

M

Chapitre 3 :

METEOROLOGIE ET AEROLOGIE



M

Définitions et couches atmosphériques

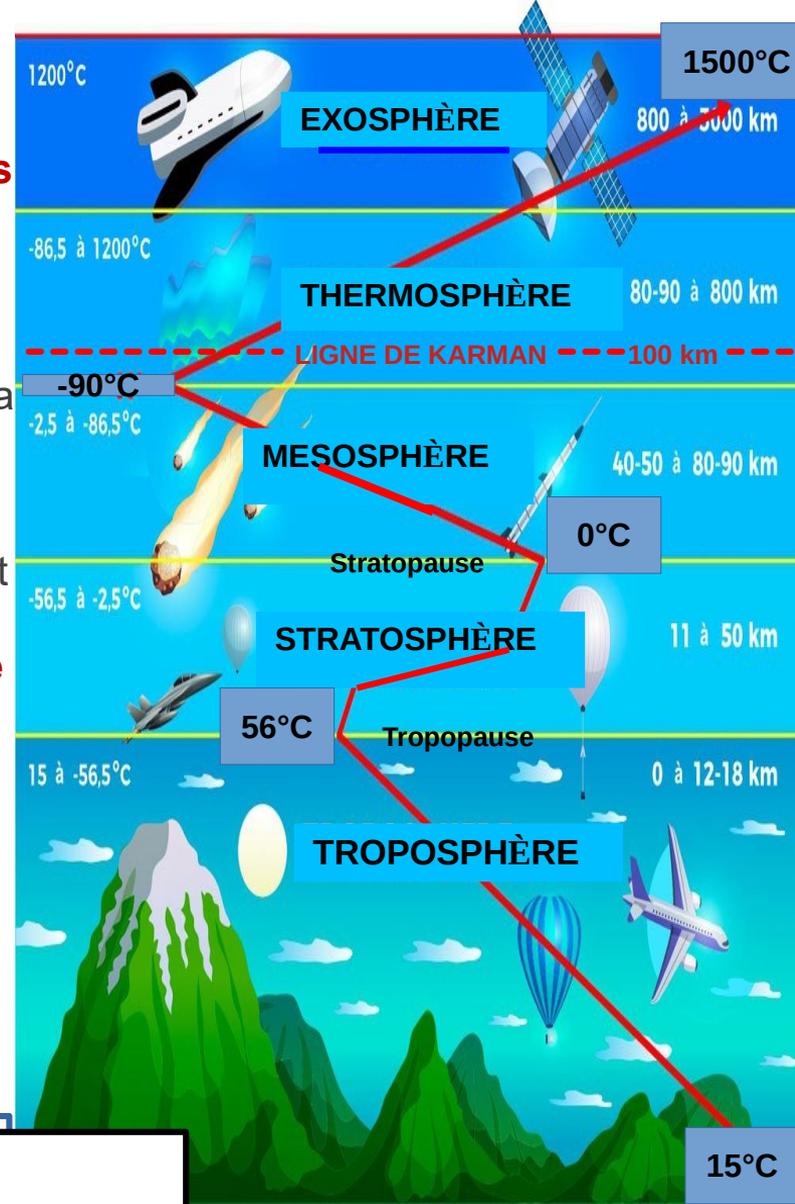


■ Définitions météorologiques

- **Météorologie** : étude des **phénomènes atmosphériques** dans le but de comprendre comment ils se forment et évoluent
- **Aérologie** : étude **expérimentale** des caractéristiques physiques et chimiques de la troposphère et de la stratosphère
→ technique météo avec utilisation des radiosondes, satellites et données venant d'avions de ligne et de fusées
- **Atmosphère** : **enveloppe gazeuse** entourant la Terre

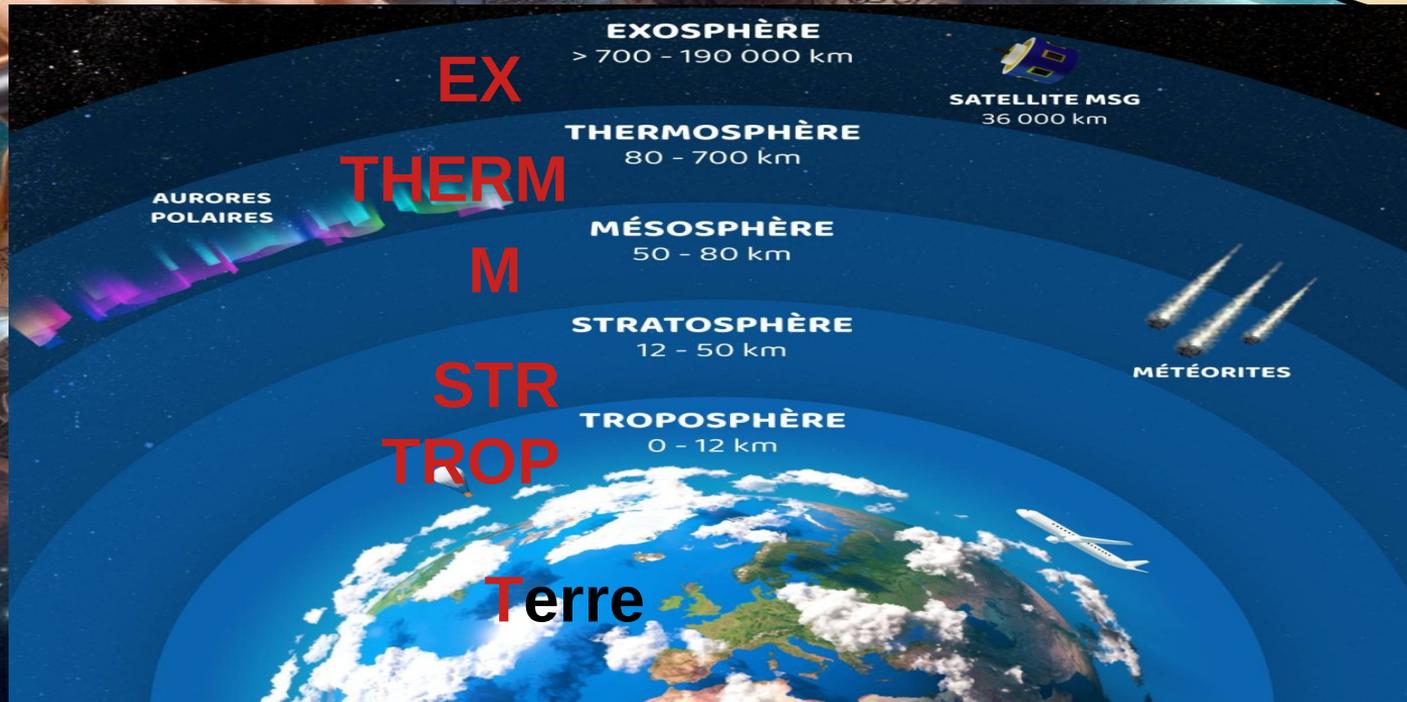
Couches atmosphériques

- Limite Terre-espace, suivant les normes internationales = **ligne de Kármán**, à **100 km** au-dessus de la surface terrestre
- Couches atmosphériques : **troposphère**, tropopause,



La Troposphère est « aplatie » aux pôles et plus large à l'Équat

**T'ES TROP
DANS LA
STREET
MEC !
THERMINE
TES EXOS...**



M

Organisation de la météo

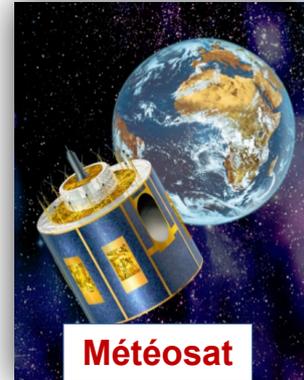


Organisation française

- **Météo France** : siège à la **météopôle** à Toulouse
- **École Nationale de la Météorologie (ENM)** à Toulouse

Organisation mondiale

- L'**Organisation Météorologique Mondiale (OMM)** organise la **Veille Météorologique Mondiale (VMM)** à partir d'un **maillage** (réseau) mondial de stations météo observant partout au même instant de manière coordonnée



Trois Champs d'étude de la météorologie

Passé : Climatologie (« la climato »)

- Étude du temps passé, du climat et de la succession des conditions météorologiques sur de longues périodes
- À partir de **statistiques** détaillées
- Justificatifs de tempête, d'orage ou autres pour les assurances

Présent : Observation (« l'obs »)

- Observation du temps présent
- **VMM** des stations météo : **abris de Stevenson** abritant les instruments météorologiques
- Satellites géostationnaires (**Météosat à 36 000 km...**)
- **Radiosondages** (ballons sondes)

Futur : Prévision (« la prévi »)

- Prévision du temps à venir **Forecast**
- À partir de **modèles mathématiques de prévision**
- Établissement de scénarios d'évolution des conditions météo
- Précision des scénarios selon la taille de la maille et le nombre de paramètres étudiés



M

Composition atmosphérique et paramètres standards



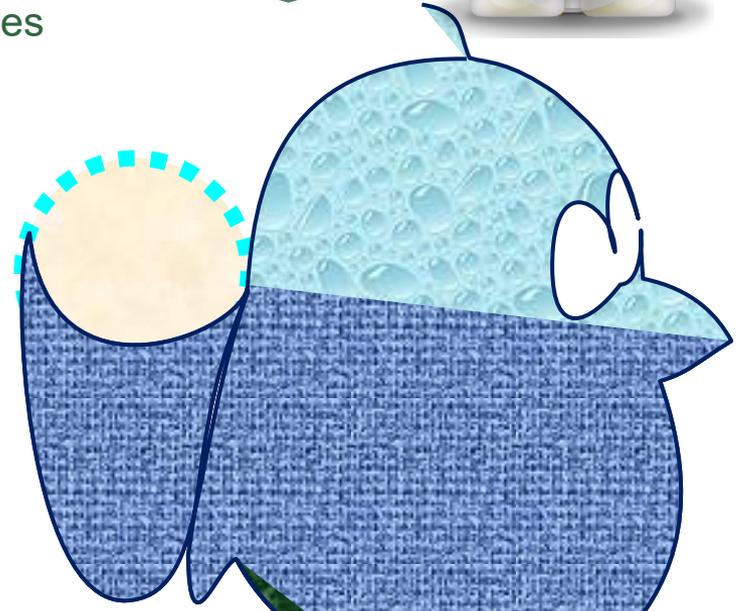
Composition chimique

- oxygène : 21 % (env. 1/5)
- azote : 78 % (env. 4/5)
- argon : 0,9 % (env. 1/100è)
- dioxyde de carbone : traces
- hélium : traces
- hydrogène : traces
- ozone : traces
- impuretés, poussières...
- Eau

Atmosphère standard

- Paramètres physiques : pression température, humidité, vent...
- Paramètres figés en une atmosphère moyenne :
 - Pression = 1013,25 hPa
 - Température = 15°C
- Masse volumique de l'air (masse d'un mètre cube) : ρ (rhô) = 1,2 kg / m³

Pression standard : 1 013,25 hPa



Température standard : 15 °C



M

Définition, mesure et variations de pression

Pression standard :
1 013,25 hPa



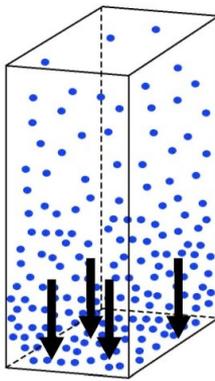
À RETENIR

On perd 1 hPa
Quand
on monte de 28 ft

On perd 2°C
Quand
on monte de 1000 ft

Force de pression

- Pression : **force sur une surface** ($P = F / S$)
- Pression **atmosphérique** : résulte du **poids de la masse d'air** située au-dessus du lieu d'observation



Pression de l'atmosphère

Mesure de pression

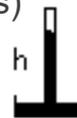
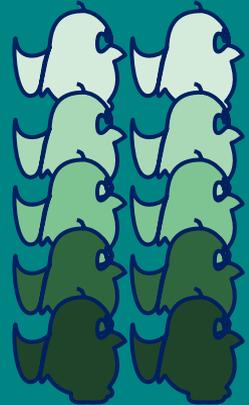
- Par un baromètre ou un barographe**
- Expérimentée par Blaise **Pascal** au XVII^e siècle
- Exprimée en **hPa (hectopascals)**
ou mm de Hg aux USA
1 hPa = 100 Pa (et 1 Pa = 1 N / m², soit 1 g / dm²)
1 bar = 1000 hPa



Variations de pression

- Temporellement** :
diurne : jour/nuit, saisons...
- Géographiquement** : champs de pression...
- Verticalement** : atmosphère standard :
 - ✓ **P = 1013,25 hPa** (au niveau de la mer)
 - ✓ **Diminution de 1 hPa quand on monte de 28 ft** (8,5 m) (dans les basses couches)

*PUY DE DOME
1465 m
Auvergne*

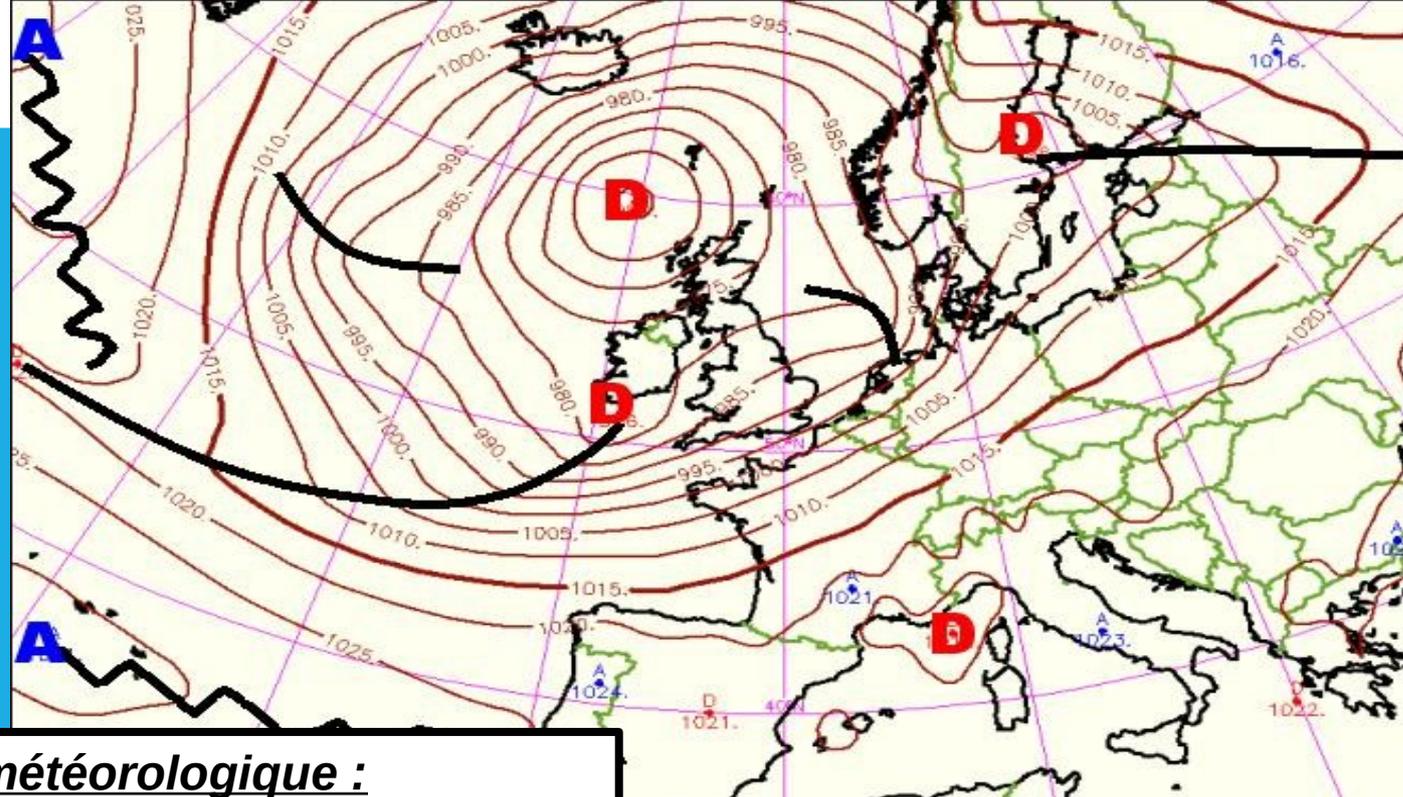


M

Champ de pression

Vocabulaire

- **Isobare = lignes d'égaies pression**
- **Anticyclone = Haute pression**
- **Dorsale : crête de haute pression**
- **Dépression = Basse pression**
- **Thalweg = crête de basse pression**
- **Marais barométrique = peu de variation de la pression**



Sur une carte météorologique :

- On trace les isobares tous les 5 hPa
- On repère les anticyclones par la lettre A (ou H pour High) en bleu
- On repère les Dépressions par la lettre D (ou L pour Low) en rouge
- On trace les dorsales (ligne de haute pression) en traits noirs zigzaguant
- On trace les thalwegs (ligne de basse pression) en traits noirs

En Sibérie, la pression est montée jusqu'à 1 083 hPa.



Aux Philippines, elle est descendue à 887 hPa.



