur à 0,5 mm ;
- **neige** : cristaux de glace ramifiés de diamètre de l'ordre de 0,1 mm, agglomérés en flocons ;
- **grésil** : granules de glace de diamètre inférieur à 5 mm ;

- **grêle** : globules ou morceaux de glace de 5 mm à 5 cm de diamètre.

On appelle par ailleurs :

- **chutes** : des précipitation qui durent souvent plus d'une heure et qui sont liées à des nuages horizontaux ;
- **averses** : des précipitation de courte durée (inférieur à une heure).

LA VISIBILITÉ

Visibilité météorologique (VIS) : A vue, par un tour d'horizon de 360°, lorsque l'observateur détermine la valeur de la visibilité de jour comme de nuit (repères lumineux la nuit).

C'est la visibilité minimale mesurée au cours d'un tour d'horizon qui est considérée comme la visibilité météorologique ou officielle.

Visibilité balises (VIBAL) : Visibilité sur la piste ou non loin du seuil de piste, en comptant le nombre de balises visibles, lui permettant sachant que l'espacement de mesuré la visibilité.

Portée visuelle de piste (PVP ou RVR) : Grâce à des transmissomètres. Ensembles électroniques composé d'un émetteur, d'un récepteur, d'un luminancemètre et d'un calculateur qui à partir de information reçue des trois appareils précédents, et également en fonction de l'intensité du balisage, calcule un visibilité appelée **PVP (Portée Visuelle de Piste)** ou **RVR (Runway Visual Range)**.

La RVR est transmise au pilote dès que la visibilité est inférieure à 1 500 m et mentionnée dans les messages météorologiques.

Visibilité en vol (visibilité oblique) : Elle correspond à la visibilité le long de l'axe « œil du pilote / seuil de piste ». Elle ne peut être mesurée directement.

Principaux troubles de la visibilité :

- **Brouillard (FZ) :** visibilité $< 1\ 000\ m$;
- **Brume (BR) :** visibilité comprise entre $1\ 000$ et $5\ 000\ m$;
- **Brume sèche (HZ) :** visibilité $\leq 5\ 000\ m$ avec une humidité $< 60\ \%$. Est due à des poussières, sables et fumée.
- **Précipitation (RA, SN, GR, GS) :** liquides ou solides
- **Vapeur d'eau ;**
- **Nuages :** ne concerne que les vols IFR, le vol VFR étant interdit dans les nuages.

MASSES D'AIR

On appelle masse d'air un très grand volume de l'atmosphère, dans lequel on note une certaine homogénéité de la température et de l'humidité.

L'existence et le déplacement de ces masses d'air sont dus à différentes actions :

- Un sol froid refroidit l'air par conduction ;
- Un sol chaud réchauffe l'air à son contact. La convection propage assez rapidement cette chaleur ;
- Une surface humide charge l'air en vapeur d'eau ;
- Une surface sèche dessèche l'air peu à peu ;
- Les anticyclones et dépressions déplacent ces masses d'air.

Principales masses d'air :

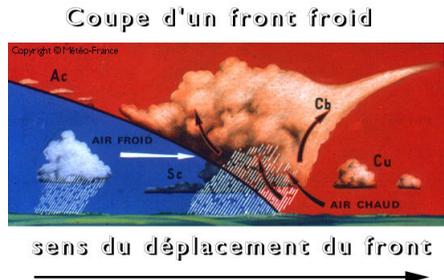
- **Air arctique :** Cette masse d'air s'étend jusqu'à l'axe dépressionnaire du $60^{\circ}N$;
- **Air polaire :** Masse d'air frais qui se trouve entre le $60^{\circ}N$ et $40^{\circ}N$;
- **Air tropical :** Masse d'air chaud s'étendant du $40^{\circ}N$ au $5^{\circ}N$;
- **Air équatorial :** Masse d'air chaud située entre le $5^{\circ}N$ et le $5^{\circ}S$.

Le contact entre deux masses d'air se fait selon une surface appelée **surface frontale**. L'intersection de cette surface avec la surface terrestre est appelée **front**.

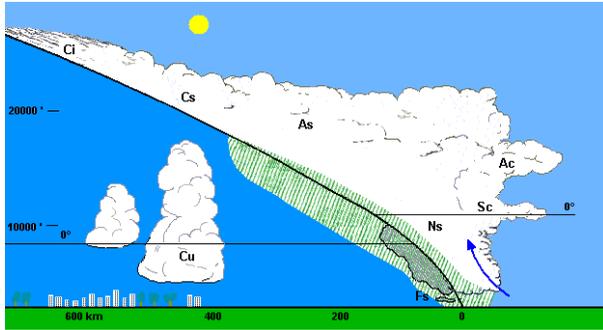
LES FRONTS

Front froid :

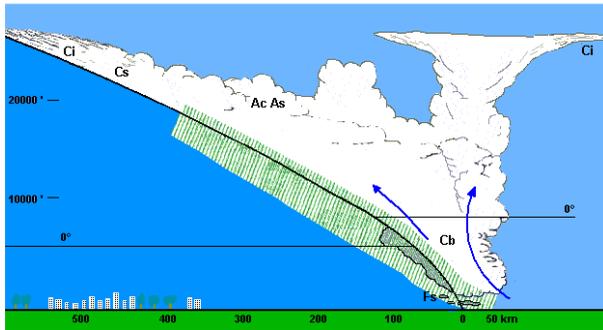
Un front froid est la portion d'un système frontal où l'air froid avance plus rapidement que l'air chaud.



