

# 19<sup>ème</sup> Séminaire du pilote privé Avion et ULM

## **INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR**

## **CONVECTION**

22 NOVEMBRE 2025

Didier Boutonnet - ACAT – PPL-A (Météo France)  
Didier Rosenblatt - ENAC – PPL-A (Météo France)

# INTRODUCTION

Le vol VFR nécessite un temps plutôt clément pour sa bonne réalisation, le plaisir et la sécurité du pilote et passagers.

Ainsi, en préparant son vol, le pilote doit déterminer les paramètres météo avec l'aide des éléments dont il dispose : TAF, TEMSI TBA, cartes des fronts, modèles,... Mais avoir un temps « clément » ne veut dire absolument sans nuages, aussi il paraît important de savoir les reconnaître, dans quelles situations ils se forment et quels sont les dangers associés.

Après avoir vu la formation des nuages bas (séminaire 2023) puis ceux liés aux perturbations (séminaire 2024), on va s'intéresser ici à l'instabilité des masses d'air, la convection, ses différentes manifestations et les dangers liés aux nuages convectifs. On verra aussi que la convection n'est pas que du mauvais temps, c'est aussi le moteur pour de nombreux aéronautes.

On verra d'abord ce qu'est l'instabilité dans une masse d'air (rappels théoriques) et quels sont les types de convection auxquels on peut avoir à faire. Puis nous verrons des situations réelles où nous analyserons la situation à l'aide d'Aeroweb et comment on peut prévoir la convection.

# RAPPELS : LES NUAGES, FORMATION ET CONSTITUTION



**Un nuage est un ensemble visible de minuscules particules d'eau liquide ou de glace (ou les deux à la fois) en suspension dans l'atmosphère.**

Cet ensemble peut comporter des particules d'eau liquide ou de glace de plus grandes dimensions, des particules liquides non aqueuses (dioxyde de soufre) ou solides (particules de pollution, sable, suie, poussières, sel marin, fumées...).



# RAPPELS : LES NUAGES, FORMATION ET CONSTITUTION

Les nuages se forment par **condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air atmosphérique**.

- **Lorsque l'air se refroidit**, sa capacité à contenir de la vapeur d'eau diminue, ce qui entraîne la formation de gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace autour de noyaux de condensation tels que la poussière, le pollen ou les particules de sel.

- Les vitesses de chute des gouttelettes nuageuses et des cristaux de glace sont faibles (quelques mm/s à quelques dizaines de cm/s), la présence de vitesse verticale ascendante même faible au sein des nuages suffit à éliminer leur descente et à provoquer une suspension des nuages dans l'air.

- Différents types de nuages se forment à différentes altitudes et sous des conditions météorologiques variables. Les principales classifications comprennent :

- les nuages bas (stratus, stratocumulus, cumulus et cumulo-nimbus),
- les nuages moyens (altostratus, altocumulus),
- les nuages élevés (cirrus, cirrostratus, cirrocumulus).



# RAPPELS : LES NUAGES, FORMATION ET CONSTITUTION

## Les gouttelettes d'eau

Diamètre : compris entre 2 et 200 microns. La grande majorité des gouttelettes ont un diamètre compris entre 10 et 20 microns.

Vitesse de chute : Elle est faible et proportionnelle au diamètre des gouttelettes. Elle varie entre quelques cm/s et quelques dizaines de cm/s.

Concentration : elle varie selon le genre mais est toujours comprise entre 50 et 450 gouttelettes par cm<sup>3</sup> (70 dans les nuages cumuliformes, 450 dans certains nuages stratiformes, elles sont alors plus petites).

Contenu en eau liquide : il varie de 0,3 à 2,5 g/m<sup>3</sup> (2,5g/m<sup>3</sup> dans les nuages à fort développement vertical).

## Les cristaux de glace

La proportion de particules de glace lorsque T sous 0°C.

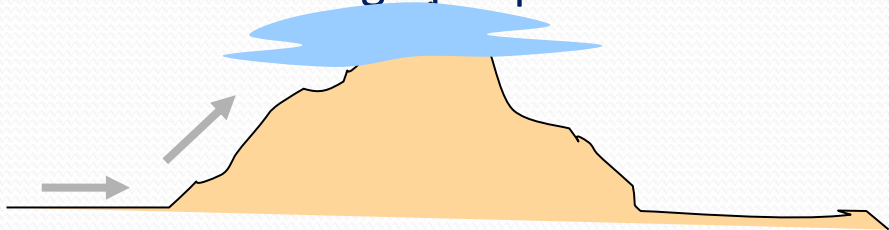
Entre 0 et - 4°C il n'y a généralement que des gouttelettes surfondues.