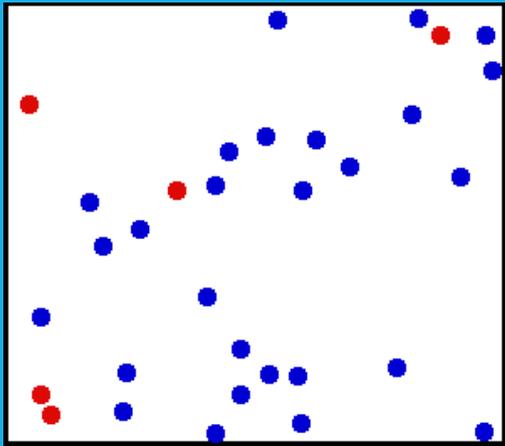
*Sens du vent : des hautes pressions(isobares serrés)
vers les basses (isobares espacés)*



M

Définition, mesure de température

Chaleur = molécules agitées



Perception de la température

- Grandeur physique caractérisant la sensation de **chaud** *warm* ou **froid** *cold*
- Mouvement brownien des molécules d'air (agitation moléculaire)

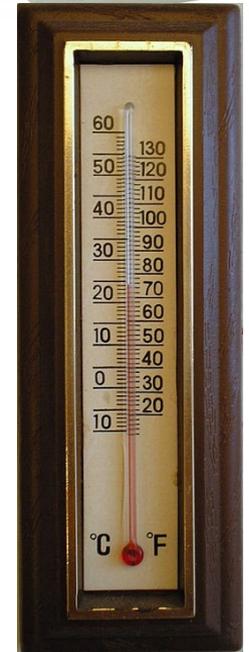
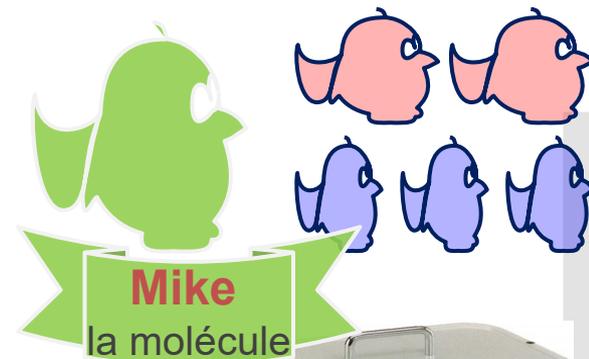
Mesure de température

- Par un **thermomètre** ou un **thermographe** → →
-
- Exprimée en **°C (degrés Celsius)**
- Représenté sur les cartes par des **isothermes**

www.windy.com

Échelles de température

- Référence = échelle Celsius
- **$T(K) = 273,15 + T(^{\circ}C)$**
échelle **Kelvin** = échelle scientifique, car **0 K = zéro absolu** (dans le vide spatial, agitation des molécules nulle)
- Aux États-Unis, échelle **Fahrenheit** :
 $T(^{\circ}F) = 1,4 \times T(^{\circ}C) + 32$

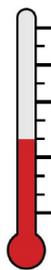


Variations de température



Chaleur = Danger

Déshydratation du pilote et des passagers, performances dégradées... **ANTICIPÉZ !**



Se protéger du soleil :

- port d'une casquette...
- lunettes de soleil adaptées

Aérer le cockpit

Boire abondamment :

- de l'eau !
- prévoir des arrêts...

La chaleur accroît la fatigue : en tenir compte dans votre organisation des vols (horaires, durée, altitude, temps de pause...)

Prendre en compte les performances dégradées du moteur : distance de décollage augmentée, pente de montée plus faible, portance diminuée.

En cas de doute : pas de doute !
Contactez votre instructeur ou reportez votre vol !

COMMISSION PRÉVENTION ET SÉCURITÉ

Gradient vertical de température

Température standard au niveau de la mer = **15 °C**
- **2 °C / 1000 ft**, dans la troposphère, sauf en conditions d'**inversion de température**

Température standard :
15 °C



Records terrestres de température

Des régions équatoriales et tempérées aux régions polaires

Records mondiaux de température à la surface de la Terre :

- ✓ **El Azizia (Libye)** le 13 septembre 1922 : **58°C** (à l'ombre)
- ✓ **Vostok (Antarctique)** le 10 août 2010 : **-93,2°C**

La température au sol est de 15 °C et le gradient de température est standard. La température à l'altitude de 6000 ft sera de :

- a) - 10 °C
- b) 0 °C
- c) 3 °C
- d) - 17 °C

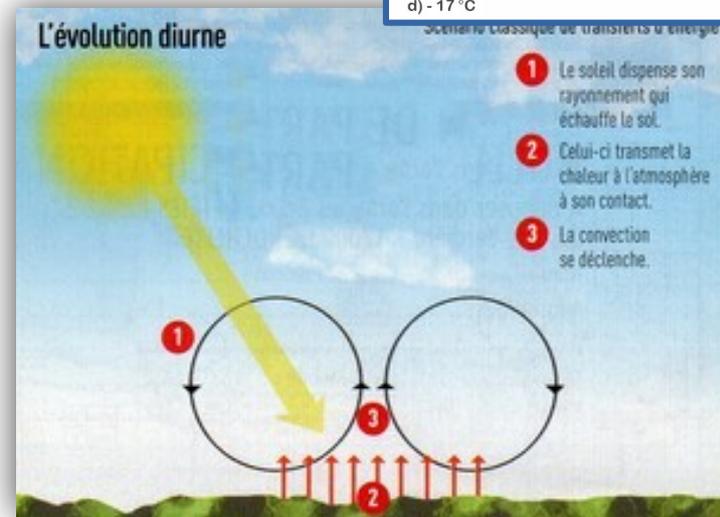
Variations quotidiennes

Minimum : 30 minutes après le lever du soleil

Maximum : 2 heures après le passage au zénith du soleil

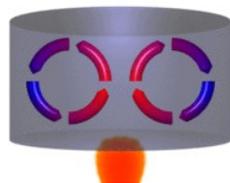
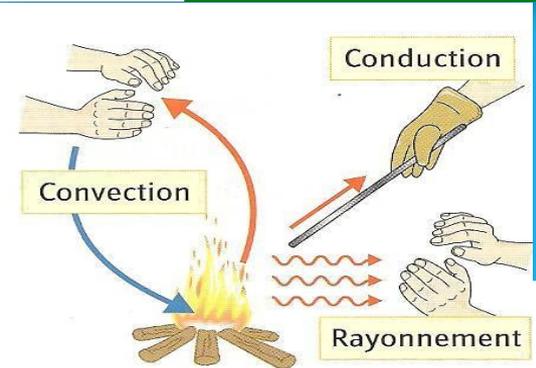
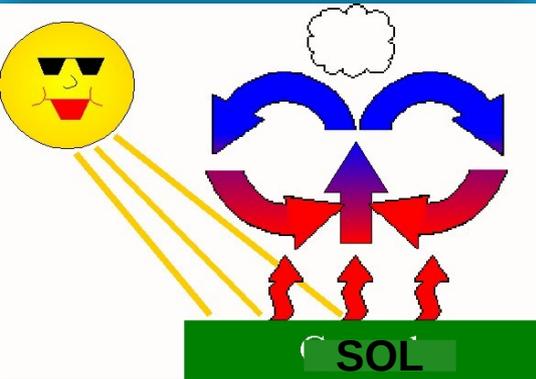
Cycles climatologiques

De 1600 à 1800,
« petit âge glaciaire »



M

Échanges de chaleur et convection



Rayonnement

Convection

Conduction

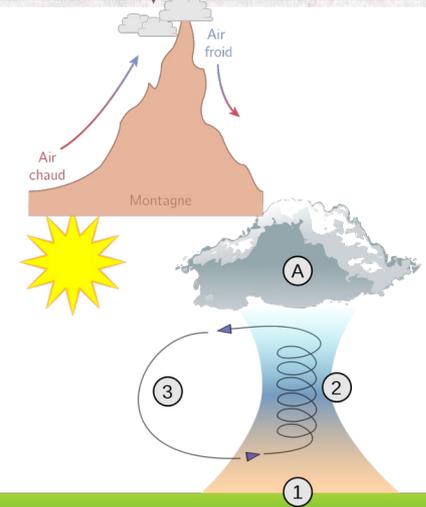
Modes d'échange de chaleur

- **Rayonnement** : propagation de l'énergie sous forme d'ondes (Soleil)
- **Conduction** : par contact avec un autre corps (plaque chauffante)
- **Convection** : par mouvement vertical de l'air (radiateur)
- **Advection** : par mouvement horizontal de l'air

Convection atmosphérique

- Schéma d'une colonne d'air chaud :
 - ✓ (1) l'air s'échauffe près du sol (rayonnement solaire)
 - ✓ (2) l'air s'élève et se refroidit en s'élevant ; formation d'un nuage par condensation (A)
 - ✓ (3) l'air s'étend et redescend
- Mécanisme utilisé par **les vélivoles (planeurs)**:
 - ✓ **pompes** sous les nuages (en forme de moutons)
 - ✓ **thermiques purs** sur flancs ensoleillés des montagnes (vol de pente)
 - ✓ **ascendances** sur les zones fortement contrastées, où les différences de température au sol sont bien marquées (un champs de blé renvoie plus de chaleur contrairement aux forêts...)

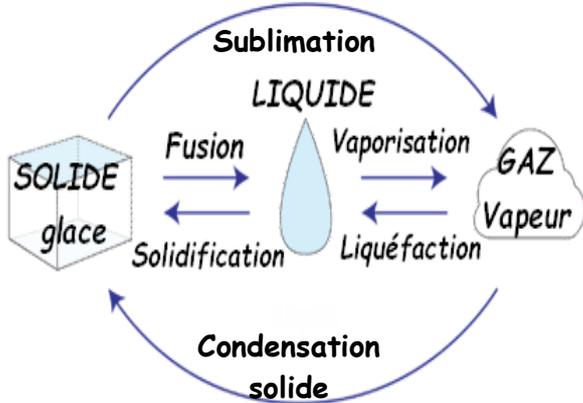
Advection (horizontal)



M

L'eau sur Terre

Endotherme
prend de l'énergie et de la chaleur



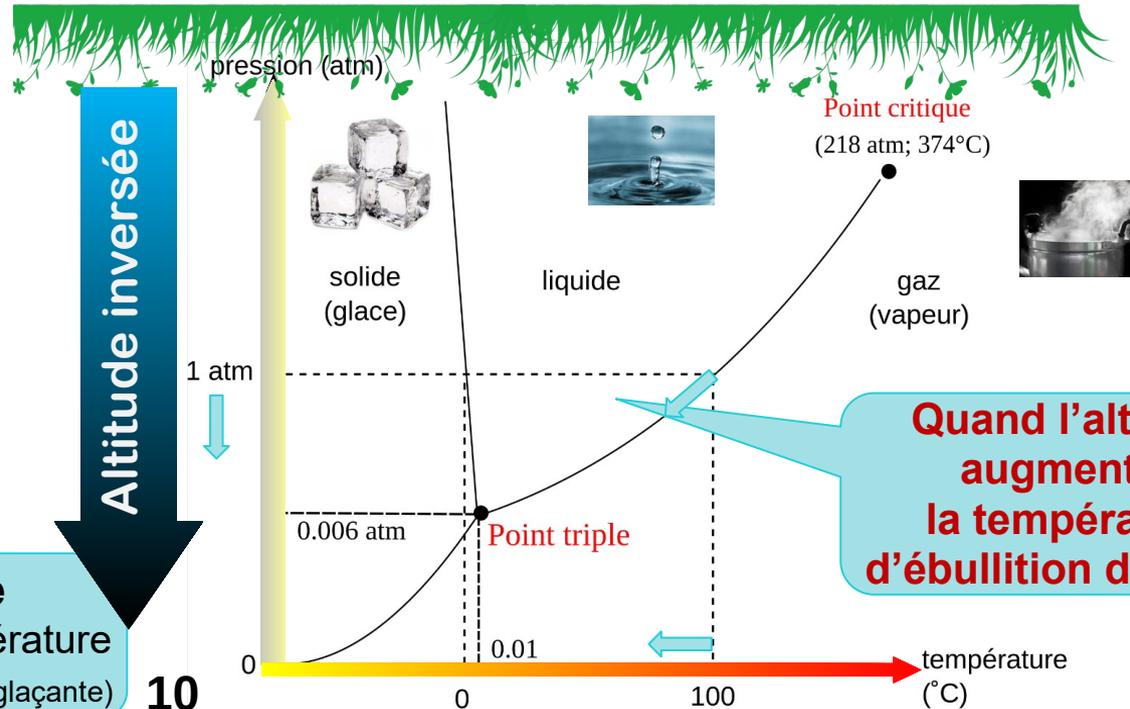
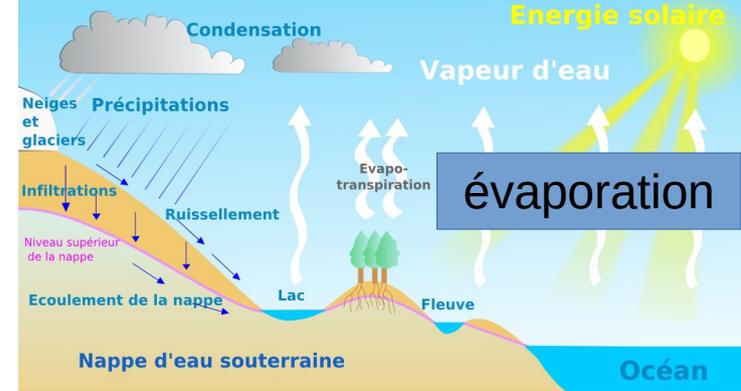
dégage de l'énergie et de la chaleur
Exotherme

Surfusion = danger aéronautique

Gouttelettes d'eau à l'état liquide par température négative, gelant au moindre contact (pluie verglaçante)

10

- ❑ **Cycle de l'eau sur Terre**
 - Cycle de l'eau terrestre → → →
 - $1,4 \times 10^{21}$ litres sur Terre !
- ❑ **Changement de phase**
 - Solide, liquide, gaz (plasma)
- ❑ **Diagramme des phases**

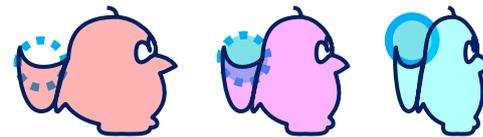


Définition et mesure de l'humidité



Définitions de l'humidité

- **Hygrométrie** : taux d'humidité dans l'air
→ de 0% (très sec) à 100% (très humide)
- **Point de rosée** *dew point* : température la plus basse à laquelle une masse peut être soumise, à pression et humidité données, sans qu'il ne se produise une formation d'eau liquide **saturation**
- À partir de cette température, si on **refroidit** un volume d'air on obtient une **condensation**



Instruments de mesure

- **La grenouille** recherche l'humidité...
- **Hygromètre** : mesure de l'hygrométrie (taux d'humidité de l'air en %) peut être constitué d'un **cheveu** (s'étire ou se rétrécit)
- Hygromètre enregistreur = **hygrographe**
- **Psychromètre** : instrument de mesure composé de deux thermomètres, l'un **sec** et l'autre **humide**.
L'écart entre les 2 températures diminue, quand l'humidité augmente.



Saturation de l'air

Diagramme psychrométrique

- Appelé **diagramme de Mollier** parfois (*par abus*)
- On y détermine le **point de rosée Dew point** en fonction de l'humidité de l'air et de sa température

Exemples :

Pour arriver à saturation (condensation) il y a deux possibilités

1 Refroidir la molécule

- Pour une molécule d'air contenant 10g d'eau, le taux d'humidité est de

- 50 % pour 30°C
- 20 % pour 50°C
- 100 % pour 10°C (point de rosée)**

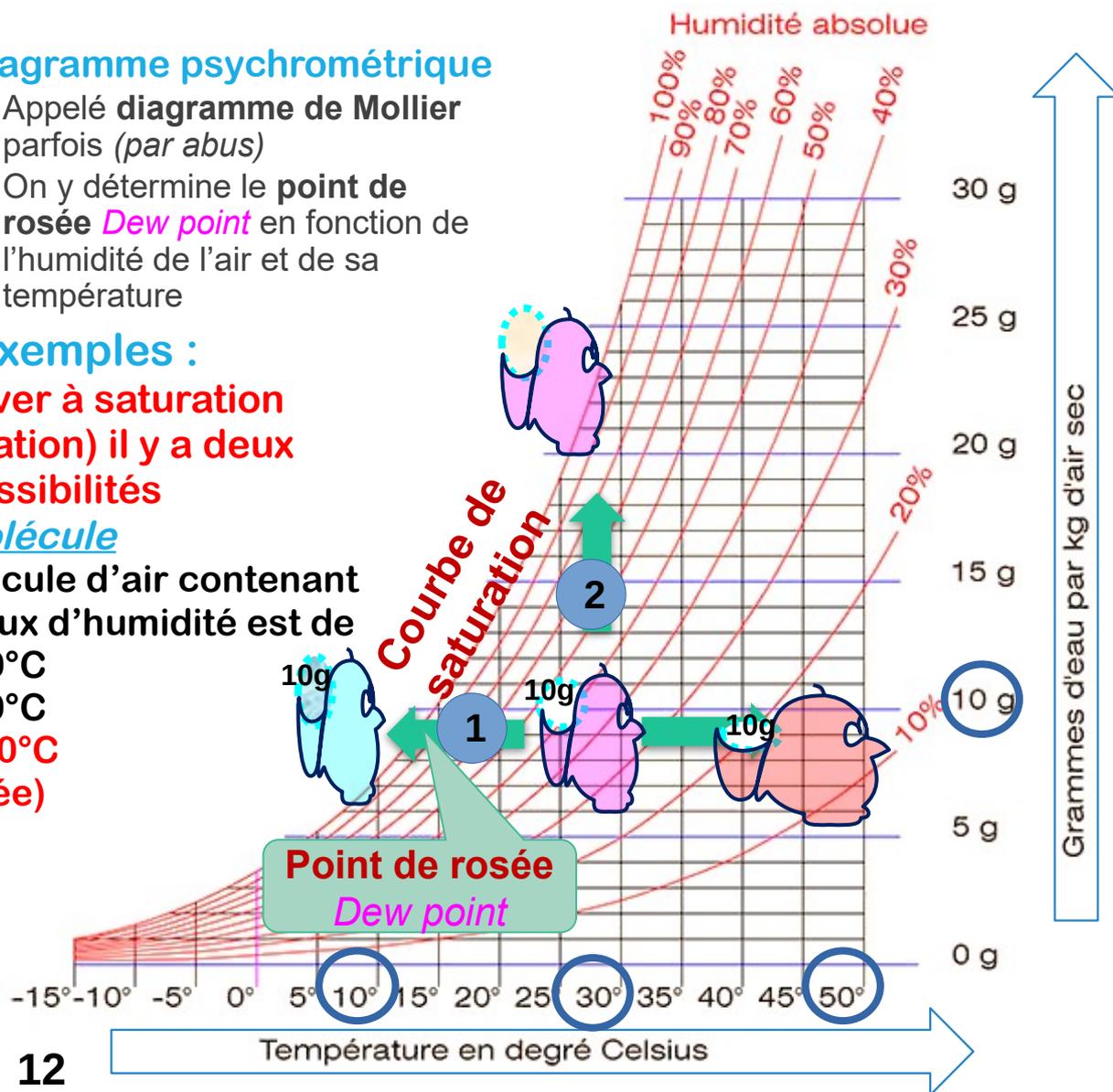
2 Rajouter de l'eau

- Pour 30°C le taux d'humidité est de

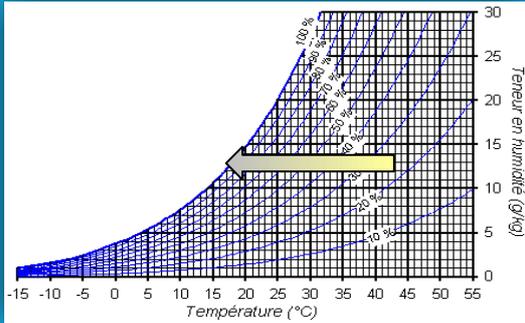
- 50 % pour 10g d'eau
- 100 % pour 25 g d'eau