CARACTERES DES FRONTS FROIDS			
	à l'avant du front	sur le front	après le front
Nuages	Cirrus en altitude, accumulation massive de cumulo-nimbus	Nuages de pluie. (nimbostratus, cumulus)	Eclaircie souvent très rapide.
Pa	↘	↗	↗
Vents	de sud-ouest, frais et forts	ouest à nord-ouest, froids et orageux voire même en tempête	nord-ouest, parfois forts, frais
Température	↘	↘	↘
Visibilité	assez bonne	mauvaise	bonne
Temps	nuages "menaçants" à l'ouest et au nord-ouest	ciel entièrement couvert de nuages rapides et nébulosité épaisse	tendance aux averses de pluie, temps instable à l'arrière



Front froid stable



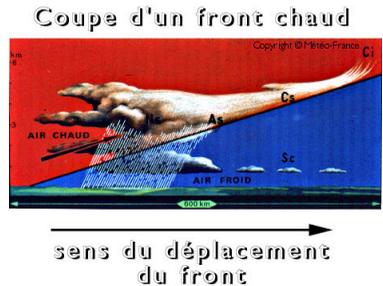
Front froid instable

Le front froid est représenté sur les cartes par une ligne bleue ou une ligne à petits triangles indiquant la direction de son déplacement.



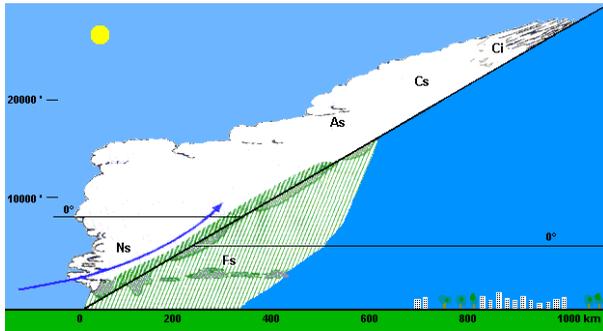
Font chaud :

Un front chaud est une portion d'un système frontal qui se déplace de façon telle que la masse d'air la plus chaude avance au détriment de la plus froide.

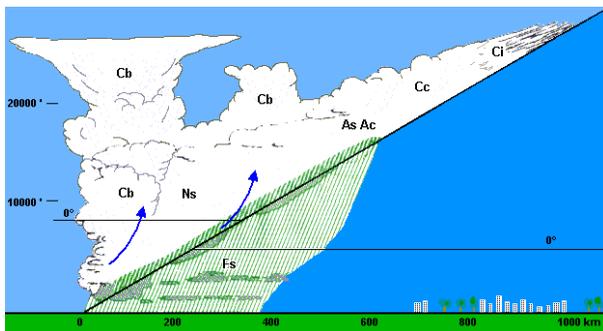


CARACTERES DES FRONTS CHAUDS			
	à l'avant du front	sur le front	après le front
Nuages	Passage de Cirrus. Couches de stratus et cumulus faisant suite (altostratus, altocumulus)	Epais nuages de pluie. (nimbostratus)	Dissipation des nuages.
Pa	↘	↘	→ parfois ↘
Vents	sud-est à sud	sud, fraîchissants	sud-ouest à ouest, frais et plus chauds
Température	↘	↗	↗
Visibilité	de plus en plus mauvaise	mauvaise	amélioration continue
Temps	ciel très gris, pluies légères	très nuageux, averses	Parfois éclaircies, pluies qui vont en faiblissant

En pareille situation, comme l'air chaud monte au-dessus de l'air froid, la pente de la surface frontale est inversée.



Front chaud stable



Front chaud instable

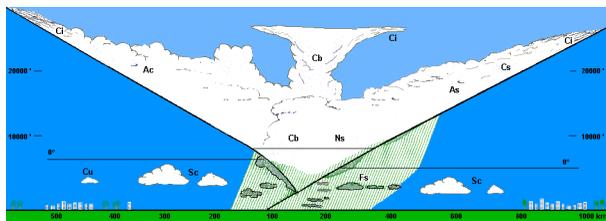
Le front chaud est toujours représenté par une ligne rouge, ou des demi-lunes, indiquant la direction du déplacement.



Occlusion :

*Lorsqu'un système météorologique s'intensifie, son front froid accélère de sorte qu'il rattrape le front chaud. Lorsque le front froid atteint le front chaud, l'air chaud devient de plus en plus pincé ou coincé entre les deux fronts. Il sera soulevé en altitude et le système devient **occlus** ou **occlusion**.*

CARACTERES DES FRONTS OCCLUS			
	à l'avant du front	sur le front	après le front
Nuages	Nuages de pluie. (nimbostratus)	Forte nébulosité. (nimbostratus, cumulus)	Dissipation des nuages.
Pa	↘	↘	↗
Vents	nord-ouest fraîchissant	nord-ouest se renforçant	nord-est frais faiblissant
Température	↘	↘ ou →	↘
Visibilité	moyenne	mauvaise	bonne
Temps	très nuageux et précipitations	très nuageux et précipitations	dissipation des nuages, encore quelques averses



Ci-dessus, une occlusion à caractère de front chaud. L'arrière se caractérise par un temps plus chaud avec des cumulus et des stratocumulus.

Ci-dessous une occlusion à caractère de front froid. L'avant est plus chaud que l'arrière.