A -10°C, 50% des particules se trouvent sous forme de glace.

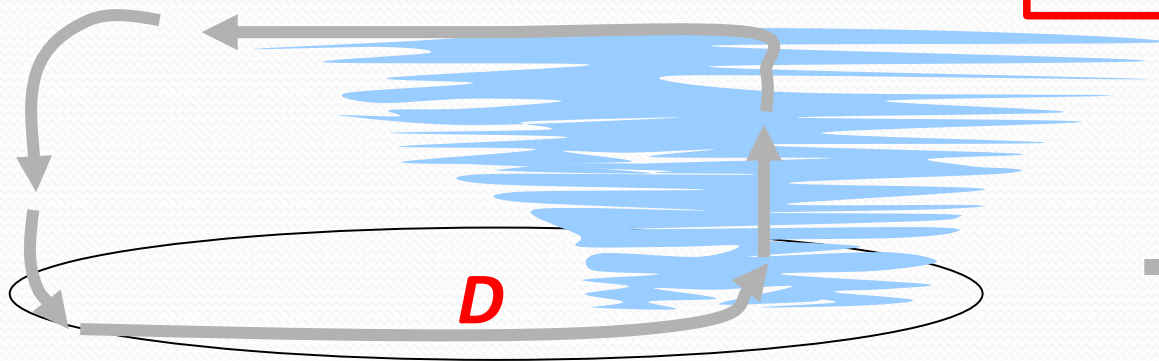
A partir de -20°C, on a environ 95% des particules qui sont sous forme de glace.

**Processus de condensation par ascendance : détente adiabatique et refroidissement de la particule d'air => saturation de la particule, formation d'eau et /ou glace**

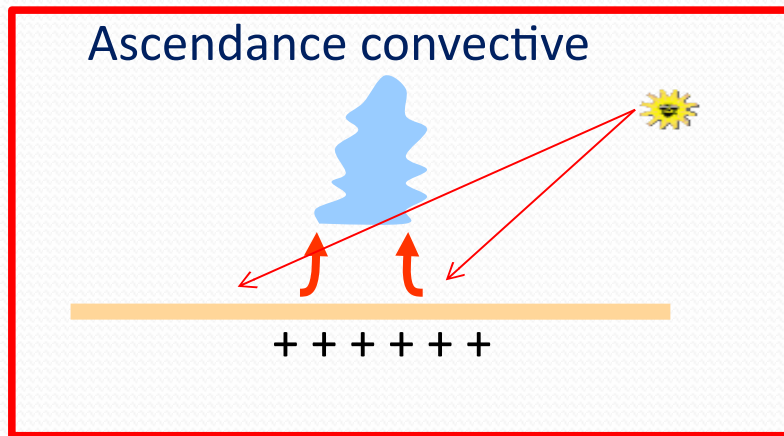
Ascendance orographique



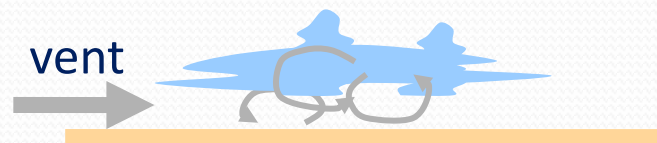
Ascendance dépressionnaire (perturbation)