Pour amener une masse d'air à saturation en humidité, il faut :

- augmenter sa température
- diminuer sa température
- augmenter la pression
- augmenter la température et augmenter sa pression



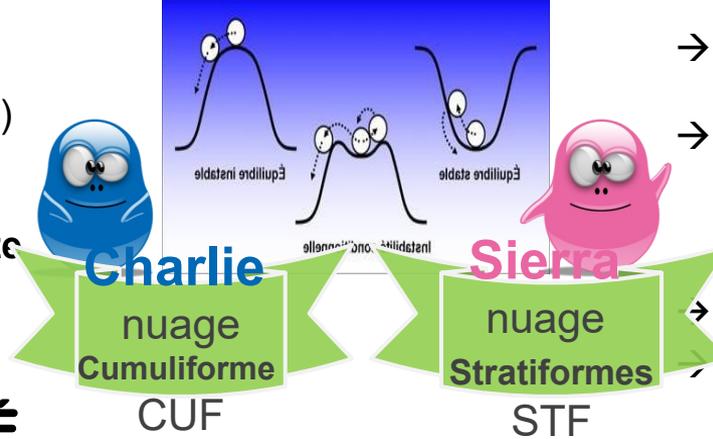
Formation des nuages



- **Définition du nuage *cloud***
 - Masse visible constituée de beaucoup de gouttelettes d'eau (cristaux de glace, aérosols chimiques, minéraux...) en suspension dans l'atmosphère
 - **L'eau s'y trouve à l'état liquide ou solide (et non gazeux !)**
- **Instabilité et stabilité**
 - Gradient (écart) vertical de l'atmosphère + ou - fort → 2 types d'équilibres de l'atmosphère

→ **Gradient fort**
(par ex. 1°C /100m)
→ en montant, la particule d'air se refroidit moins vite que l'air ambiant
→ La particule monte encore

INSTABILITÉ



→ **Gradient faible**
(par ex. 1°C /200m)
→ en montant, la particule d'air se refroidit plus vite que l'air ambiant
→ La particule redescend

STABILITÉ

Processus de formation du nuage

- **Refroidissement** d'une masse d'air **humide**, jusqu'à condensation vapeur d'eau. Deux processus de formation des nuages, selon la stabilité de l'atmosphère

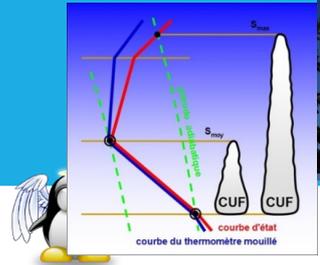
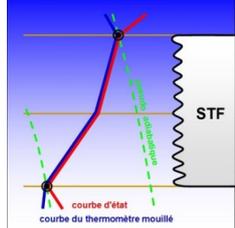
Par **convection**
(suite à l'instabilité de l'air)
→ Formation de nuages **CUMULIFORMES**

Par soulèvement **progressif**



de la masse d'air, détente et donc refroidissement

→ Formation de nuages **STRATIFORMES**



M

Classification des nuages : 4 familles



☐ Nuages mésosphériques

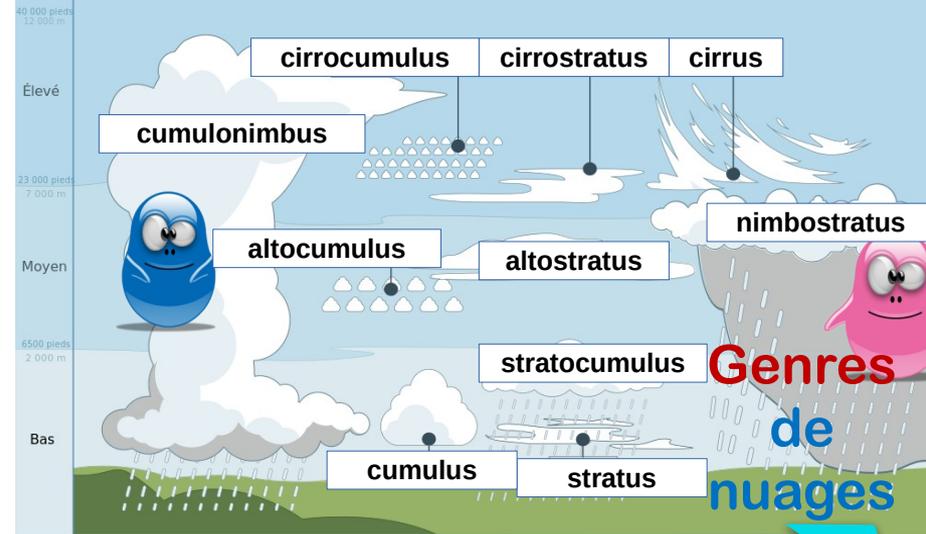
- **Nuages noctulescents** nuages apparus récemment formés par les éruptions volcaniques et la vapeur d'eau des lanceurs spatiaux (entre 80 et 85 km d'altitude)

Nuages stratosphériques

- **Nuages nacrés** visibles pendant les hivers polaires (entre 15 et 25 km d'altitude)

Nuages troposphériques

- **4 familles** de nuages (selon leur « étage ») dans lesquelles, l'Atlas international des nuages distingue **10 genres**, avec plusieurs **espèces** et **variétés** dans chaque genre



Familles de nuages

Famille [A] des nuages élevés

Nuages élevés (> 5 km)

Classés en utilisant le préfixe **CIRRO-**.
Composés de cristaux de glace

Famille [B] des nuages moyens

Nuages intermédiaires.

Classés en utilisant le préfixe **ALTO-**.
Composés de gouttelettes d'eau

Famille [C] des nuages bas

Nuages bas (< 2 km), hors brouillard

Familles [D1] et [D2] de nuages au moyen ou fort développement vertical

préfixe **NIMBO-** ou suffixe **-NIMBUS**

M

Nuages strati-formes « STF »



Sierra
nuage STF

Ci

Annonce « le mauvais temps »

As

St

□ Étage supérieur (> à 5 km)

- Nuages formés de **cristaux de glace**
- **Cirrus** « **Ci** » : filaments blancs (cheveux d'ange)
- **Cirrostratus** « **Cs** » : voile continu translucide couvrant partiellement le ciel, souvent accompagné d'un petit halo

□ Étage moyen (de 2 à 5 km)

- **Altostratus** « **As** » : vaste couche grise légèrement striée, qui laisse diffuser la lumière solaire sans ombre apparente au sol, comme au travers d'un verre dépoli
- Gouttelettes d'eau (et parfois cristaux de glace)
- Parfois des **virga** (= qui ne touchent pas le sol)

□ Étage inférieur (< à 2 km)

- **Stratus** « **St** » : appelé brouillard s'il touche le sol
- **Gouttelettes d'eau**
- Aspect assez uniforme mais parfois constitué d'éléments séparés ayant un aspect déchiqueté

□ Étage étendu (jusqu'à 10 km)

- **Nimbostratus** « **Ns** » : plusieurs couches stratifiées sans forme définie et de couleur gris foncé
- Gouttelettes en suspension (parfois surfondues)

Cs

Virga
As

Ns

Les stratus sont des nuages :

- dangereux à cause des turbulences et précipitations qui lui sont associées
- dangereux par la faible hauteur de leur base
- permettant le vol à voile grâce aux ascendances qui leur donne naissance
- de grande étendue verticale

M

Nuages Cumuli-formes « CUF »



Charlie
nuage CUF



□ Étage supérieur (> à 5 km)

- Formés de **cristaux de glace** (et parfois eau surfondue)
- **Trainées de condensation *contrails*** : condensation de la vapeur d'eau émise par les moteurs d'avion à très haute altitude (généralement à 10 km) avec fort taux d'humidité
- **Cirrocumulus « Cc »** : rarement observé en forme de fleur de coton apparaissant très petit à l'œil



□ Étage moyen (de 2 à 6 km)

- Gouttelettes d'eau et parfois cristaux de glace
- **Alto cumulus Ac** : couches/nappes nuages blancs/gris
- **Alto cumulus lenticularis** : sortes d'assiettes empilées prisés des vélivoles (présence de courants ascendants)



□ Étage inférieur (< à 2 km)

- **Strato cumulus « Sc »** : larges masses sombres et arrondies, habituellement en groupe, lignes ou vagues
- **Cumulus** : chou-fleur « bourgeonnant » plusieurs variétés : fractus, humilis, mediocris, congestus



□ Étage étendu (jusqu'à 10 km)

- **Tower Cumulus « TCU »**
chou-fleur avec tours de nuages sans enclume
étape intermédiaire entre cumulus et cumulonimbus
- **Cumulonimbus « Cb »** : gros chou-fleur à tête d'enclume
 - ✓ Grande extension verticale (de 300 m à 18 km)
 - ✓ Constitution : gouttelettes d'eau dans la partie inférieure (parfois surfondue) et cristaux de glace dans la partie sup.
 - ✓ souvent associé à des phénomènes violents comme la foudre, les tornades, les turbulences sévères et les rafales descendantes...



Lequel de ces nuages est à fort développement vertical ?

- a) le stratus
- b) l'altocumulus
- c) le cirrocumulus
- d) le cumulonimbus

Météores et précipitations

Les nuages d'orage sont :

- les stratus
- les cirrus
- les cumulonimbus
- les cumulus

△ Grêle

▽ Averse



☐ Météores = phénomènes atmosphériques

- **Hydrométéores** : pluie, neige, grêle, brouillard...
Précipitation = hydrométéore solide ou liquide tombant dans l'air
- **Électrométéores** : éclair, tonnerre, foudre des orages...
- **Lithométéores** : poussière, sel, sable, volcans, météorites...
- **Photométéores** : arc-en-ciel, mirage...

☐ Mesure des précipitations

- **Pluviomètre** : mesure en **mm**, relevé chaque jour

☐ Classification des précipitations

▪ Précipitations

✓ Symbole, nom, code

provoquées par : (~~Gi, Ce, Cs, Gu~~)



✓ **Bruine drizzle DZ** (= pluie très fine) : **St**



✓ **Pluie rain RA** :

Ns, Cb, TCU, Ac, As, Sc, St



✓ **Neige snow SN** :

Ns, Ac, As, Cb, Tcu, Sc, St (SN en grains)

✓ Granules de glace :

As, Ns



✓ **Grêle hail GR** ou **Grésil** (= grêlons < 5mm) **GS** :

Cb, TCU



✓ **Averses showers SH** :

Cb, TCU, Ac

- **Obscurcissement** : brouillard **fog FG**, brume **mist BR**, brume sèche **haze HZ**
- **Autre (dépôts)** : rosée **dew**, givre **rime**, verglas **ice, black ice, glaze**



M

Pluie (bruine), neige, grêle (grésil)



Pluie

- **Gouttelettes d'eau** entre 0,2 et 1 cm de diamètre (**bruine** de 2 à 5 mm)
- Nuages : **Cb, TCU, Ns** parfois *Ac, As, Sc, St*
- Formation :



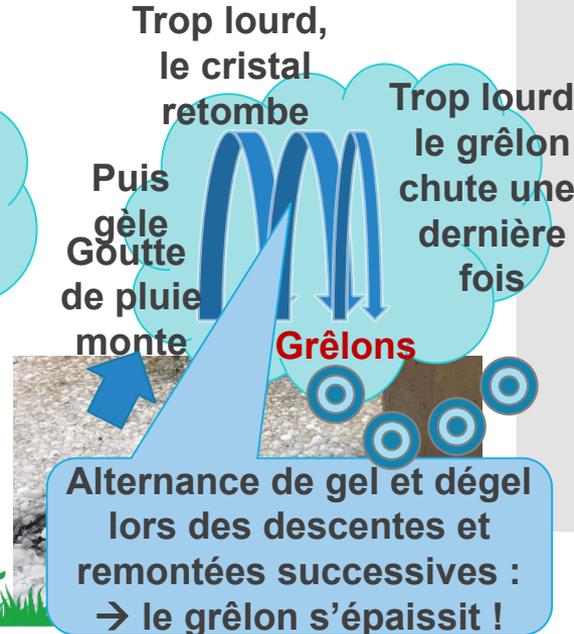
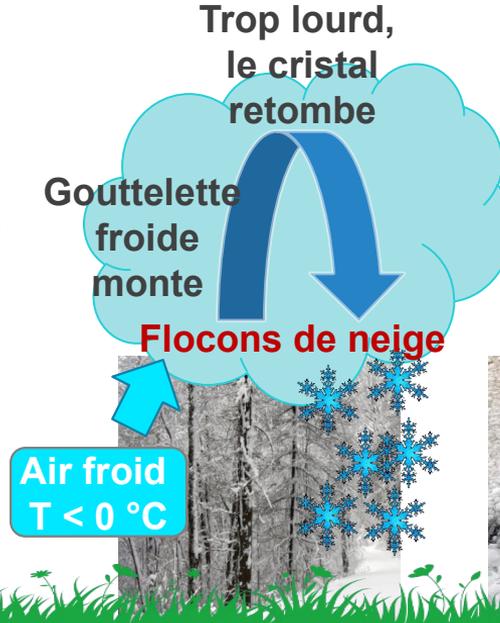
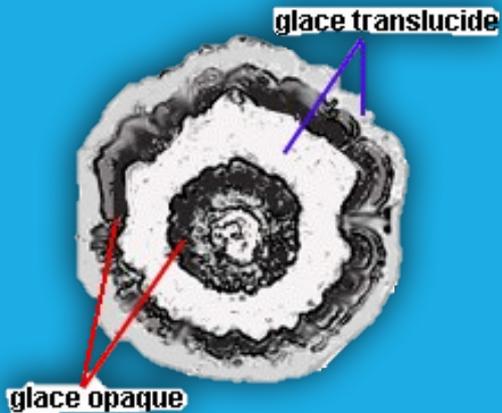
Neige

- **Flocons de neige** = agglomérations de cristaux de glace
- Nuages : **Ns** (temps calme) parfois *Ac, As, Sc, St*
- Formation :



Grêle

- **Grêlon** = granule de glace de 5 mm ou +, composé de plusieurs couches de glace (**grésil** < 5 mm)
- Nuages : **Cb, TCU** (atmosphère instable)
- Formation :



M

Définition et mesure du vent

Calcul mental pour passer des Nœuds aux km/h :

X 2 - 10 %

Le manche à vent permet de connaître le sens du vent et sa vitesse approximative



19



5 noeuds
9 km/h



10 noeuds
18 km/h



15 noeuds
27 km/h



20 noeuds
36 km/h



25 noeuds
45 km/h

❑ Définition et origine

- **Vent** *wind* = mouvement **horizontal** de l'air
- L'air se déplace d'une zone de haute pression vers une zone de basse pression

❑ Instruments de mesure

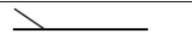
- De la direction du vent : la **girouette** (on mesure d'où **vient** le vent)
- De la vitesse du vent : l'**anémomètre** (en nœuds kt, km/h ou m/s)
- La **manche à vent** *windsock* permet au pilote de visualiser direction et force du vent (voir briefing de navigation)

Vent représenté par un drapeau

Fanions intensité du vent



Extrémité du mât : direction

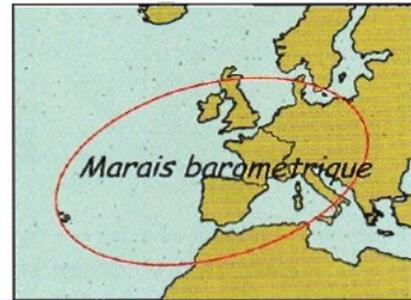
	5 kt		15 kt
	10 kt		50 kt



M

Gradient de pression et vent

Une zone où la *pression atmosphérique varie peu* au sein d'une surface géographique importante se nomme : *marais barométrique*.