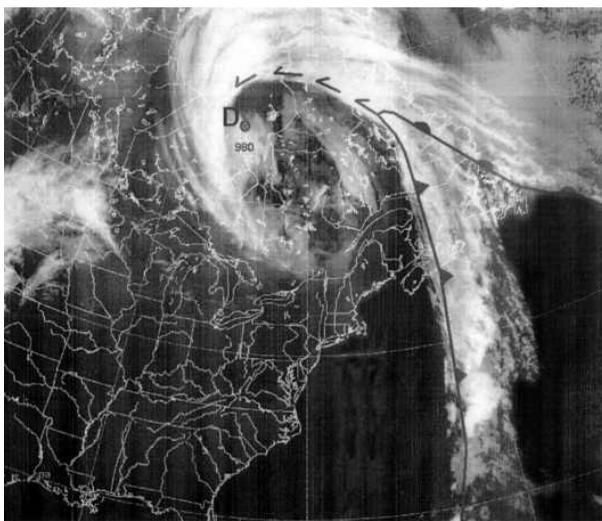
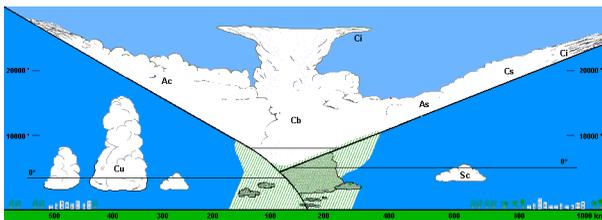


Photo prise en infrarouge par GOES-8, le 22 octobre 1995, à 23:15 TU, illustrant que l'air chaud, qui est bien au sud-est de la dépression, est relié à une occlusion.

POINTS D'ANALYSE	SYMBOLE MONOCHROME	SYMBOLE POLYCHROME
FRONT FROID		
EN SURFACE		
EN ALTITUDE		
EN ALTITUDE DESCENDANT EN SURFACE		
FRONTOLYSE		
FRONTOGÉNÈSE		
FRONT CHAUD		
EN SURFACE		
EN ALTITUDE		
EN ALTITUDE DESCENDANT EN SURFACE		
FRONTOLYSE		
FRONTOGÉNÈSE		
FRONT QUASI-STATIONNAIRE		
EN SURFACE		
EN ALTITUDE		
FRONTOLYSE		
FRONTOGÉNÈSE		
FRONT OCCLUS		
EN SURFACE		
FRONTOLYSE		
AUTRE		
TROWAL (LANGUE D'AIR CHAUD EN ALTITUDE)		
LIGNE D'INSTABILITÉ		

Effet du relief sur les perturbations :

*Sur le **versant au vent**, on observe une aggravation des conditions plusieurs heures avant l'arrivée de la perturbation, du fait du mouvement ascendant de la masse d'air.*

Avant l'arrivée d'un front :

- *le vent crée des courants ascendants ;*
- *augmentation de l'humidité de l'air ;*
- *formation nuageuse et pluie ;*
- *si la masse d'air est instable, formation de Cb.*

Lorsque le front arrive au-delà du sommet du relief, on dit qu'il aborde le **versant sous le vent**. Il est soumis à deux phénomènes :

- une **subsidence** (descente) généralisée de l'air ;
- un **assèchement** provoqué par la subsidence et part la perte d'eau lors des précipitations abondantes sur le côté au vent.

Sur un relief important, les nuages se résorbent en arrivant sous le vent. Ce phénomène est appelé « **effet de Foehn** ».

PHÉNOMÈNE DANGEREUX POUR L'AÉRONAUTIQUE

La turbulence :

On classe la turbulence en fonction des accélérations subies par l'avion :

- Très faible : $\gamma < 0,05g$
- Modérée : $0,2g < \gamma < 0,5g$
- Forte : $0,5g < \gamma < 1,5g$
- Extrême : $\gamma > 1,5g$

Différents types de turbulence :

- Turbulence convertible ;
- Turbulence de frottement ;
- Turbulence orographique ;
- Turbulence en ciel clair (TAC ou CAT).

Cisaillement du vent dans les basses couches :

- Cisaillement vertical du vent ;
- Cisaillement du vent vertical ;
- Cisaillement horizontal du vent.

Causes du cisaillement :

- Les orages ;
- Les fronts de rafales ;
- L'effet orographique ;
- L'effet de brise ;
- Les masses frontales ;
- Les microbursts.

Le givrage :

On distingue trois types de formation de givre sur un avion :

- Cessation de l'état de surfusion de l'eau ;
- Congélation de l'eau liquide ;
- Condensation solide.

Les températures les plus favorables au givrage sont :

- Pour les nuages stables : 0 à -10°C. Rare à partir de -18°C ;
- Pour les nuages instables : 0 à -15°C. Fréquent jusqu'à -30°C.

Type de givrage :

- **Gelée blanche** : Dépôt de glace d'aspect cristallin. Givrage faible et n'affecte pas les conditions de vol.
- **Givre blanc** : Congélation rapide des très petites gouttelettes en surfusion. Givrage d'intensité faible, parfois modérée. Il ne pose pas de problèmes à l'avion équipé de systèmes de dégivrage.
- **Givre transparent** : Dépôt de glace homogène et transparent d'aspect vitreux et lisse. Congélation de grosses gouttelettes surfondues. Associé aux nuages convectifs : Cu, Cb, Ac. D'intensité forte est **très dangereux**.
- **Verglas** : Se forme sur l'ensemble de l'appareil. Peut se rencontrer hors des nuages au voisinage d'un front.
 - Il se rencontre en général :
 - toujours dans la masse d'air froid ;
 - a l'avant d'un front chaud ;
 - a l'arrière d'un front froid ;
 - de part et d'autre d'une occlusion.

Le verglas donne un givrage de forte intensité. Il est de loin le plus dangereux et affecte l'ensemble de l'avion.

Les orages :

Différents types d'orages :

- Orage de masse d'air également appelés orages thermiques ou orages de chaleur ;
- Orage orographique ;
- Orage de front chaud noyés dans les nimbostratus (EMBD) ;
- Orage de front froid ;

- Orage d'occlusion ;
- Orage de front froid secondaire ;
- Orage de Thalweg d'altitude.