Ascendance convective



Ascendance par turbulence



# RAPPELS : LES NUAGES, CLASSIFICATION

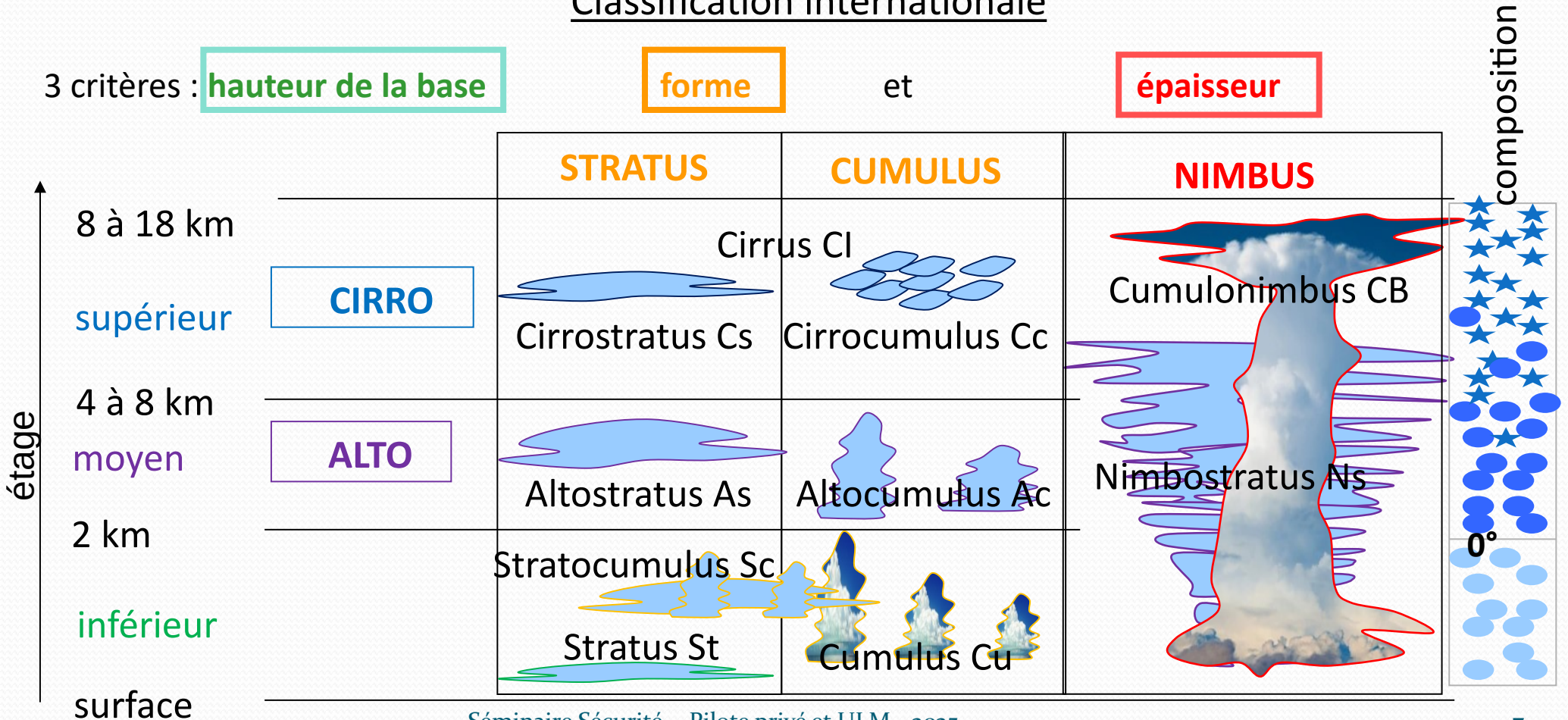
## Classification internationale

3 critères : **hauteur de la base**

**forme**

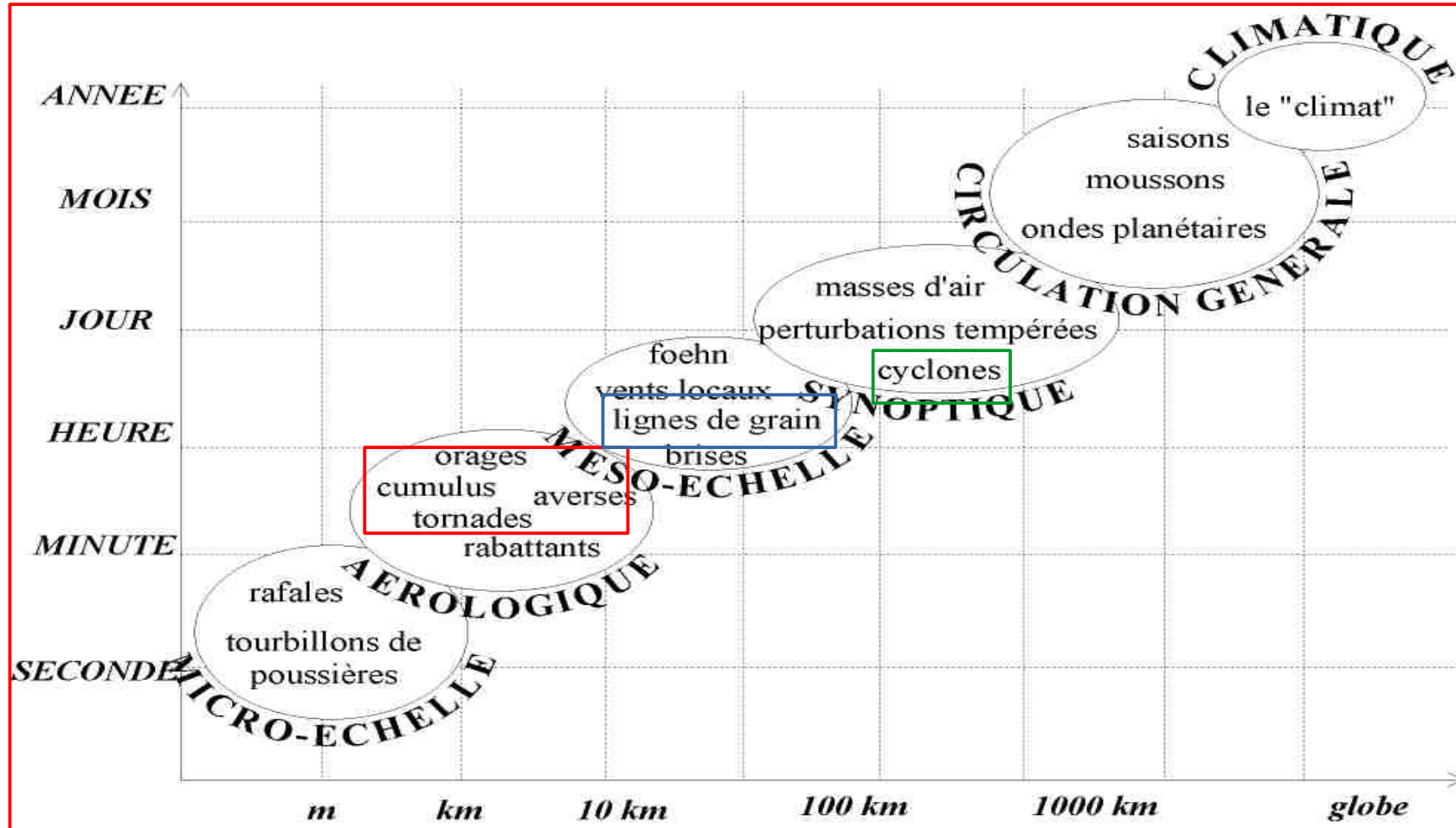
et

**épaisseur**



# RAPPELS : ECHELLES METEOROLOGIQUES

## Échelles météorologiques des événements atmosphériques :



# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – DÉFINITION ET PRINCIPES

## Stabilité et instabilité

Considérons un volume d'air élémentaire, encore appelé « particule d'air », dans une tranche d'atmosphère en équilibre sur la verticale : si l'on soulève ce volume (par exemple par action du relief, d'un forçage par le vent, en le chauffant), que se passe-t-il ? La particule retourne-t-elle à sa position initiale ou bien le mouvement impulsé s'amplifie-t-il ?

Tout dépend du poids de cette particule par rapport à celui de l'air environnant (principe simple d'un corps plongé dans un fluide de densité différente, cf Archimède) :

→ **Si la particule est plus légère, elle continue sa course vers le haut (instabilité),**

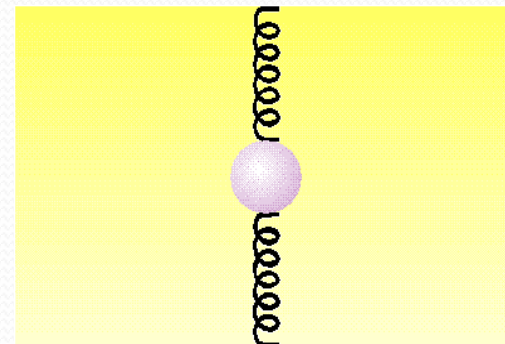
→ sinon, elle redescend vers son point d'équilibre (stabilité).

— **La flottabilité** est la force résultante du poids de ce volume d'air (dépendant de sa température et de son humidité, donc de sa densité) et de la force d'Archimède à laquelle il est soumis (dépendant de la température et de l'humidité de l'air environnant).