- ❑ **Origine du vent**
 - Variations de pression
→ vent plus ou moins fort
 - **Grand gradient = grande variation**
- ❑ **Gradient de pression temporel**
 - Variation **temporelle** de la pression
 - + rapidement varie la pression,
→ + fort est le gradient de pression
→ + fort est le vent
- ❑ **Gradient de pression spatial**
 - Variation **spatiale** de la pression (géographique)
 - Plus la pression varie sur une courte distance
→ plus les **isobares sont resserrées**
→ plus le **vent est fort**
 - Dans un **marais barométrique**, il y a peu de vent

Un vent fort apparaît lorsque :

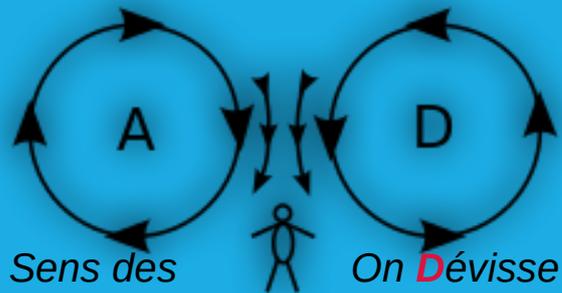
- les isobares sont éloignées
- les isobares sont resserrées
- les isothermes sont éloignés
- les isothermes sont resserrés et les isobares éloignées



M

Force de Coriolis et loi de Buys-Ballot

Hémisphère Nord



Sens des Aiguilles d'une montre

On **D**évisse

Pour l'hémisphère Sud c'est l'inverse



Effet du gradient de pression

- Le vent souffle de l'anticyclone (zone de surpression), vers la dépression :
- Anticyclone** → vent → **Dépression**

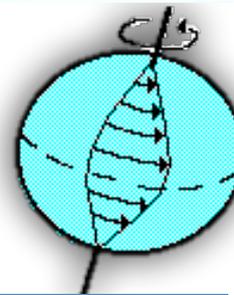
Effet de la rotation terrestre

- Rotation plus rapide à l'équateur qu'aux pôles
- La **force de Coriolis** dévie le vent sur le côté

Loi de Buys-Ballot

- Effet de cette force dans l'hémisphère Nord : **le vent est dévié à droite (vers l'Équateur)**
- Hémisphère nord : **rotation horaire autour d'un anticyclone**, rotation contra-horaire autour d'une dépression

anticyclone dépression
A D

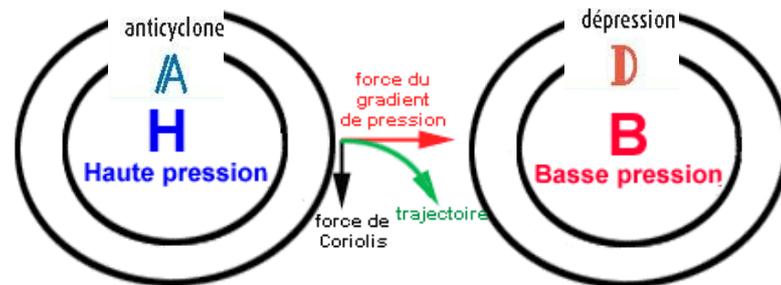


En France un aéronef se dirige vers une dépression.

Le pilote peut s'attendre à :

- une dérive gauche
- une dérive droite
- une dérive nulle
- une dérive tantôt gauche tantôt droite

L'influence de la force de Coriolis



Courant-jet



❑ Définition du courant-jet

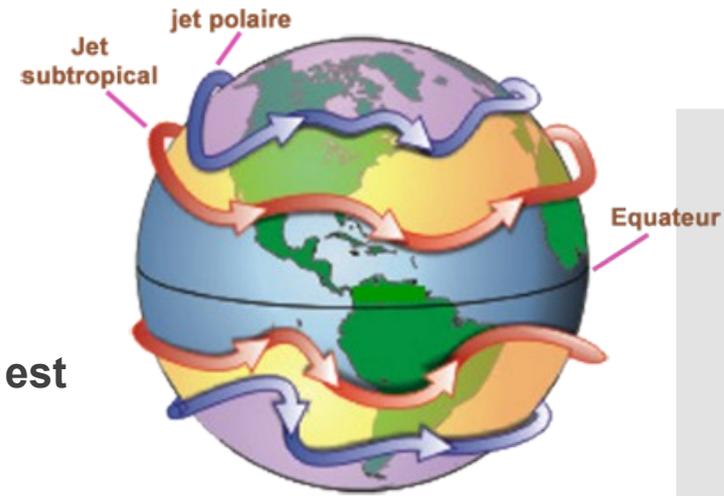
- **Courant-jet** = *jet-stream*
- Courant d'air à grande vitesse et haute altitude

❑ Description du courant-jet

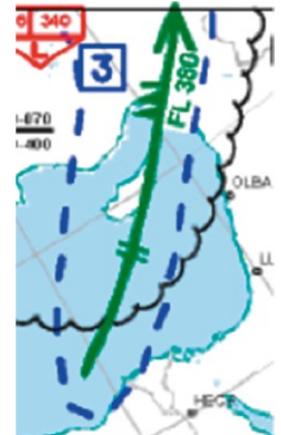
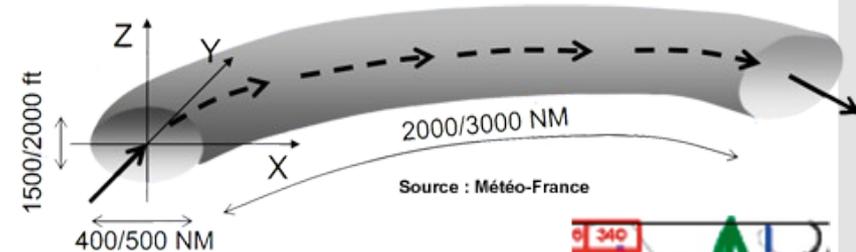
- Sens : généralement **d'ouest en est**
- Altitude : entre 6 et 15 km
- Force : croissance de la vitesse très rapide en se rapprochant du centre du courant : de 50 kt **jusqu'à 200 kt** (voir plus)

❑ Utilisation du courant-jet

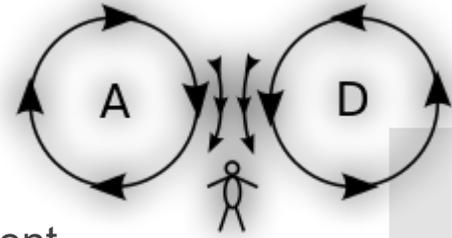
- Les pilotes de long-courriers tentent de l'utiliser ou de l'éviter selon la direction de leur vol
- En 2019, près d'une heure de temps de vol en moins sur un Los-Angeles → Londres en 2019



Source : Wikicommons/Auteur Lyndon State College Météorologie



Vents régionaux



□ Origine des vents régionaux

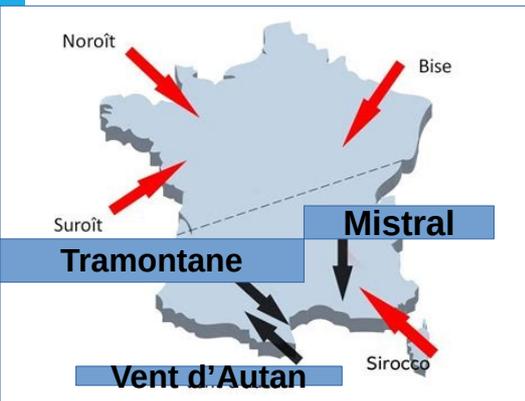
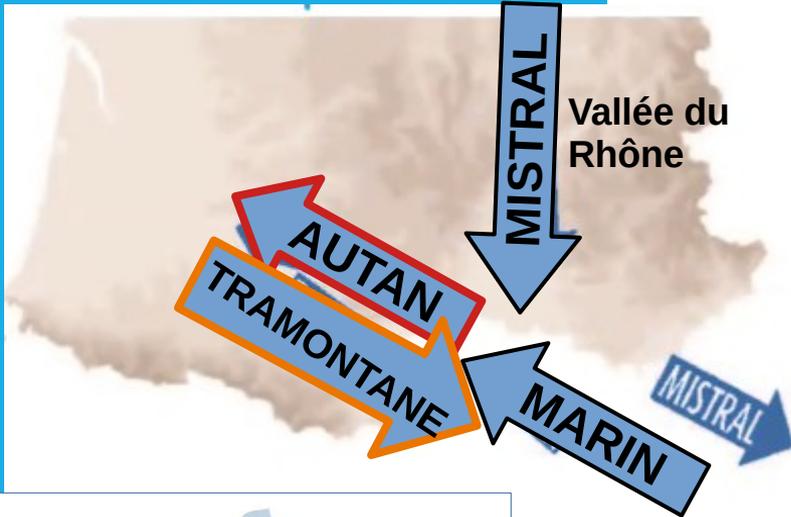
- Direction et vitesse du vent majoritairement imposée par les anticyclones et les dépressions et par le relief
- Vents fréquemment semblables → vents régionaux

Vents régionaux principaux en France métropolitaine

- **Mistral** : vent du nord en vallée du Rhône et Provence
- **Tramontane** : vent du Nord Ouest en Languedoc
- **Vent d'Autan** : vent du Sud Est en Languedoc

Nombreux autres vents régionaux

- le marin, la lombarde, le grec, le levant, le libeccio, le sirocco
- Autres vents spécifiques selon :
 - ✓ le milieu (côtes, montagnes...) : **brises**
 - ✓ la région (France ultramarine) : **alizés d'est** en zone intertropicale (ZIT)...



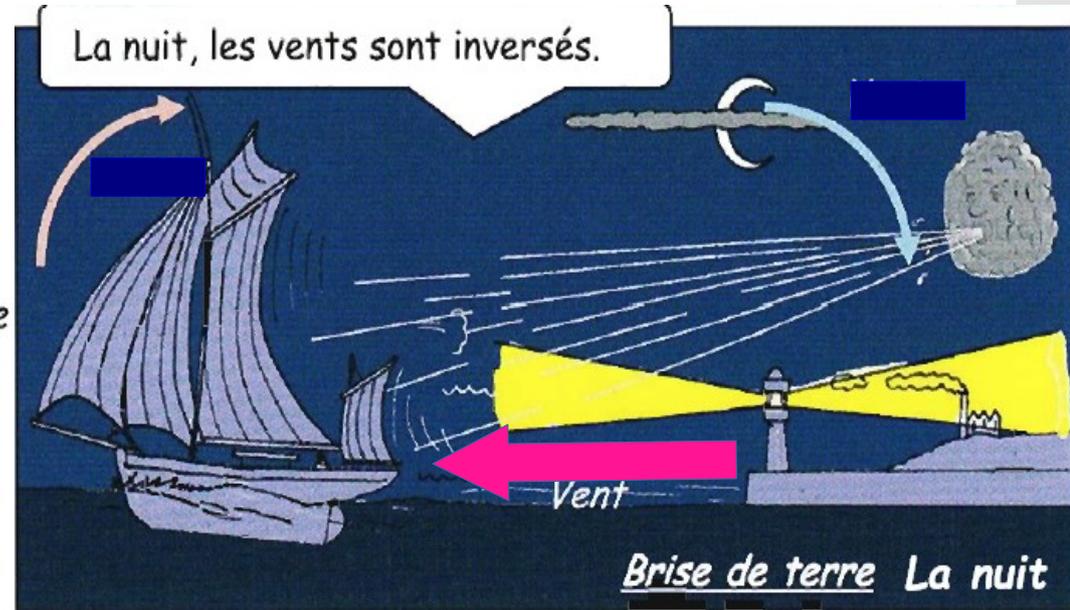
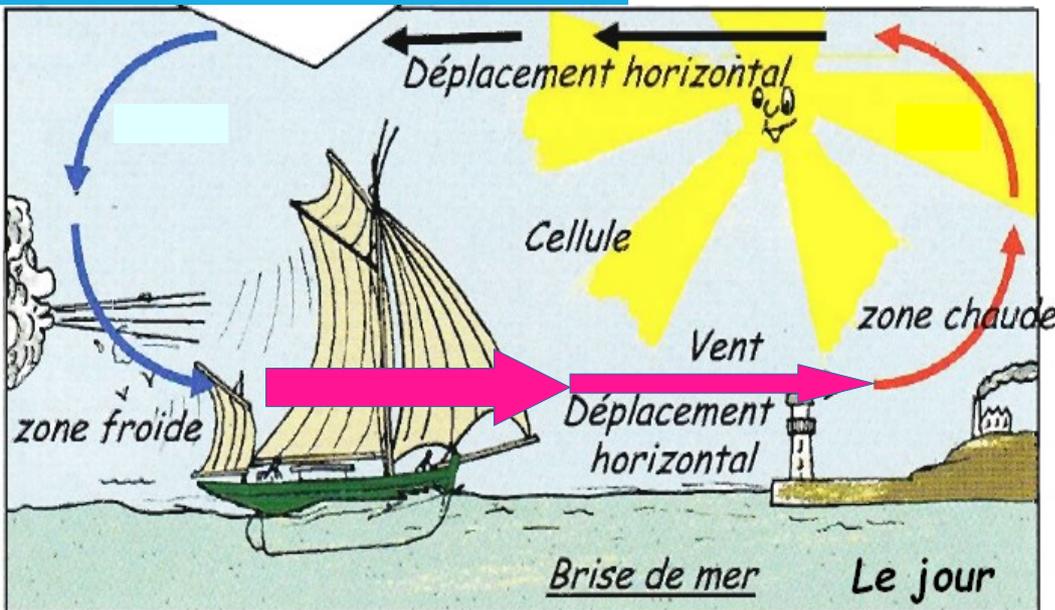
Brise côtière

□ Brise de mer *sea breeze*

- Le **jour** :
 - échauffement du sol ensoleillé
 - $T^{\circ} \text{ sol} > T^{\circ} \text{ eau de mer}$ (stable)
 - Courant ascendant au-dessus du **sol** (parfois ligne de cumulus)
- **En début d'après-midi**, apparition de la brise de **mer**
- **De la mer vers la terre** (embruns) (« du froid vers le chaud »)

□ Brise de terre *land breeze*

- La **nuit** :
 - refroidissement rapide du sol
 - $T^{\circ} \text{ sol} < T^{\circ} \text{ eau de mer}$ (stable)
 - Courant ascendant au-dessus de la surface aquatique
- **En début de nuit** (après le coucher du Soleil) apparition de la brise de **terre**
- **De la terre vers la mer**



Brise de montagne



Ces brises (parfois turbulentes) se renforcent là où la vallée se resserre (*effet Venturi*)



□ Brise de vallée *valley wind*

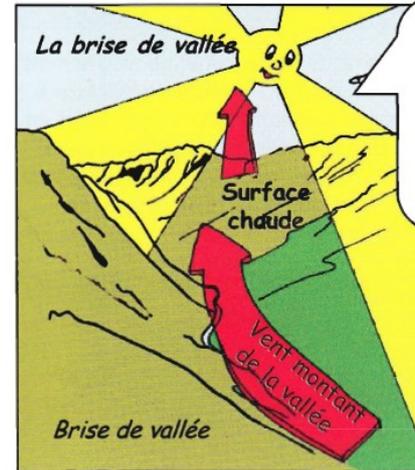
- Le **jour** :
 - échauffement versant ensoleillé
 - $T^{\circ} \text{.adret (ensoleillé)} > T^{\circ} \text{.ubac (ombragé)}$ et fond de vallée
 - Courants ascendants le long des pentes ensoleillées

En début d'après-midi, apparition de la brise **montante** (vent anabatique) : jusqu'à 20 kt

Utilisée par les parapentistes

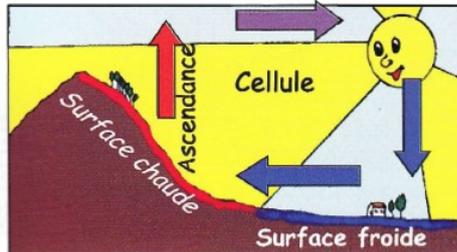
□ Brise de pente *mountain breeze*

- La **nuit** :
 - refroidissement rapide des pentes
 - $T^{\circ} \text{ sommet} < T^{\circ} \text{ fond de vallée}$
 - Courants descendants des sommets vers les vallées
- En début de nuit**, apparition de la brise **descendante** de pente puis de vallée (vent catabatique)



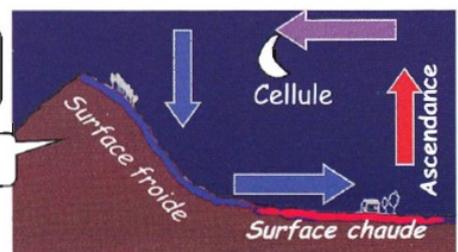
En montagne, le processus est le même qu'en mer. Le jour, les sommets montagneux se réchauffent plus vite que les plaines car l'ensoleillement y est plus fort, le vent monte. C'est la brise de vallée.

Par contre, la nuit, les sommets se refroidissent plus vite. Le vent descend alors des sommets vers les plaines. C'est la brise de pente.



Comme toujours, l'air chaud monte...

...l'air froid descend.