Phénomènes dangereux associés aux orages :

- *Turbulence dans la zone orageuse. Les vitesses verticales les plus fortes peuvent atteindre et dépasser :*
 - Pour les courants ascendants : 35 m/s (7 000 ft/min)
 - Pour les courants descendants : 15 m/s (3 000 ft/min)
- *Turbulences en dehors de la zone orageuse. Elle peuvent être observées jusqu'à une distance de 10 à 20 Nm du cumulonimbus.*
- *Givrage*
- *Grêle*
- *Foudre dont les conséquences sur un avion peuvent être :*
 - peinture noircie ou brûlée ;
 - perforation de la cellule, fusion de pièces métalliques ;
 - radômes de radar éclatés ;
 - érosion du pare-brise ;
 - éblouissement de l'équipage.
- *Trombe et tornade qui se manifestent par une colonne nuageuse et un buisson.*
- *Grain. Pour qu'il y ait grain, il faut que la vitesse instantanée soit d'au moins 11 m/s (22 kt) et dépasse d'au moins 8 m/s (15 kt) la vitesse moyenne initiale pendant au moins une minute. Le passage d'un grain s'accompagne de :*
 - hausse brusque de la pression ;
 - baisse brusque de la température ;
 - hausse brusque de l'humidité.

Phénomènes météorologiques particuliers :

Front Inter Tropical (FIT) :

*Sur l'Afrique occidentale, la trace au sol de l'équateur météorologique est appelée **front intertropical (FIT)**. La zone de mauvais temps se situe au sud du FIT au moins à 100 km et parfois plus (300 km). Elle s'étend sur une bande de 500 à 1 000 km de large.*

Vent de sable :

- **Chasse poussière ou chasse sable**, poussière ou sable soulevés du sol à des hauteurs faibles ou modérées par un vent suffisamment fort et turbulent ;
- **Tempête de poussière ou tempête de sable**, poussière ou sable puissamment soulevés du sol jusqu'à de grandes hauteurs par un vent fort et turbulent ;
- **Tourbillon de poussière ou de sable** ;
- **Brume de sable**, poussière ou sables accompagnés parfois de petit débris, soulevés du sol sous forme d'une colonne tourbillonnante.

Cyclone tropical :

C'est une perturbation tourbillonnaire d'une centaine de km de diamètre et qui évolue pendant 4 à 10 jours. Associé à une forte dépression de 60 à 80 hPa.

Les courants jets (jet streams) :

Il s'agit d'axes de vents forts, pouvant atteindre 200 kt (100 m/s), caractérisés par de très importants gradients transversaux de vitesse, et que l'on observe au voisinage de la tropopause.

Le jet du front polaire (JFP), il est situé aux latitudes tempérées, près du front polaire. Il s'établit toujours dans l'air chaud tropical.

- 9 à 15 km ;
- Vitesse maxi : 60 à 80 kt l'été et 120 à 160 kt l'hiver ;
- Courant d'Ouest, il peut souffler également du NO, SO, N à NE ;
- Latitude : 40° et 60° ;
- Longueur : quelques milliers de km ;
- Largeur : quelques centaines de km ;
- Epaisseur : quelques km.

Le jet subtropical (JST), ce jet d'Ouest se situe en moyenne vers le 30° de latitude. Il est plus rapide en hiver qu'en été. Il est situé à 15 km d'altitude.

**ABRÉVIATIONS DE TEMPS SIGNIFICATIF DANS LES CODES METAR,
SPECI ET TAF**

Intensité ou proximité	Descripteur	Précipitations	Obscurcissement	Autres phénomènes
- : faible + : forte VC : au voisinage Pas de symbole : modéré	MI : mince PR : partiel BC : bancs DR : chasse-poussière sable neige basse BL : chasse-poussière sable neige élevée SH : averse(s) TS : orage FZ : se congelant	DZ : bruine RA : pluie SN : neige SG : neige en grains IC : cristaux de glace PL : granules de glace GR : grêle GS : grésil et/ou neige roulée	BR : brume FG : brouillard FU : fumée VA : cendres volcaniques DU : poussière généralisée SA : sable HZ : brume sèche	PO : tourbillons de poussière-sable SQ : grains FC : nuages en entonnoir (trombe terrestre ou trombe marine) SS : tempête de sable DS : tempête de poussière

SYMBOLES DU TEMPS SIGNIFICATIF ET DE LOCALISATION CARTES (TEMSI)

Symboles du temps significatif		Localisation
	Pluie (<i>Rain</i>)	COT : sur la côte
	Bruine (<i>Drizzle</i>)	LAN : à l'intérieur des terres
	Pluie se congelant (<i>Freezing rain</i>)	LOC : localement
	Neige* (<i>Snow</i>)	MAR : en mer
	Averse* (<i>Shower</i>)	MON : au-dessus des montagnes
	Grêle (<i>Hail</i>)	SFC : en surface
	Givrage faible* (<i>Light icing</i>)	VAL : dans les vallées
	Givrage modéré (<i>Moderate icing</i>)	CIT : à proximité ou au-dessus des villes importantes
	Givrage fort (<i>Severe icing</i>)	
	Brume	
	de grande étendue (<i>Widespread mist</i>)	
	Brouillard étendu* (<i>Widespread fog</i>)	
	Fumée	
	de grande étendue (<i>Widespread smoke</i>)	
	Forte brume de sable ou de poussière (<i>Severe sand or dust haze</i>)	
	Matières radioactives dans l'atmosphère	
	Éruption volcanique	
	Tempête de sable ou de poussière de grande étendue (<i>Widespread sandstorm or duststorm</i>)	
	Brume sèche de grande étendue (<i>Widespread haze</i>)	
	Turbulence modérée (<i>Moderate turbulence</i>)	
	Turbulence forte (<i>Severe turbulence</i>)	
	Turbulence en atmosphère claire (<i>Clear air turbulence</i>)	
	Ligne de grains forts (<i>Severe line squall</i>)	
	Orage (<i>Thunderstorm</i>)	
	Ondes orographiques (<i>mountain waves</i>) - MTW	
	Cyclone tropical (<i>Tropical cyclone</i>)	
	Chasse-neige élevée de grande étendue (<i>Widespread blowing snow</i>)	
	Obscurcissement des montagnes	

* Ces symboles ne sont pas utilisés pour les cartes destinées aux vols à haute altitude

REPRÉSENTATION DES FRONTS, DES ZONES DE CONVERGENCE ET DES SYSTÈMES ISOBARIQUES

	front froid (en surface)		front quasi stationnaire (en surface)
	front chaud (en surface)		ligne de convergence
	projection en surface du front occlus		zone de convergence intertropicale

25 : le chiffre donne la vitesse prévue du déplacement (en nœuds)
 : la flèche indique la direction prévue du déplacement
SLW : déplacement lent
STNR : stationnaire
L : centre de basse pression
H : centre de haute pression avec indication de la pression au centre en hectopascals (hPa)

DÉLIMITATION DES ZONES

	Ligne festonnée : limite des zones de temps significatif
	Ligne épaisse discontinue : limite des zones de Turbulence en Air Clair
	NB : un chiffre entouré d'un carré peut renvoyer à une légende indiquant les caractéristiques de la zone de CAT (turbulence en air clair).

AXES DE JET

	FL340 ➔	Axe d'un courant jet avec indications sur le vent maximal (nœuds) (voir page 25 la signification des barbules et des fanions) et son niveau. La double barre indique des changements de niveau de 3 000 pieds au maximum et/ou des changements de vitesse du vent de 20 nœuds au minimum.
--	---------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

ISOTHERME 0°, TROPOPAUSE, TEMSI EUROCC

0° 150	Altitude en niveau de vol de l'isotherme 0 °C
330	Altitude en niveau de vol de la tropopause : sur certaines cartes nationales, on pourra aussi noter la représentation
-50° 330	température et niveau de la tropopause
H 460	Altitude maximale de la tropopause
260 L	Altitude minimale de la tropopause

VISIBILITÉ – NUAGES

Isothermes 0° et -10° - TEMSI France :

Les altitudes des isothermes 0 °et -10 ° en centaines de pieds au-dessus du niveau moyen de la mer, sont représentés de la façon suivante :

-10	115
0°	050

Visibilité de surface – TEMSI France :

- **V0** : pour $0 \text{ km} \leq \text{visibilité} < 1,5 \text{ km}$
- **V1,5** : pour $1,5 \text{ km} \leq \text{visibilité} < 5 \text{ km}$
- **V5** : pour $5 \text{ km} \leq \text{visibilité} < 8 \text{ km}$
- **V8** : pour $\text{visibilité} \geq 8 \text{ km}$

Abréviations de la quantité de nuages :

Cumulonimbus

- **ISOL** : cumulonimbus isolés (CB bien séparés avec couverture spatiale maximale inférieure à 50 % de la zone concerné)
- **OCNL** : cumulonimbus occasionnels (avec couverture spatiale maximale comprise entre 50 et 75 % de la zone concerné)
- **FRQ** : cumulonimbus fréquents (avec couverture spatiale maximale > 75 % de la zone concerné)
- **EMBD** : cumulonimbus noyés dans des couches de nuages

Autres nuages

- **FEW** = peu (1 à 2 octas)
- **SCT** = épars (3 à 4 octas)
- **BKN** = fragmenté (5 à 7 octas)
- **OVC** = couvert (8 octas)
- **LYR** = en couches

LE CODE ODMX

Seuils de visibilité et de hauteur des nuages de plus de 4 octas :

h ≥ 600 m (2 000 pieds)	X	M3	D2	O
300 m (1 000 pieds) ≤ h < 600 m	X	M4	D3	D1
150 m ≤ h < 300 m	X	M5	M2	M1
h < 150 m (500 pieds)	X	X	X	X
Hauteur	V < 1,5 km	1,5 km ≤ V < 5 km	5 km ≤ V < 8 km	V ≥ 8 km
	Visibilité			

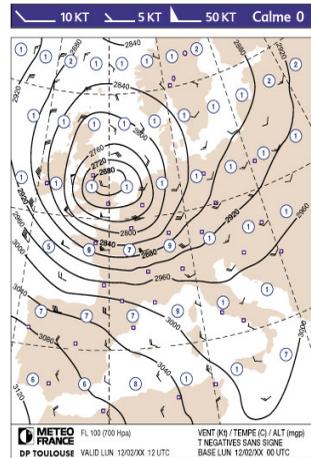
GARTE DES VENTS ET DES TEMPÉRATURES

En lignes continues les isohyses cotées en mètres géopotentiels.