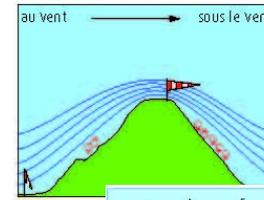
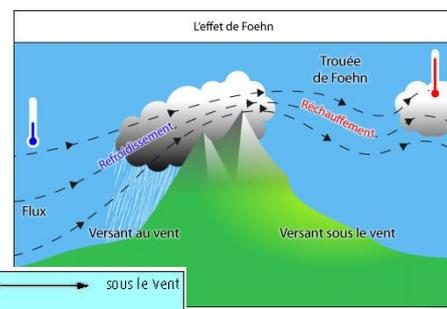


Effet de Foehn



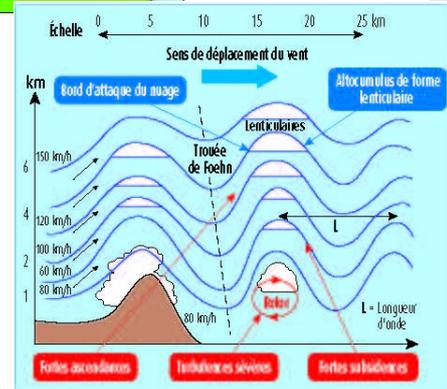
❑ Mécanisme de l'effet de Foehn

- **Vent** +ou- perpendiculaire à chaîne montagneuse
- La masse d'air s'élève, se détend et s'assèche ///
- Sous le vent, l'air redescend, se réchauffe ; trouée dans la couche nuageuse : air sec
- Accélération du vent sur la ligne de crête



❑ Nuages de rotor et lenticulaires

- Couche basse de l'atmosphère instable et **turbulente** (→ nuages cumuliformes)
- Formation de nuages de rotor et lenticulaires
- **Nuages de rotor** turbulents
- **Nuages lenticulaires** (Ac) semblent immobiles, mais se forment à leur partie « au vent » et se désagrègent à leur partie « sous le vent »



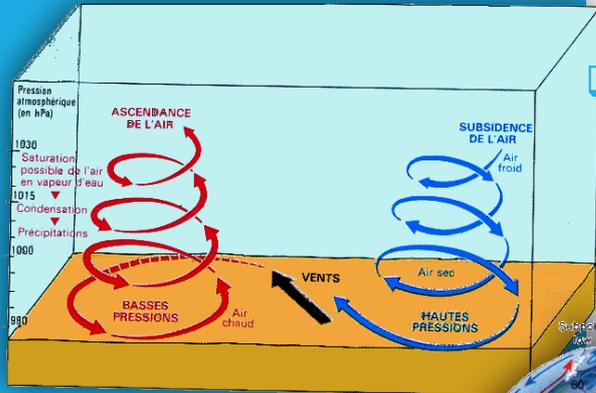
❑ Rue de nuages et ondes orographiques

- Rues de nuages, composées de Cu et Sc...
- **Ondes parfois orographiques** (lié à la montagne)
- Utilisation par les vélivoles : ondes de rues de nuages = bonnes **ascendances**



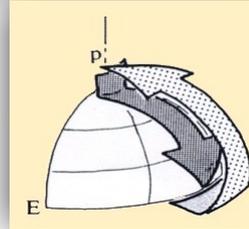
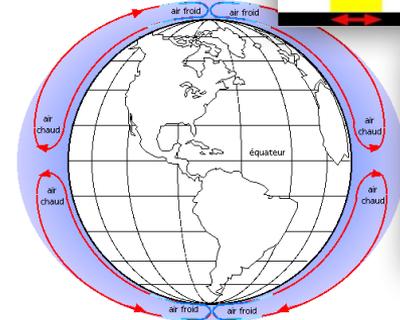
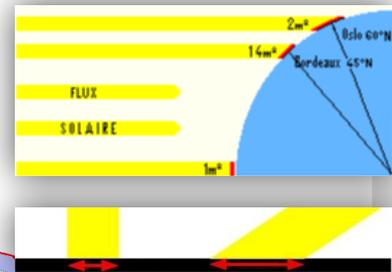
M

Circulation générale de l'air



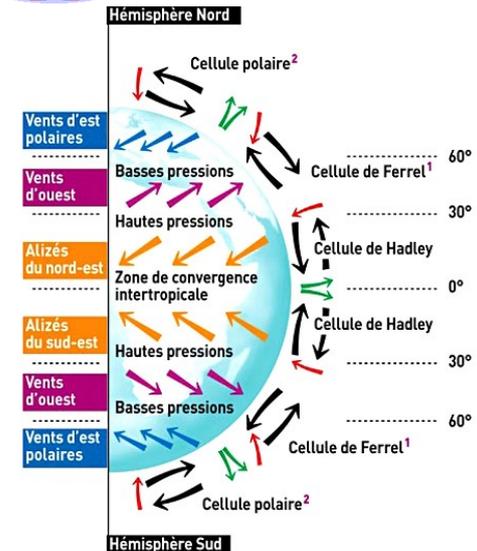
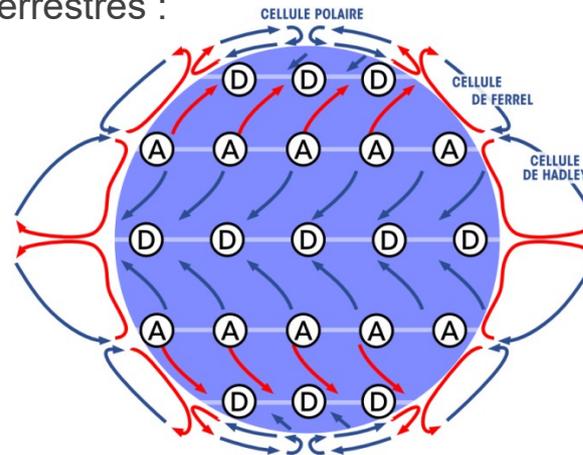
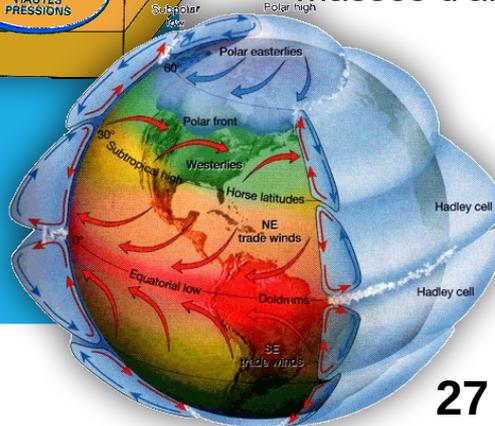
Effet du réchauffement terrestre

- Flux solaire réparti inégalement sur la surface terrestre : + fort en région tropicale que polaire
- Équateur plus chaud → **ascendance** d'air et **subsidence** (« descentance ») au niveau des pôles
- Cellules convectives au niveau du globe



Effet de la rotation terrestre

- Division en 3 cellules convectives : **cellules de Hadley** dans l'hémisphère Nord
- D'où, schéma général de circulation des masses d'air terrestres :



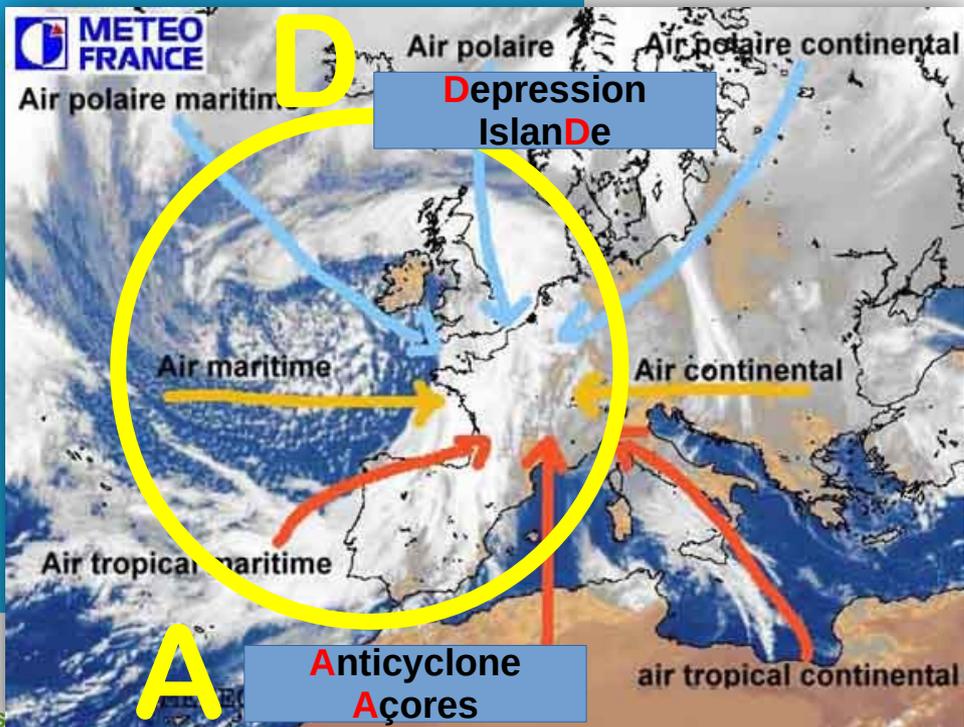
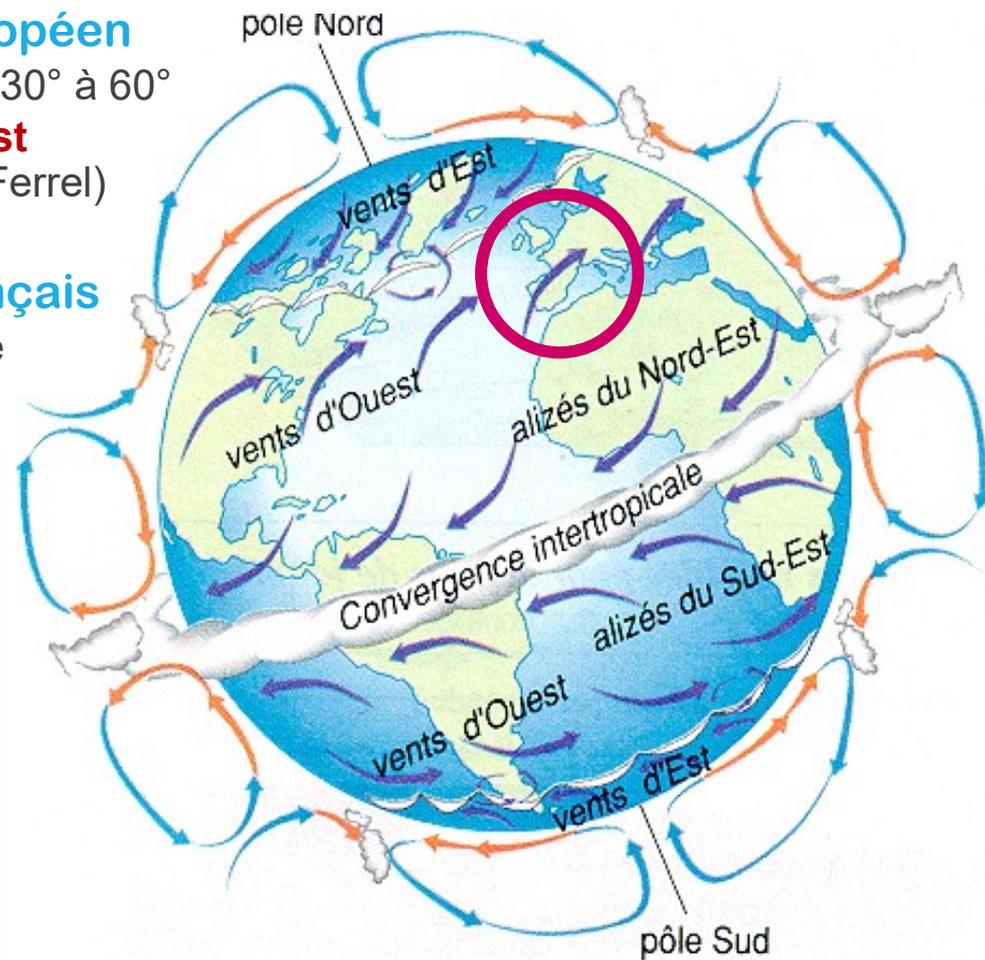
↑ courants ascendants ↓ courants descendants



M

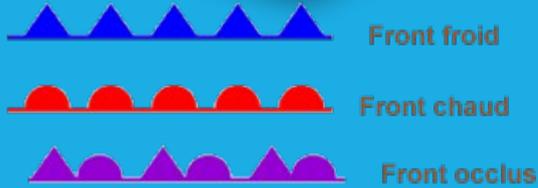
Masses d'air européennes

- ❑ Régime européen
 - Latitude de 30° à 60°
 - **Flux d'ouest** (cellule de Ferrel)
- ❑ Régime français
 - Air maritime (**humide**)



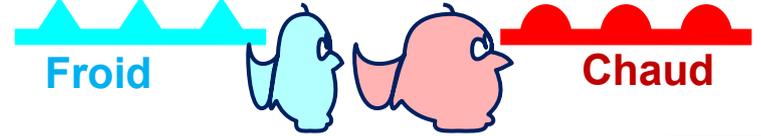
M

Frontogenèse



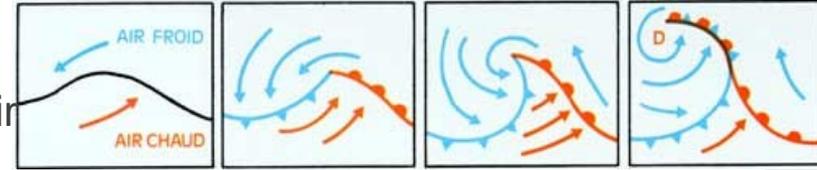
Définition du front

- **Front** = séparation entre 2 masses d'air de **températures** différentes
- Symboles sur les cartes :