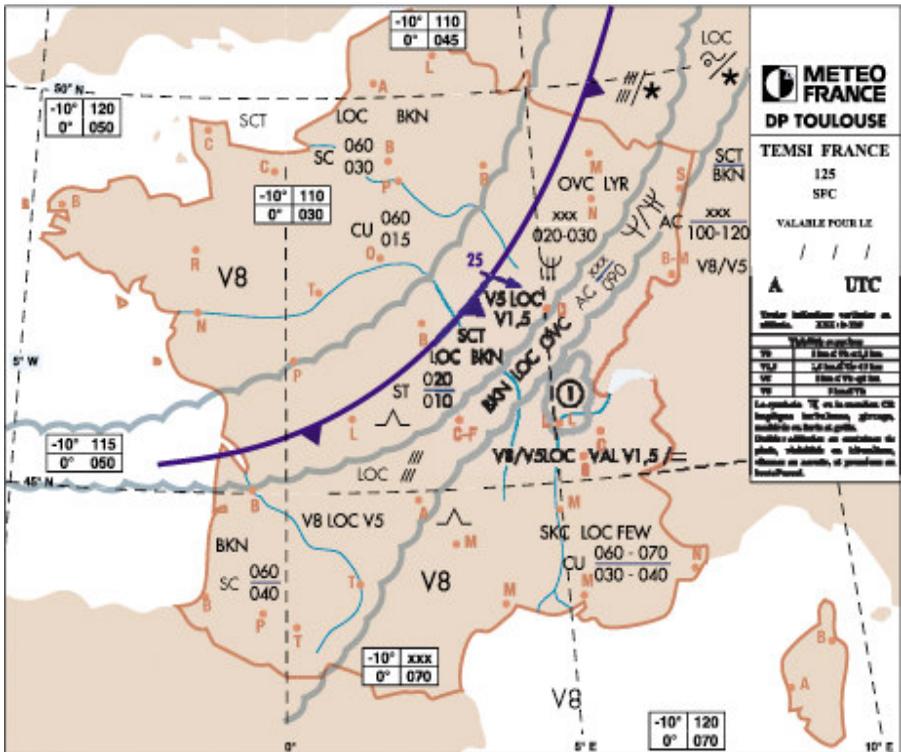
L symbolise le centre d'un système de basse altitude.
H symbolise le centre d'un système de haute altitude.

Sur certaines cartes, le vent par un système de flèches, barbules et fanions. Les flèches indiquent la direction du vent et le nombre de barbules donne sa vitesse.

Les températures en degré Celsius avec le signe + devant les températures positives.



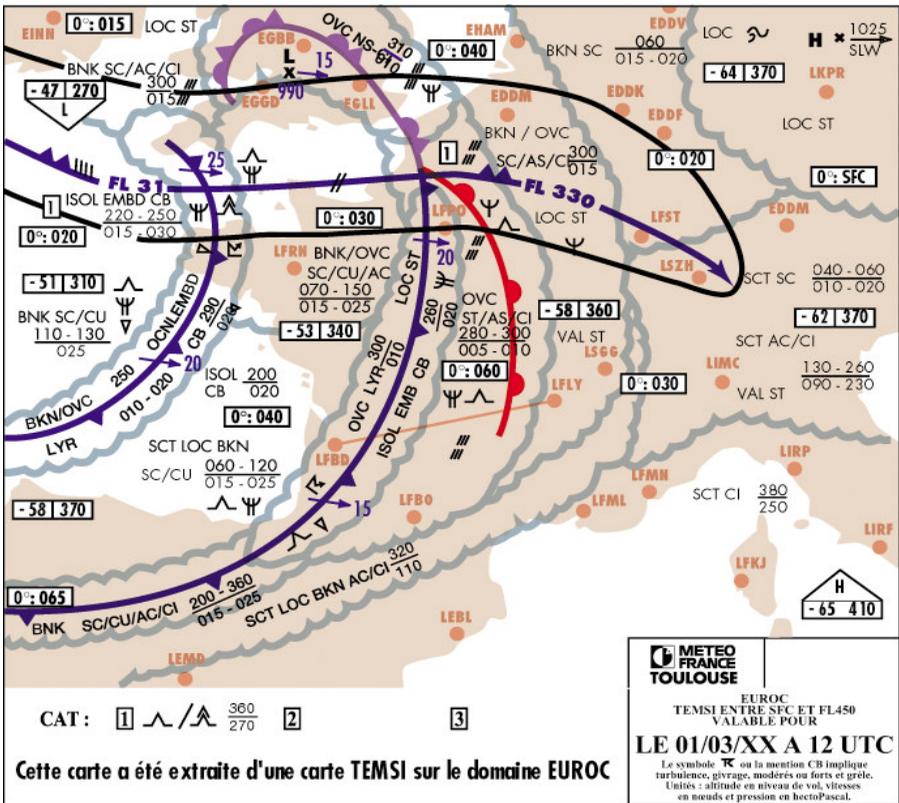
CARTE TEMSI FRANCE



La carte TEMSI France, élaborée pour les vols à basse altitude, sur cette carte, les indications verticales sont en altitude au-dessus du niveau moyen de la mer.

Elle est produite pour les heures de validité 09, 12, 15 et 18 h UTC et est disponible deux heures avant les heures de validité. Outre les phénomènes présentés sur la TEMSI EUROCC, la TEMSI France représente les types de nuages, l'altitude de l'isotherme -10 et les visibilités horizontales.

CARTE TEMSI EUROCC



La carte TEMSI sur le domaine EUROCC pour les vols à niveau moyen, prolongée vers les basses couches pour les phases de montée et descente. Elle est produite toutes les 3 h pour les heures de validité 03, 06, 09... h UTC et est disponible 4 heures avant les heures de validité.

Sur cette carte les indications verticales sont des **niveaux de vol**.

LEXIQUE

Altitude : distance verticale entre un niveau, un point ou un objet assimilé à un point, et le niveau moyen de la mer.

Anticyclone : zone où la pression atmosphérique est plus forte qu'aux alentours, déterminée sur une carte météo par un système d'isobares fermées dont la valeur est croissante vers le centre.

Base (d'un nuage) : désigne la partie la plus basse d'un nuage ou d'une couche nuageuse.

Brise (thermique) : vent local généré par une différence de température entre le bas et le haut d'une vallée ou d'une pente, ou bien entre deux régions s'échauffant de manière différente.

Brouillard : gouttelettes d'eau en suspension dans l'atmosphère réduisant la visibilité à moins de 1 km. En météorologie, le terme " brume " désigne des conditions atmosphériques réduisant la visibilité entre 1 et 5 km.

Cisaillement (de vent) : variation spatiale très marquée de direction et/ou vitesse du vent, générant de la turbulence. Un cisaillement est généralement associé à une couche d'inversion de température (le vent s'accélère et change de direction au niveau de l'inversion). Lorsque seule la vitesse du vent change, le terme de " gradient de vent " est souvent préféré, notamment au voisinage du sol.

Convection : phénomène de transfert de chaleur des basses couches de l'atmosphère vers les couches supérieures grâce aux ascendances thermiques.

Dépression : zone de basse pression, en surface et/ou en altitude, délimitée par une isobare fermée. Plus on s'approche du centre, plus la pression diminue. Souvent associée à une perturbation et à du vent plus ou moins fort.

Dorsale : axe (ou " crête ") de hautes pressions, prolongeant un anticyclone ou des hautes pressions.

Étalements : nuages, ou plus souvent couche de nuages, de type stratocumulus ou altocumulus, provenant de l'étalement des cumulus (généralement de leur sommet) sous une couche d'inversion lorsque l'air est assez humide.

Flux : désigne le vent en altitude à très grande échelle (surtout utilisé pour le niveau 500hPa, la direction du flux indiquant la direction d'où vient le vent).

Foehn (effet de) : phénomène de réchauffement et d'assèchement de l'air sous le vent d'une barrière montagneuse, lorsque des précipitations se produisent " au vent " du relief.

Front chaud : limite entre l'air froid antérieur et l'air chaud d'une perturbation (du front polaire), généralement accompagnée d'une vaste zone nuageuse et de précipitations.

Front froid : limite entre l'air chaud et l'air froid postérieur d'une perturbation, généralement accompagnée d'une vaste bande nuageuse et de précipitations assez fortes.

GAFFO : General Aviation French Forecast ; **GAFOR** : General Aviation FORecast : bulletins de prévision pour l'aviation générale, élaborés 3 ou 4 fois par jour, par les sept Directions Interrégionales de Météo-France, décrivant sur des zones aéronautiquement homogènes les conditions prévues sur des périodes de 6 heures de visibilité et de plafond en code ODMX (GAFOR) et de vent surface, 500, 1 000 et 1 500 m, isozéro et turbulence (GAFFO).

Gradient (de pression) : taux de variation de la pression entre deux points. Plus le gradient horizontal de pression est élevé, plus le vent est fort.

Gradient (de vent) : zone de rapide variation spatiale de la vitesse du vent. Le gradient de vent près du sol (forte diminution de la vitesse du vent dans les derniers mètres au-dessus du sol) que l'on peut constater dans certaines conditions météo (notamment le matin, ainsi qu'en hiver, lorsqu'une couche d'air froid stagne près du sol), peut générer des turbulences et/ou occasionner un décrochage des aéronefs.

Grain : accroissement soudain et très important du vent d'une durée de l'ordre de plusieurs minutes. Souvent accompagné d'averses ou d'orages.

Hauteur : distance verticale entre un niveau, un point ou un objet assimilé à un point, et un niveau de référence spécifié.

Instable : état d'une masse d'air ou d'une tranche d'atmosphère dans laquelle les mouvements verticaux (notamment la convection) vont en s'amplifiant. Une

atmosphère instable (dans toute l'épaisseur de la troposphère) donne généralement naissance à des cumulonimbus orageux (à condition que l'humidité de la masse d'air soit suffisante pour qu'il y ait condensation de la vapeur d'eau en nuage).

Inversion : couche dans laquelle la température croît lorsque l'altitude augmente, ce qui est l'inverse de ce qui se produit généralement dans la troposphère.

Isobare : ligne reliant les points où la pression est la même (généralement au niveau de la mer).

Isohypse : ligne reliant les points d'égale altitude à laquelle se mesure une pression donnée. Les lignes tracées sur les cartes météo en altitude sont des isohypses, représentant la topographie des surfaces de pression 850, 700, 500 hPa...

Masse d'air : vaste volume d'air dans lequel l'atmosphère possède des caractéristiques assez homogènes de température, humidité et stabilité, cela sur de grandes épaisseurs.

METAR : message d'observation météorologique régulière pour l'aviation (en code météorologique aéronautique).

Nébulosité : fraction de la voûte céleste occultée par les nuages.

Niveau de vol : surface isobare, liée à une pression de référence spécifiée, soit 1 013,2 hPa et séparée des autres surfaces analogues par des intervalles de pression spécifiés. Un altimètre barométrique étalonné d'après l'atmosphère type : a - calé sur le QNH, indique l'altitude ; b - calé sur le QFE, indique la hauteur par rapport au niveau de référence QFE ; c - calé sur une pression de 1 013,2 hPa peut être utilisé pour indiquer des niveaux de vol.

Noeud (abréviation kt, knot) : unité de mesure de vitesse du vent ou des fronts.