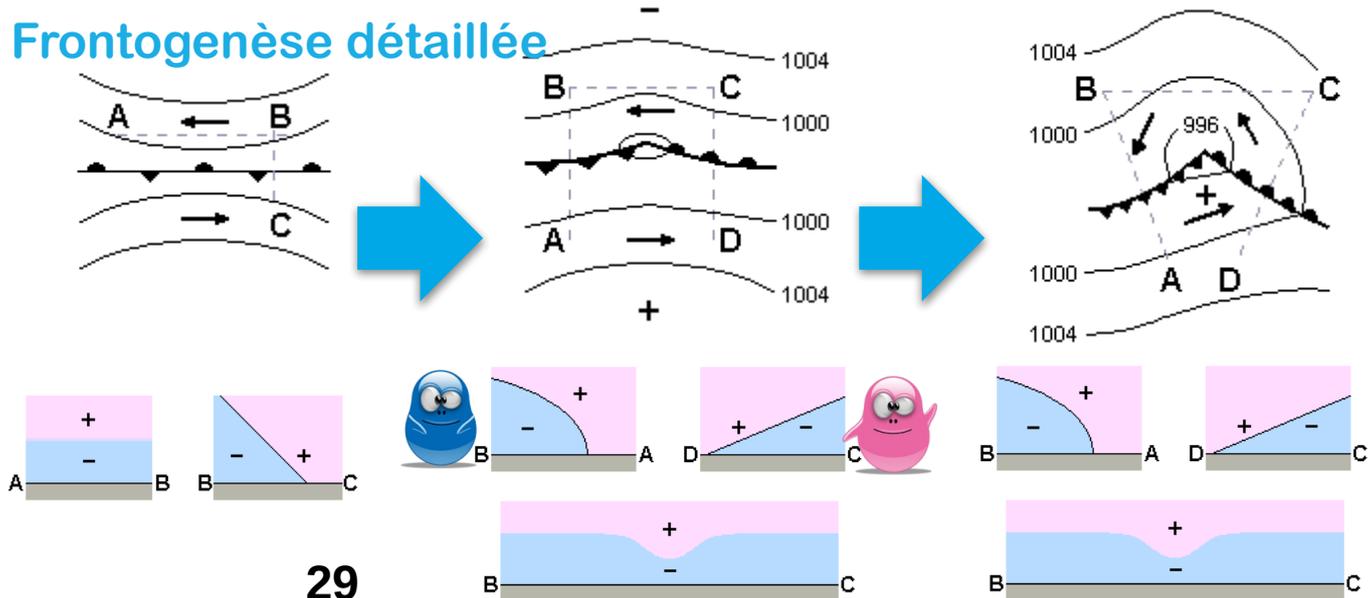


Frontogenèse

- **Ondulation** des 2 masses d'air
- Formation d'une **perturbation**



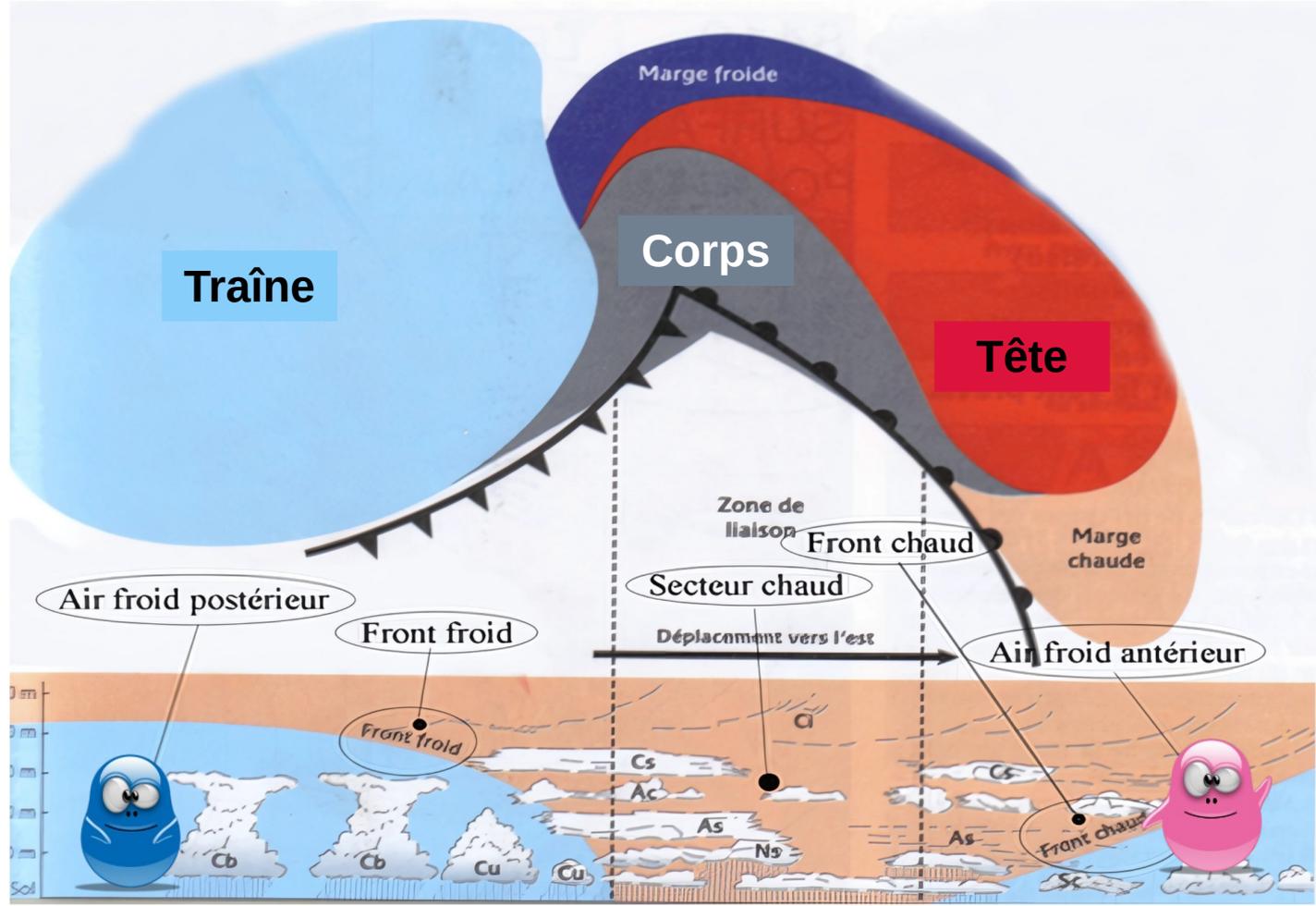
Frontogenèse détaillée



M

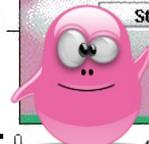
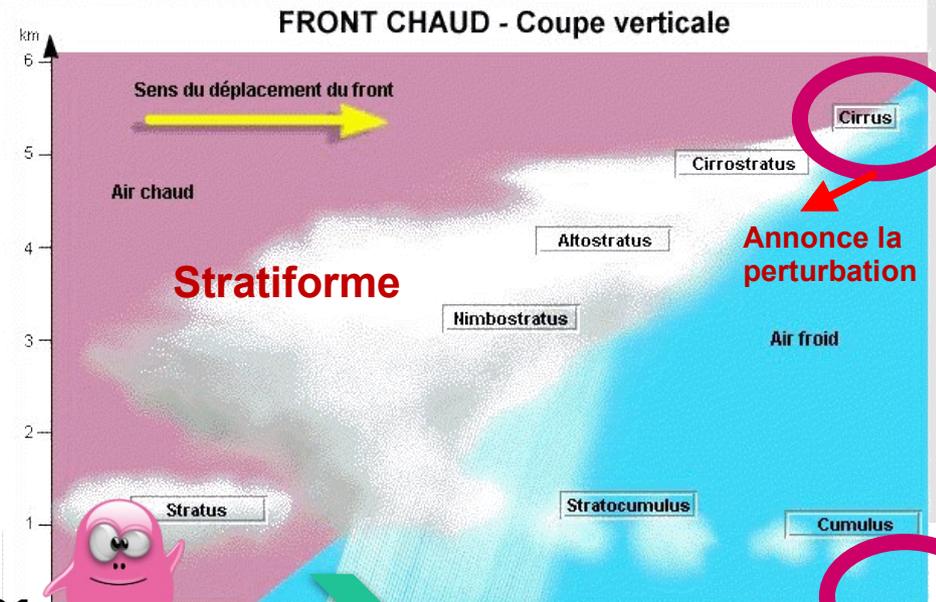
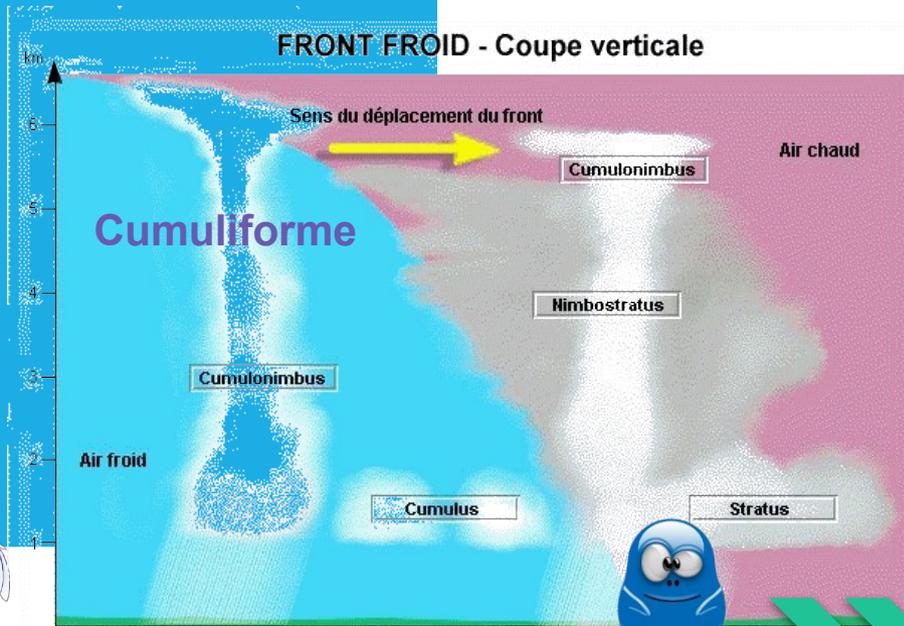
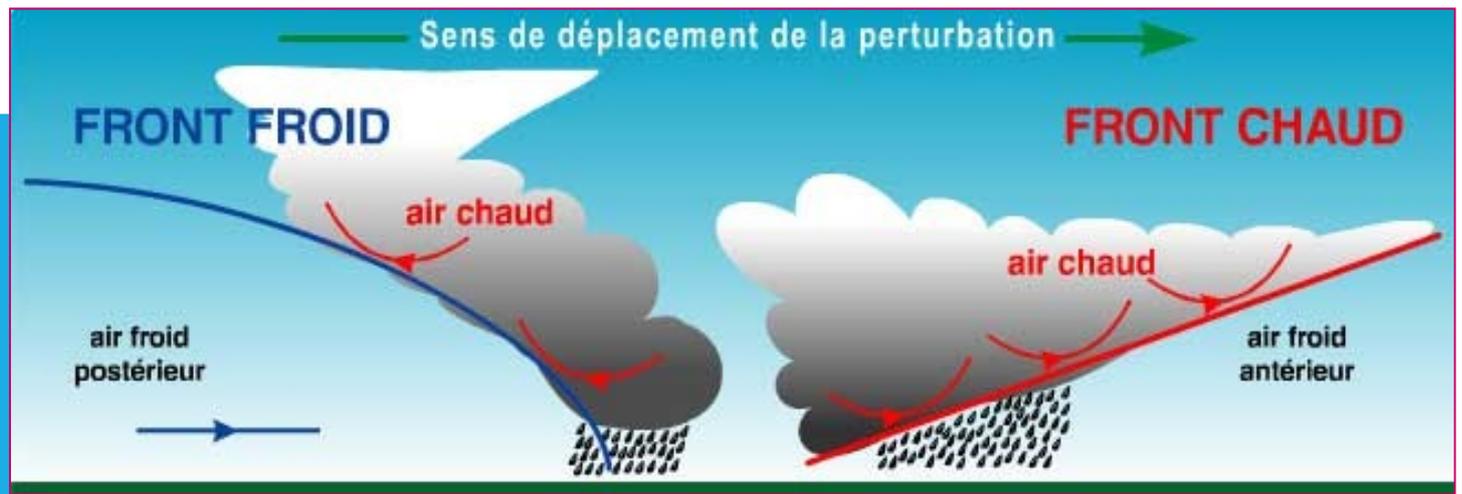
Description de la perturbation

Tête,
Front chaud,
Secteur chaud,
Front froid,
Traîne,
Front occlus
Corps,
Marge...

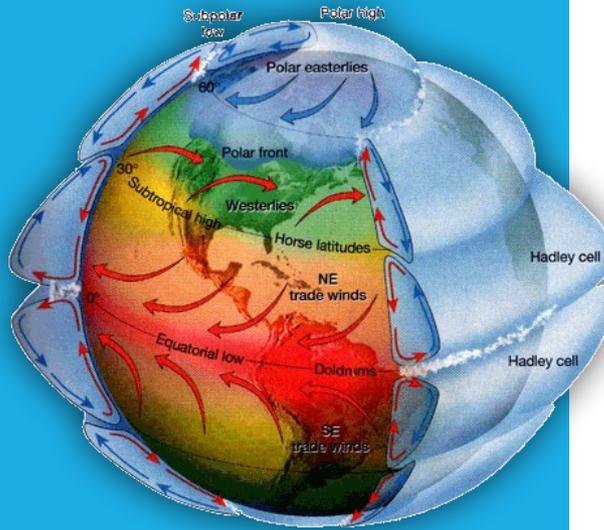


M

Front froid et front chaud

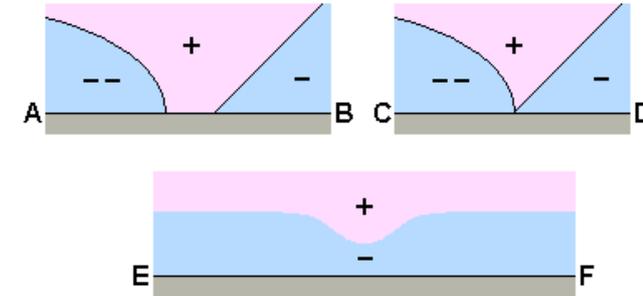
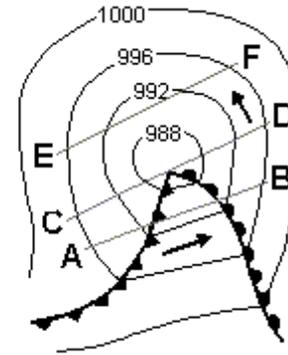


Frontolyse



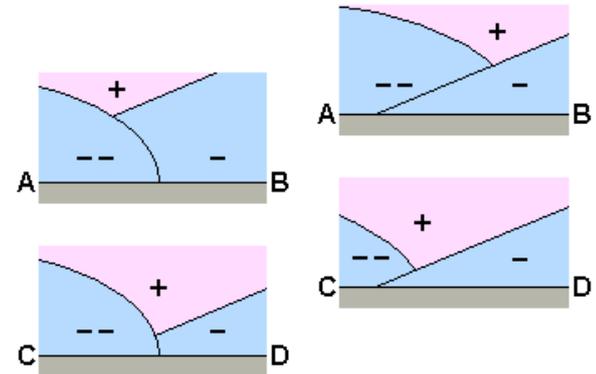
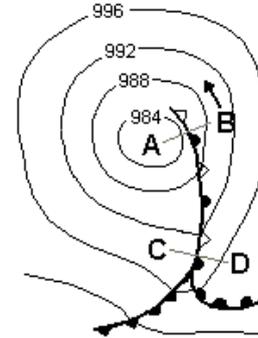
□ Début de la frontolyse

- Le front froid, plus rapide, rattrape le front chaud



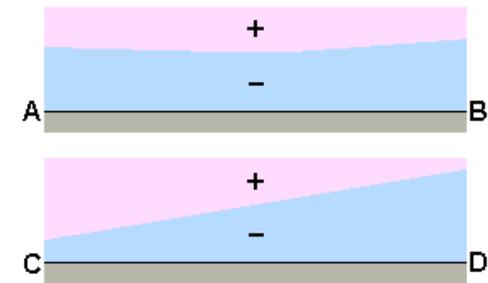
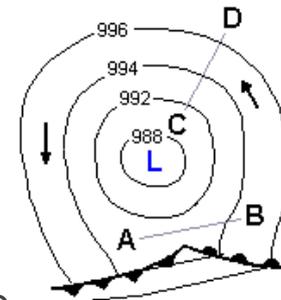
□ Occlusion

- le front froid passe au-dessus ou en-dessous du front chaud
- Plafond bas, précipitations



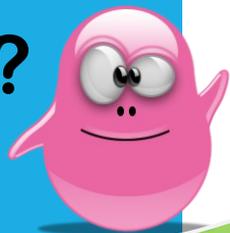
□ Fin de la frontolyse

- L'air chaud est évacué vers le haut
- Fin du régime **dépressionnaire**



M

Brume ou brouillard ?



Sierra
nuage
Stratiforme

☐ Brouillard

- **Fog FG**
- Suspension dans l'atmosphère de très petites gouttelettes d'eau
- Réduisant la **visibilité** au sol à **moins d'un kilomètre**

☐ Brume

- **Mist BR**
- Suspension dans l'atmosphère de très petites gouttelettes d'eau
- Avec une **visibilité** comprise **entre 1 et 5 km**

☐ Brouillard givrant

- **Freezing fog FZFG**
- Formé de gouttelettes d'eau **surfondue** :
- À l'état liquide par température négative, elles gèlent au moindre contact

☐ Brume sèche

- **Haze HZ**
- Due à la présence de divers **aérosols** :
- Particules de pollution industrielle ou urbaine (humidité < 60%)



Échelle
de visibilité

LVP

Procédures par faible visibilité

Low Visibility Procedures

Limite basse

VMC

(dans certaines conditions)

« Bonne visibilité »

Excellente visibilité noté dans les messages :
visibilité = **9999**



Mesure de visibilité

Les phénomènes météorologiques qui peuvent dégrader notablement la visibilité horizontale sont :

- a) la pluie, le vent, la neige.
- b) le givre, le vent, la neige.
- c) la brume, le brouillard, la neige.
- d) la brume, le vent, la neige.



❑ Dégradation de la visibilité

- Brume, brouillard ou neige
- Risques de collision, perte de contrôle...
- → **DANGER !**



Méthode humaine : Tour d'horizon

Image : <https://swamp.com.au>

- **Repères visuels** à une distance connue du point d'observation (château d'eau, bâtiment, colline...)
- Tour d'Horizon estimé par le technicien météo ou le contrôleur aérien
- Aperçu net des contours du repère :
→ visibilité au moins égale à la distance qui sépare le repère du point d'observation

Appareils de mesure de l'intensité d'un faisceau lumineux

- **Transmissiomètre** :
→ entre émetteur et récepteur espacés de 50 m
→ mesure de l'affaiblissement au cours du trajet
→ coefficient d'atténuation de l'atmosphère
- **Diffusomètre** :
→ faisceau rétrodiffusé par l'atmosphère
→ coefficient de diffusion de la lumière par les particules en suspension dans l'air



Copyright: Pascal Taburet, Météo-France



Copyright: Pascal Taburet, Météo-France

M

Formation du brouillard



Mike
la molécule

Le risque de brouillard par saturation de l'air est d'autant plus grand que les deux températures du psychromètre sont :

- voisines
- éloignées
- l'une positive et l'autre négative
- toutes deux négatives



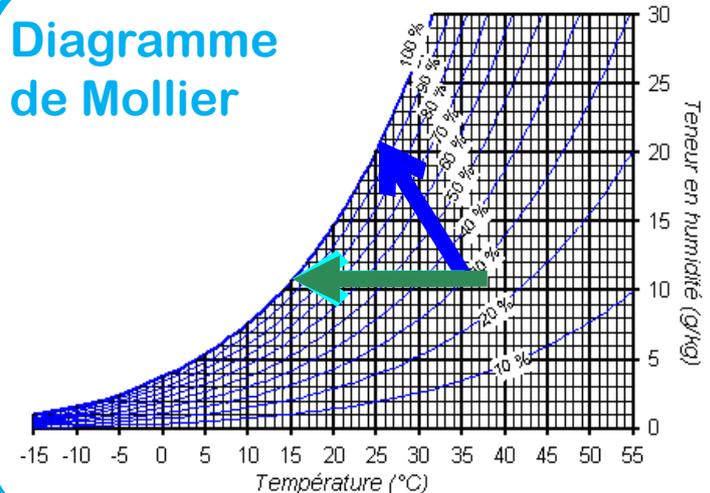
■ Conditions initiales

- **Taux d'humidité** de l'air suffisamment élevé (pluie, neige, brume...)
(Température T proche de celle du point de rosée T_d)
- **Petit vent** :
→ ni trop fort (sinon dispersion des gouttelettes d'eau)
→ ni trop faible (sinon suspension dans l'air empêchée)
- **Présence** d'un nombre suffisant de **noyaux de condensation**
→ ils servent à fixer les gouttelettes d'eau

■ Processus de formation

- Refroidissement masse d'air** ou **apport supplémentaire d'eau**
 - Saturation** de la masse d'air en vapeur d'eau
 - Condensation**
(eau : gaz → liquide)
= formation de brouillard
- Le type de brouillard dépend du processus de formation

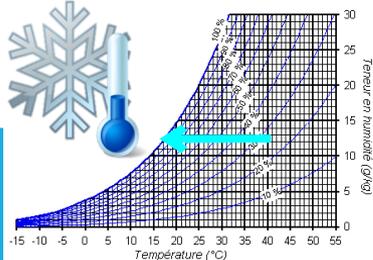
Diagramme de Mollier



Types de brouillard

Sur la photo ci-contre, prise à Paris-Orly au lever du jour après une nuit fraîche, sans nuages et sans vent, on observe un brouillard :

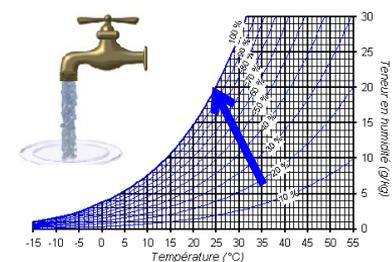
- a) d'advection.
- b) de rayonnement.
- c) d'évaporation.
- d) de convection.



PAR REFROIDISSEMENT

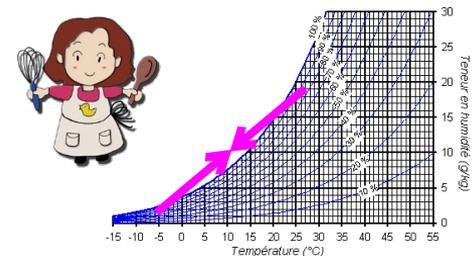
- ❑ **Brouillard de rayonnement**
 - Refroidissement surface terrestre (généralement en fin de nuit)
 - Peut rester plusieurs jours en hiver
 - Conditions anticycloniques, **ciel clair, vent faible** (1 à 2 kt), forte humidité
 - Exemple en montagne du brouillard de pente

- ❑ **Brouillard d'advection**
 - Masse d'air chaud et humide se déplace sur une surface froide
 - Visibilité rarement inférieure à 100 m
 - **Épaisseur verticale importante**
 - Se forme à tout moment du jour
 - Vent modéré



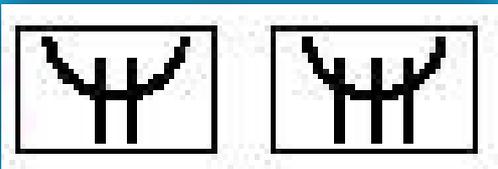
PAR APPORT D'EAU

- ❑ **Brouillard d'évaporation**
 - Se forme sur les surfaces maritimes, surtout en automne et en hiver
 - Souvent **associé à la brise de terre**



- ❑ **Brouillard de mélange**
 - Deux masses d'air humide, de températures et humidités différentes, se mélangent.