Nuages : en fonction de leur apparence et de leur altitude, ces volumes d'air chargé de gouttelettes d'eau et/ou de cristaux de glace ont été classés en dix genres, dont voici les noms et abréviations :

Cirrus (Ci) ; cirrocumulus (Cc) ; cirrostratus (Cs) ; altocumulus (Ac) ; altostratus (As) ; nimbostratus (Ns) ; stratocumulus (Sc) ; stratus (St) ; cumulus (Cu), (pouvant

être qualifiés, par taille croissante, de *fractus*, *humilis*, *médiocris* ou *congestus*, abrégé en *Cu fra*, *Cu hum*, *Cu med*, *Cu con*). *Cumulonimbus* (Cb).

Oclusion : zone nuageuse et pluvieuse caractérisée par le rejet en altitude de l'air chaud d'une perturbation. Cette limite de masses d'air résulte de la jonction du front chaud et du front froid d'une même perturbation (front chaud rattrapé par le front froid), ce qui donne naissance à une zone nuageuse et à des précipitations, assez intenses près du centre de la dépression associée, et de moins en moins marquées dans la partie la plus éloignée.

Octas : fraction du ciel (divisé en 8) occultée par les nuages d'un genre donné ou par tous les nuages présents. S'exprime en huitièmes de ciel couvert.

Ondes (de ressaut) : ondulations de l'atmosphère se produisant en aval d'une barrière montagneuse lorsqu'un vent fort est obligé de la franchir.

Perturbation : (atlantique, méditerranéenne) zone nuageuse et généralement pluvieuse (ou neigeuse), associée à une dépression ainsi qu'à une langue d'air chaud prise " en tenaille " entre deux masses d'air froides.

Point de Rosée : (Température du point de rosée) ; abréviation : Td (en anglais, *Temperature of dew point*) : température à laquelle il faut refroidir, à pression constante, une particule d'air pour qu'elle soit juste saturée en vapeur d'eau.

QFE : pression atmosphérique régnant sur l'aérodrome ou à la station météo.

QNH : pression atmosphérique ramenée par calcul au niveau de la mer dans les conditions de l'atmosphère standard.

Secteur chaud : zone située entre un front chaud et un front froid, généralement humide, brumeuse et accompagnée de bruine près de la dépression, mais pouvant aussi être assez ensoleillée dans sa partie la plus méridionale.

SIGMET : message destiné aux aéronefs en vol subsonique (ou transsonique ou supersonique si précisé) ; signalant les phénomènes météorologiques significatifs observés et/ou prévus (orages, turbulence, givrage, tempête).

SPECI : message d'observation météorologique établi (en France) en cas de changement important du vent (en direction et/ou intensité), de la visibilité horizontale, de la hauteur des nuages bas et des phénomènes significatifs.

Subsidence : affaissement de l'air dans les zones de hautes pressions (mouvements descendants de l'ordre de quelques cm/s).

Stable : état d'une masse d'air ou d'une tranche d'atmosphère dans laquelle les mouvements verticaux (notamment convectifs) ont tendance à s'affaiblir ou s'arrêter.

TAF : Terminal Aerodrome Forecast ; message météorologique de prévision d'aérodrome.

Temps sensible : décrit les conditions météorologiques dominantes sur une zone donnée : pluie, averse, grains, grêle, brouillard, neige, orage, etc., avec parfois une notion de durée, épars, temporaires, occasionnels, se dissipant ou s'atténuant, etc.

TEMSI : carte schématique du temps significatif prévu à heure fixe, où ne sont portés que les phénomènes importants et les masses nuageuses.

Tendance ultérieure : dernière partie de certains bulletins réguliers. Elle permet de décrire schématiquement l'évolution de la situation prévue au-delà des prochaines 24 heures, en insistant sur les phénomènes dangereux.

Thalweg : axe (ou " vallée ") de basses pressions prolongeant une dépression.

Traîne : partie postérieure d'un système nuageux. Une traîne active est une masse d'air instable dans laquelle de nombreux cumulonimbus se forment spontanément et donnent lieu à des averses. Une traîne chargée est une masse d'air froid et humide, dans laquelle les nuages convectifs sont très nombreux et réduisent l'ensoleillement.

Tropopause : limite supérieure de la troposphère. La tropopause bloque radicalement tous les cumulonimbus à son niveau.

UTC : Temps Universel Coordonné. L'heure légale française est en avance d'une heure en hiver et de deux heures en été par rapport l'heure UTC.

Vent moyen : par convention, en météorologie, le vent moyen est un vent moyenné sur 10 minutes et mesuré à une hauteur de 10 mètres. Les bulletins météorologiques français font toujours référence au vent moyen.

Vent en atmosphère libre : vent calculé en fonction du " gradient de pression " existant entre deux zones, ne prenant pas en compte tous les effets locaux provoqués par le relief (déflexions, contournement, brises, etc). Les météorologues le qualifient également de vent " synoptique ", ou " géostrophique ", ou " du gradient " (corrigé des effets de courbure du flux).

CONVERSIONS

Correspondance **pression/altitude** en atmosphère standard pour quelques niveaux usuels:

- 850 hPa se mesure en moyenne à une altitude de 1 500 m (précisément 1 457 m, soit 4 781 ft) ;
- 700 hPa se mesure en moyenne à une altitude de 3 000 m (3 013 m, soit 9 882 ft) ;
- 500 hPa : se mesure en moyenne à une altitude de 5 500 m (5 574 m, soit 18 289 ft).

Correspondance **pression/niveau** de vol en atmosphère standard :

- 850 hPa : FL050
- 700 hPa : FL100
- 500 hPa : FL180
- 300 hPa : FL300.

Noeuds : 1 kt = 1,852 km/h

Pour des vitesses inférieures à 40 km/h, on peut utiliser l'approximation suivante :
1 m/s = 2 kt = 4 km/h.