Givrage



❑ Givrage *icing*

- Contamination par l'accrétion de givre ou glace sur l'avion
- **Brouillard givrant** *freezing fog FZFG* : gouttelettes d'eau **surfondue**

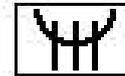


❑ Risques et dangers du givrage

- Risque : en vol ou au sol, **si température négative** (0 à -15°C) et selon :
 - ✓ quantité d'**eau surfondue** (eau liquide à $T^{\circ} < 0^{\circ}\text{C}$) dans l'atmosphère,
 - ✓ selon taille, répartition des gouttes et mouvements verticaux dans les nuages



- Danger d'accident lié à la **modification du profil aérodynamique** (et accessoirement à l'augmentation de masse)



❑ Messages météo

- Message **SIGMET** en cas de risque de givrage fort :
 - ✓ le pilote surveille la formation de dépôt blanc ou transparent (ailes...)
 - ✓ le pilote surveille toute variation anormale des paramètres de vol (VP...)
- Rappel : ne pas confondre :
 - ✓ **dégivrage de-icing** (avant vol) et **antigivrage anti-icing** (pendant le vol)
 - ✓ **dégivrage de-icing** (avion) et **déverglaçage de-icing** (piste)

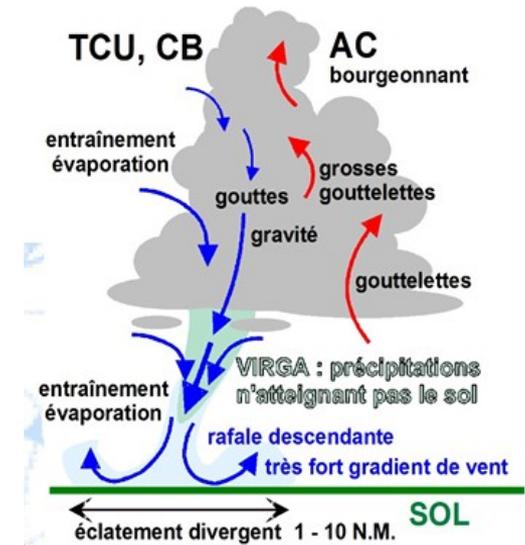
Cisaillement, rafales de vent

En pratique, on sera vigilant(e) :

- aux déplacements différents de couches nuageuses adjacentes à proximité du sol
- aux panaches de fumées tourmentés
- aux nuages lenticulaires, en rouleaux ou en entonnoirs
- au vent fort de surface avec rafales
- aux manches à air orientées différemment sur le terrain
- aux poussières soulevées en tourbillon (sous les nuages convectifs ou sans nuage)
- aux nuages convectifs accompagnés de précipitations, atteignant ou non le sol.

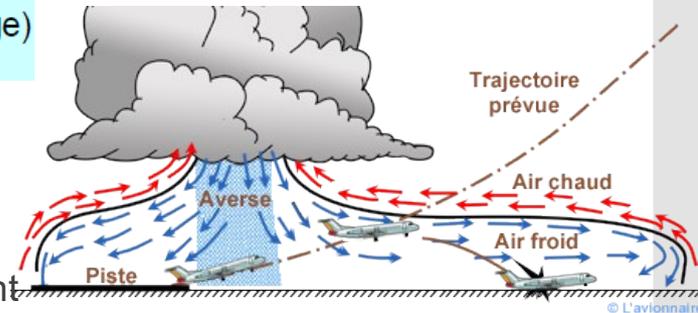
☐ Cisaillement

- **Cisaillement** *windshear*
- Brusque variation spatiale très marquée de direction et de vitesse du vent sur une échelle réduite, s'accompagnant souvent d'une turbulence forte et très locale
- Provoque une brutale modification de la trajectoire de l'avion
- Recommandation aux pilotes :



☐ Rafale de vent

- **Rafale** (de vent) *gust*
- Variation brusque et localisée du vent
- Exemple : « 22018G25 » = vent du 220° pour 18kt rafales à 25kt
the wind is gusting 25kt



M

Turbulence



La lecture sur une carte de prévision du symbole suivant signifie :



- a) givrage fort.
- b) averses de pluie.
- c) grêle.
- d) turbulence modérée.



☐ Turbulence *turbulence*



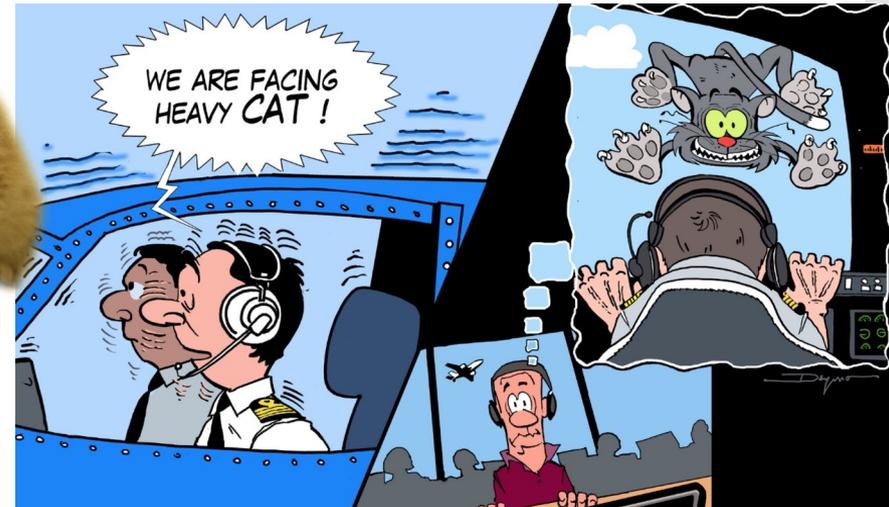
- Mouvements aléatoires de l'air (se superposant au mouvement moyen)
- Cisaillement engendrant des accélérations verticales ou horizontales non compensées par les méthodes normales de pilotage
- Origine : frottements avec le sol, montagnes (orographique) ou convection (nuages cumuliformes)

☐ Information du pilote

- Message **SIGMET** en cas de turbulence forte
- Turbulences modérées et fortes signalées sur les cartes **TEM51**

☐ CAT ?

- *Clear Air Turbulence (CAT)*
- **Turbulence en air clair**
- En haute altitude



M

Phénomènes associés au Cumulonimbus



Charlie
nuage CUF

L'orage est caractérisé par la présence de :

- a) cirrus.
- b) stratus et stratocumulus.
- c) nimbus et nimbostratus.
- d) cumulonimbus.

☐ Cumulonimbus (Cb)

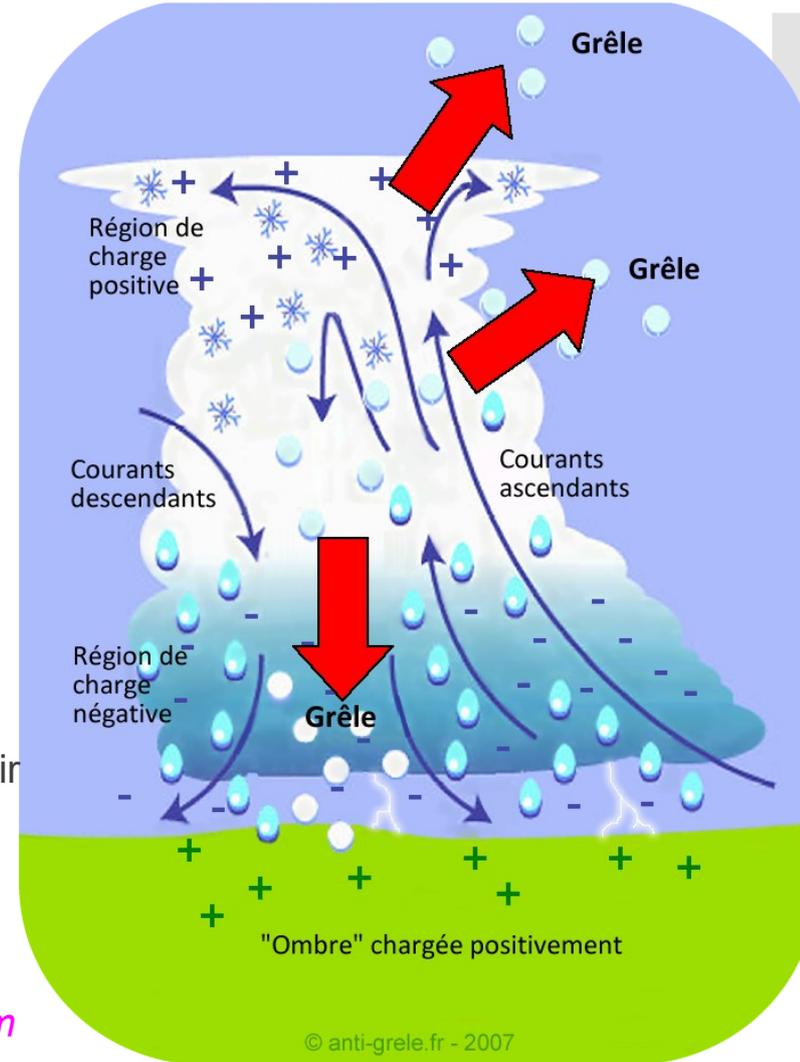
- En atmosphère instable
unstable air

☐ Précipitations

- ▽ ▪ **Averses** *showers SH* de :
- /// ▪ **Pluie** *rain RA*
- * ▪ **Neige** *snow SN*
- △ ▪ **Grêle** *hail GR*

☐ Autres

- ↻ ▪ **Orages** *thunderstorm TS*
éclairs et tonnerre
- ⚡ ▪ **Givrage** *icing, freezing*
Accrétion de givre et/ou de glace
- ⚡ ▪ **Turbulence** *turbulence*
mouvements aléatoires de l'air
- ⚡ ▪ **Cisaillement** *windshear WS*
variation de direction et/ou de vitesse du vent
(brusque et très marquée)
- Tempête de sable = *duststorm*



© anti-grele.fr - 2007

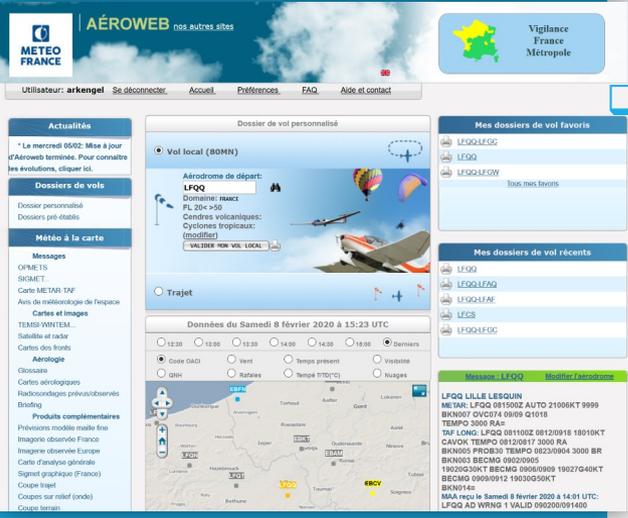


40



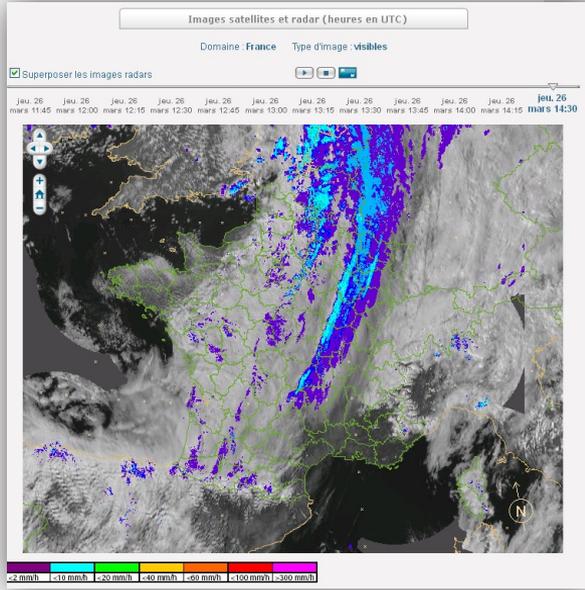
Protection météorologique

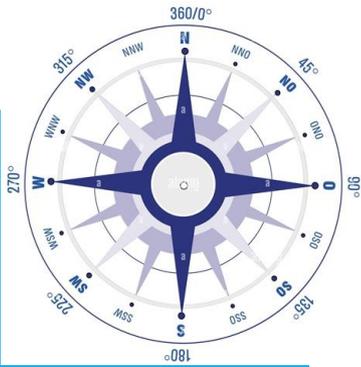
- **Quand ? Obligation de prise de protection météorologique**
 - Dans le cadre de la **préparation du vol**, pour tout pilote avant chaque vol.
- **Comment ? Méthodes de protection**
 - Dans une station de **Météo France** : le pilote obtient un **dossier météo** (cartes, messages), et le prévisionniste lui présente la situation et ses évolutions
 - Par **internet**, en se connectant sur **AEROWEB** : <https://aviation.meteo.fr>
 - **Soit en téléphonant** au 08 99 70 121.5 (n° surtaxé) : exposé verbal seulement



□ Quoi ? Éléments de la protection selon le canal de consultation

1. **Exposé verbal** de la situation
2. **Image satellite**, sur les canaux :
 - ✓ **Infrarouge (IR)** : température réfléchiée (renvoyée vers le satellite) → nature et sommet des nuages
 - ✓ **Visible** : pour visualiser la densité des nuages (disponible uniquement de jour)
 - ✓ **Composition colorée** : canaux IR + visibles
3. **Image radar** : visualisation des zones de précipitations (ainsi que leur densité)
 - Sur internet, l'image radar est superposable sur l'image visible → → →
4. **Cartes** météorologiques (TEMSE, WINTEM...)
5. **Messages** météorologiques (METAR, TAF...)





Carte météorologique

Vent représenté par un drapeau

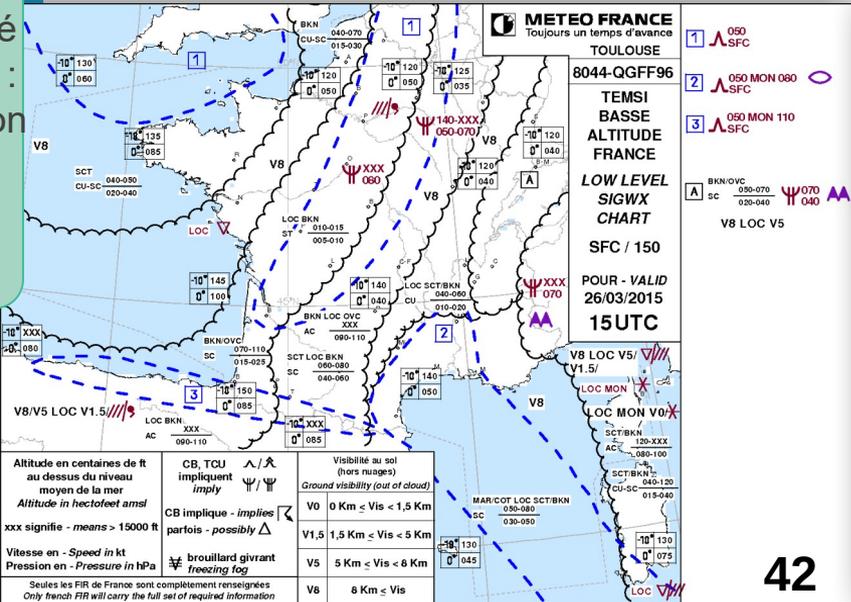
Fanions : intensité du vent
Extrémité du mât : direction

	5 kt		15 kt
	10 kt		50 kt

- Un vent du 180/10 vient du :
- Sud à une vitesse de 10 km/h.
 - Sud à une vitesse de 10 kt.
 - Nord à une vitesse de 10 kt.
 - Nord à une vitesse de 10 km/h.

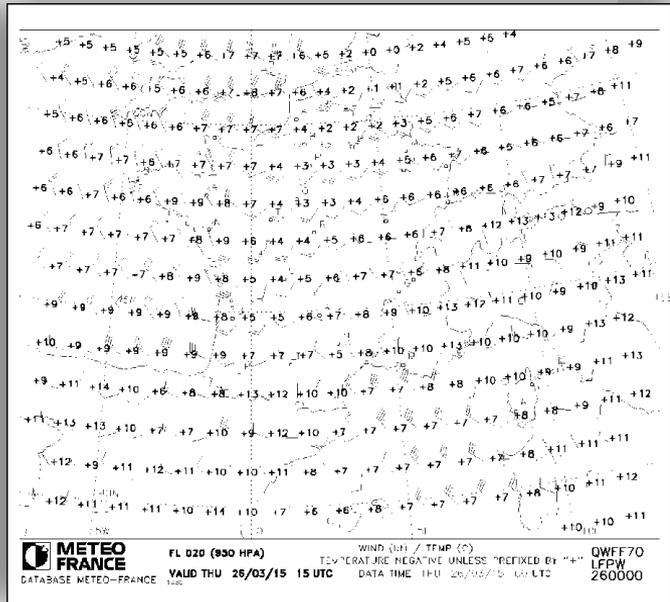
Carte « TEMSI »

- TEMSI : TEMPs Significatif significant weather chart**
Zones de temps significatifs, nuages, fronts, phénomènes...
- À plusieurs échelles données
- Produites toutes les 3 heures
- Codes et symboles utilisés :** temps significatif (pluie, grêle...), nuages, fronts en surface, etc.
→ voir briefings précédents
- Exemple de carte :

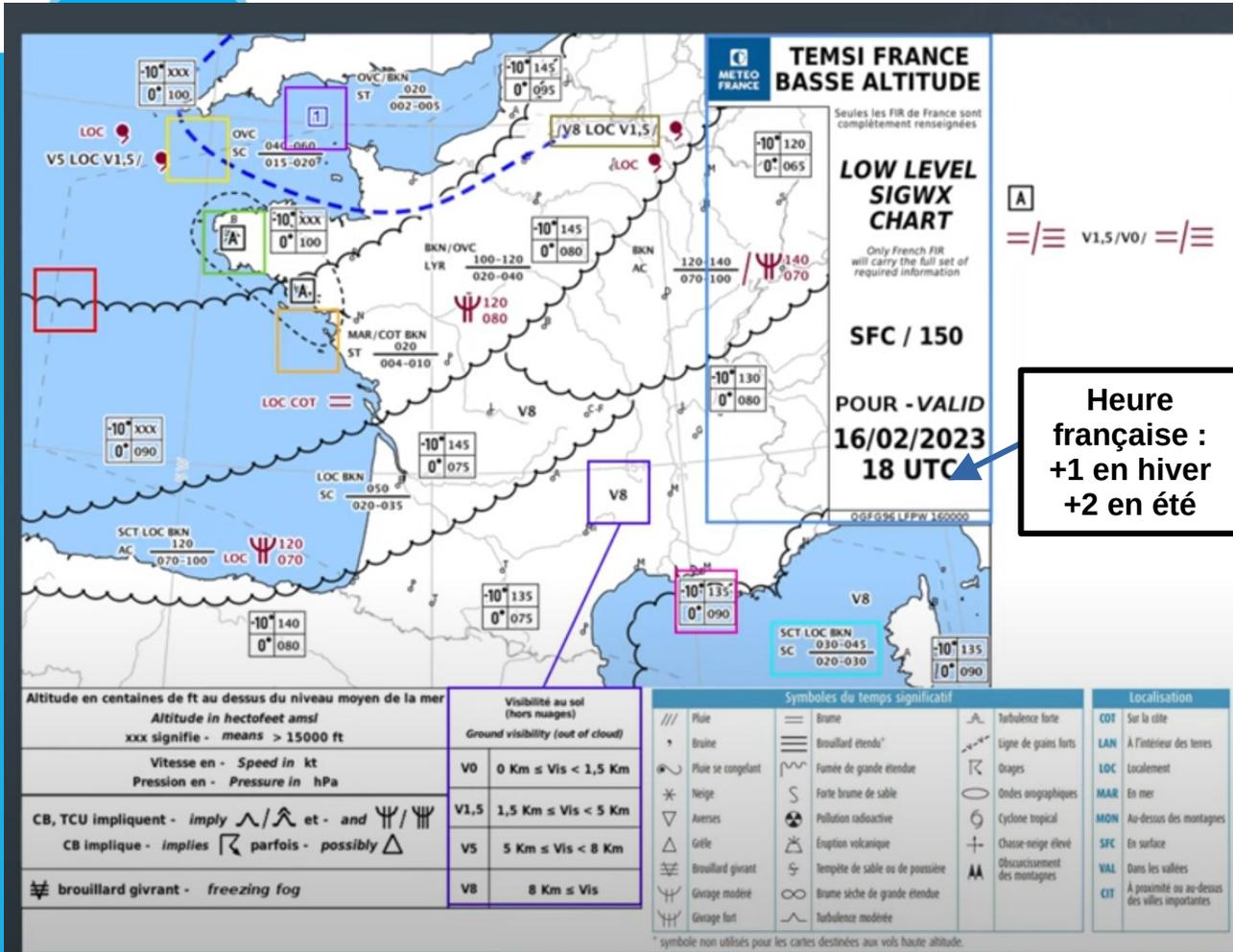


Carte « WINTEM »

- WINTEM : vents et températures WIND and TEMperature**
- À plusieurs niveaux de vol donnés (FL 020 = 850 hPa, FL050...)
- Produites toutes les 3 heures
- Représentations particulières :**
Vent : orientation en fonction de la provenance, force en **kt**
Température : en **négatif**, indiquée avec signe « + » si positif
- Exemple de carte :



Carte « TEMSI »



- Cartouche
- Lignes festonnées - Zone de temps significatif
- Lignes fines discontinues - Sous zone de temps significatif
- Lignes épaisses discontinues - Vent > 30kt
- Chiffre indiquant une zone de turbulences ou de vent > 30kt
- Renvoi à une zone ou sous zone
- Isotherme 0°C à 900ft et isotherme -10°C à 13500ft
- Visibilité
- Visibilité > 8 km et localement comprise entre 1.5 et 8km
- SCT LOC BKN - Couverture du ciel (SCT et BKN localement)
- SC - Type de nuage présent
- 030-045 Couche sup - Base des nuages à 3000ft et plafond à 4500ft
- 020-035 Couche inf - Base des nuages à 2000ft et plafond à 3500ft

LFPG **041900Z** **AUTO** **32008KT** **9999** **SCT013** **SCT019** **24/11** **Q1020** **NOSIG**

-  Code OACI de Paris CDG
-  Jour **04** du mois en cours à **1900Z** (UTC)
-  Observation faite automatiquement
-  Vent venant du cap **320°** à une vitesse de **8kt**
-  Visibilité supérieur à **10km**
-  Couche nuageuse éparses à **1300** et **1900** pieds
-  Température extérieur de **24°C** et point de rosée à **11°C**
-  Calage altimétrique local (QNH **1020** HPA)
-  Aucun changement significatif dans les 2 prochaines heures

 0 - CAVOK

 1 - FEW

 2 - FEW

 3 - SCT

 4 - SCT

 5 - BKN

 6 - BKN

 7 - BKN

8 - OVC 

9 - OVC SKY 

Octas

Message météorologique

LILLE-LESQUIN

METAR: LFQQ 261630Z 22007KT 9999
SCT030 BKN046 08/07 Q1005 NOSIG
TAF LONG: AMD LFQQ 261628Z
2616/2718 22012KT 9999 BKN013 BECMG
2616/2618 BKN030 TEMPO 2617/2619 5000
SHRA BKN015 BECMG 2618/2620 29008KT

☐ Messages émis pour un aérodrome

- **METAR** *Meteorological Aerodrome Report* : message d'**OBSERVATION**
- **TAF** *Terminal Aerodrome Forecast* : message de **PRÉVISION**
- « Temps à Fenir »

☐ Quelques codes caractéristiques

- **9999** = visibilité > 10 km
- **NSC** : *No Significant Cloud* pas de nuage significatif
- **CAVOK** : *Ceiling And Visibility OK*
 - ✓ Plafond (❖) hauteur > 1500 m
 - ✓ Visibilité > à 10 km
 - ✓ Pas de Cb, ni précipitations, ni orages ou brouillard
- ❖ *Le **plafond ceiling** (en météo) est la hauteur de la base de la couche nuageuse la plus basse couvrant plus de la moitié du ciel (**nébulosité**).*
 - ✓ Nébulosité (exprimée en **octats**) :

0

SKC

Sky clear

1-2

FEW

few

rares

3-4

SCT

scattered

épars

5-6-7

BKN

broken

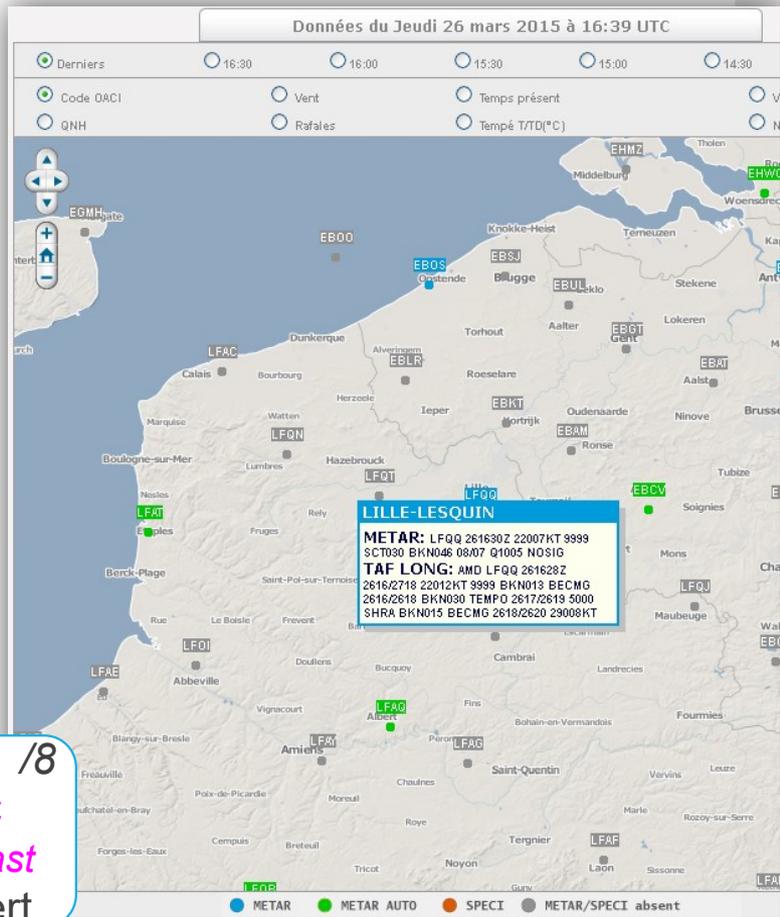
fragmentés

8 /8

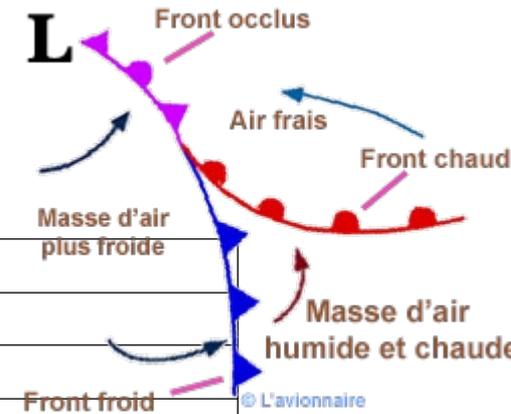
OVC

overcast

couvert



Questionnaire à choix multiple

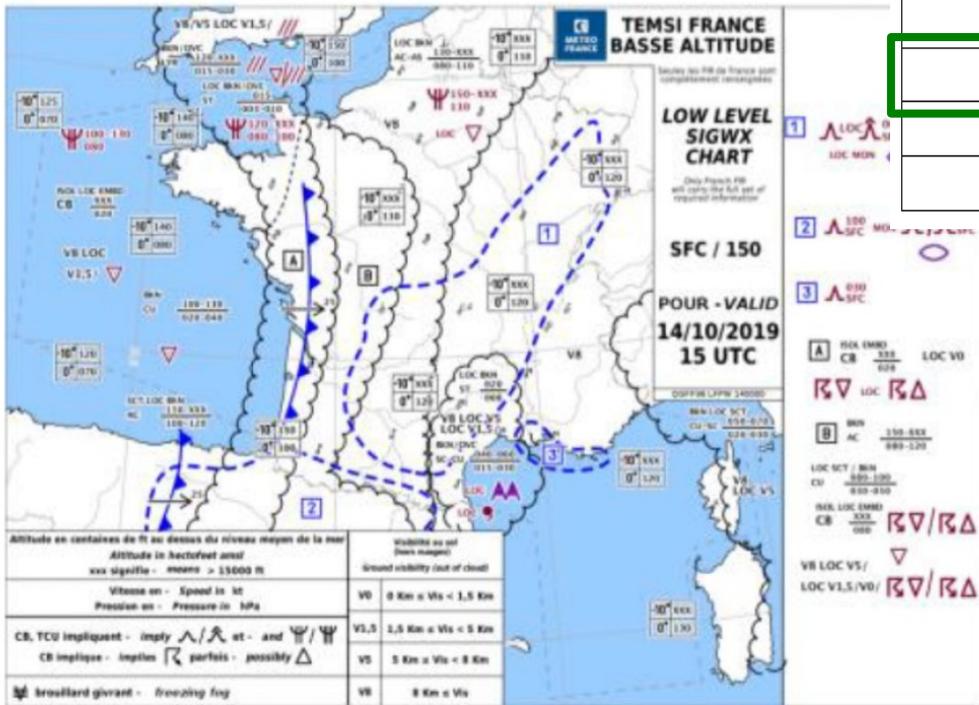


1.1	Un front occlus est représenté sur les cartes météorologiques par :
a)	une ligne avec des demi-cercles accolés à elle.
b)	une ligne avec des triangles accolés à elle.
c)	une ligne avec une alternance de demi-cercles et de triangles.
d)	une ligne avec des dessins de nuages accolés.

1.2	Les nuages plus particulièrement recherchés pour pratiquer le vol à voile sont :
a)	les cumulonimbus.
b)	les altos cirrus.
c)	les cumulus.
d)	les nimbostratus.

1.3	La visibilité en cas de brume :
a)	est comprise entre 1 kilomètre et 30 secondes de vol.
b)	est inférieur à 1 kilomètre.
c)	est comprise entre 1 et 5 kilomètres.
d)	peut aller de 0 à 5 kilomètres.

Le 14 Octobre 2019, la France est traversée d'ouest en est par une perturbation.
L'un des fronts visibles sur la carte TEMSI ci-contre génère de fortes précipitations et des orages. Les questions suivantes se rapportent à ce front.



Carte TEMSI

1.5 Les fronts visibles sur la carte TEMSI sont des fronts :

a) occlus.

b) froids.

c) chauds.

d) tièdes.

1.4 Sur la carte TEMSI, on peut lire une validité au 14/10/2019 15 UTC. Sachant que le 14 octobre 2019, la France était en « heure d'été », à quelle heure légale correspond cette prévision ?

a) 13h.

b) 14h.

c) 16h.

d) 17h.

1.6 Compte tenu des observations des précipitations et des impacts de foudre, on peut conclure que l'atmosphère au niveau du front étudié est :

- a) chaude.
- b) stable.
- c) instable.
- d) froide.



Carte des précipitations

1.7 Au niveau du front étudié, on peut dire que :

- a) de l'air chaud passe au-dessus de l'air froid qui le précède.
- b) de l'air froid passe au-dessus de l'air chaud qui le précède.
- c) de l'air chaud passe en-dessous de l'air froid qui le précède.

1.8 Les orages observés se produisent :

- a) dans la zone chaude.
- b) dans la traîne, dite active.
- c) dans la traîne, dite inactive.
- d) dans l'occlusion.



Carte des impacts de foudre

1.9	La tropopause :
a)	se trouve généralement à une altitude plus élevée aux pôles qu'à l'équateur.
b)	se trouve généralement à une altitude plus élevée à l'équateur qu'aux pôles.
c)	est toujours située à la limite supérieure des nuages.
d)	est toujours située à une altitude de 12000 mètres.

1.10	En atmosphère standard, le gradient de température en s'élevant en altitude dans les basses couches est de :
a)	+ 2°C par 1000 pieds.
b)	- 2°C par 1000 pieds.
c)	- 2°C par 1000 mètres.
d)	+ 2°C par 1000 mètres.

1.11	Dans le dossier météorologique du pilote, on trouve un certain nombre de messages. Parmi eux le METAR est un message :
a)	d'observation du temps en un lieu donné.
b)	de prévision du temps en un lieu donné.
c)	de prévision du temps sous forme d'une carte.
d)	d'observation du temps sous forme de carte.

1.12	Le Mistral est un vent :
a)	du Sud sur Marseille.
b)	du Sud-Ouest qui souffle sur le Languedoc.
c)	du Nord-Ouest qui souffle sur le Languedoc.
d)	du Nord qu souffle dans la vallée du Rhône.

1.13	La brise de vallée descendante s'établit lorsque les versants montagneux :
a)	le jour, se réchauffent moins vite que les fonds des vallées.
b)	le jour, se réchauffent plus vite que les fonds des vallées.
c)	la nuit, se refroidissent plus vite que les fonds des vallées.
d)	la nuit, se refroidissent moins vite que les fonds des vallées.

1.14	Lorsque de la pluie surfondue touche le sol froid, il se forme :
a)	de la grêle.
b)	du brouillard.
c)	de la neige.
d)	du verglas.

1.15	Le vent dans l'hémisphère nord .
a)	vient de la gauche quand on se dirige de la dépression vers l'anticyclone.
b)	vient de la droite quand on se dirige de l'anticyclone vers la dépression.
c)	est plus fort quand les isobares sont rapprochés.
d)	est moins fort lorsqu'il pleut.

1.15	Le vent dans l'hémisphère nord :
a)	vient de la gauche quand on se dirige de la dépression vers l'anticyclone.
b)	vient de la droite quand on se dirige de l'anticyclone vers la dépression.
c)	est plus fort quand les isobares sont rapprochés.
d)	est moins fort lorsqu'il pleut.

1.16	En plaine, les vélivoles profitent d'un phénomène météorologique pour gagner de l'altitude. Il s'agit des :
a)	brises de vallée.
b)	ascendances.
c)	des turbulences.
d)	des cisaillements des couches d'air.

1.17	En atmosphère standard, à 1000 ft, la température sera d'environ :
a)	8,5°C.
b)	13°C.
c)	0°C.
d)	-3°C.

1.18 L'atmosphère est principalement composée :

a) de dioxygène.

b) de diazote.

c) de gaz carbonique.

d) de vapeur d'eau.

1.19 En atmosphère standard, la masse volumique de l'air est de :

a) 1225 kg/m³.

b) 1,225 g/m³.

c) 1,225 kg/m³.

d) 122,5 g/m³.

1.20 L'épaisseur de l'atmosphère (limite de Karman) est de :

a) 100 km.

b) 10 000 km.

c) 100 000 km.

d) 30 km.

1.21 Lorsque le vent est fort au sol :

- a) il y a peu de turbulences dans les basses couches de l'atmosphère.
- b) le ciel va systématiquement se dégager.
- c) il est nul en altitude.
- d) des turbulences dues aux imperfections du sol et aux obstacles se développent en basses couches.

1.22 Des mouvements aléatoires de petite échelle qui perturbent un flux d'air bien établi sont appelés :

- a) des cyclones.
- b) du cisaillement et de la turbulence.
- c) des ascendances.
- d) des mouvements laminaires.