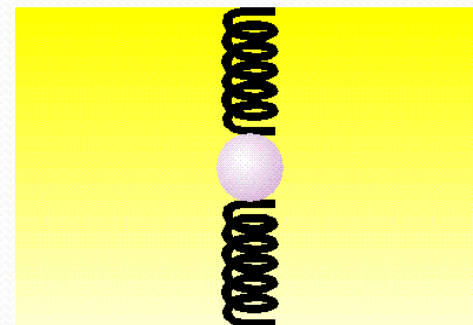
— À température égale, l'**air humide non saturé est plus léger que l'air sec** (la vapeur d'eau a une masse molaire inférieure à celle de l'air sec) → tendance à monter.

— À température égale, la particule contenant de l'eau liquide ou solide est plus lourde que la particule d'air sec ou d'air humide non saturé → tendance à redescendre.

**L'instabilité sera donc d'autant plus grande et sévère que l'air sera chaud et humide.**



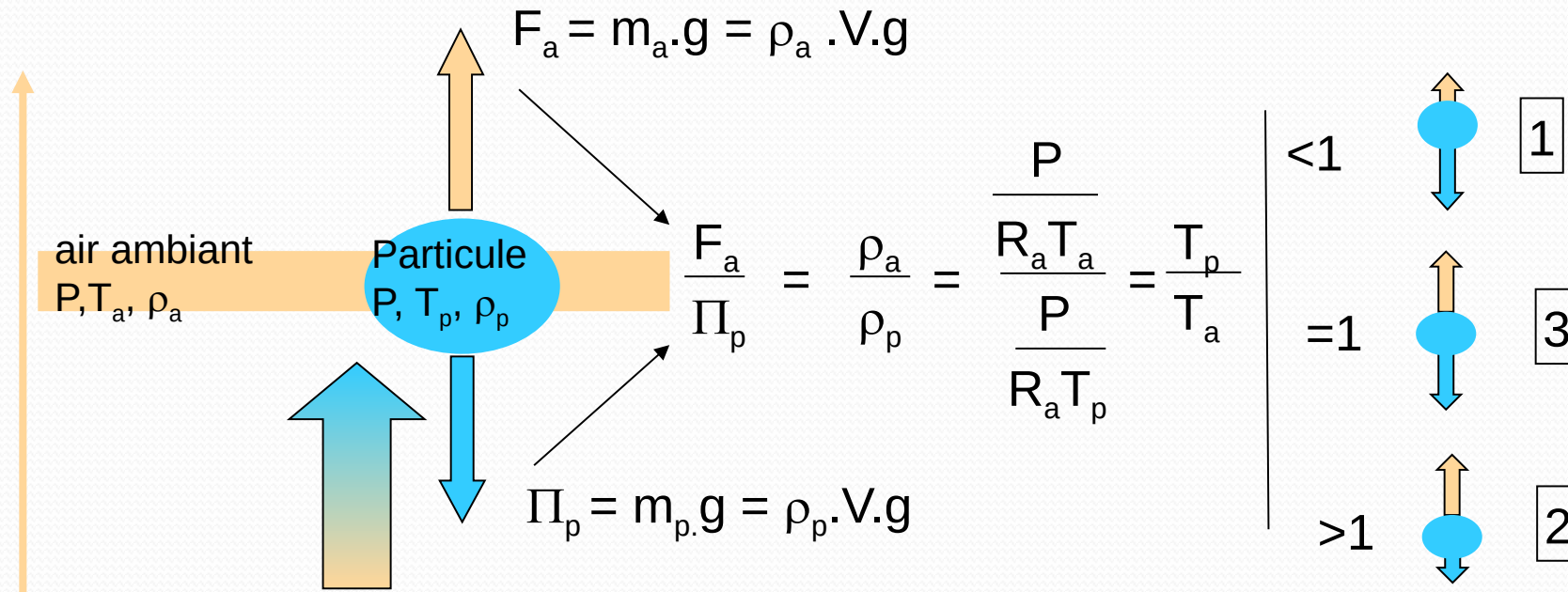
faible stabilité : mouvement vertical facilité



stabilité : mouvement vertical très difficile



# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – DÉFINITION ET PRINCIPES



air ambient  $P_0, T_0, \rho_0$

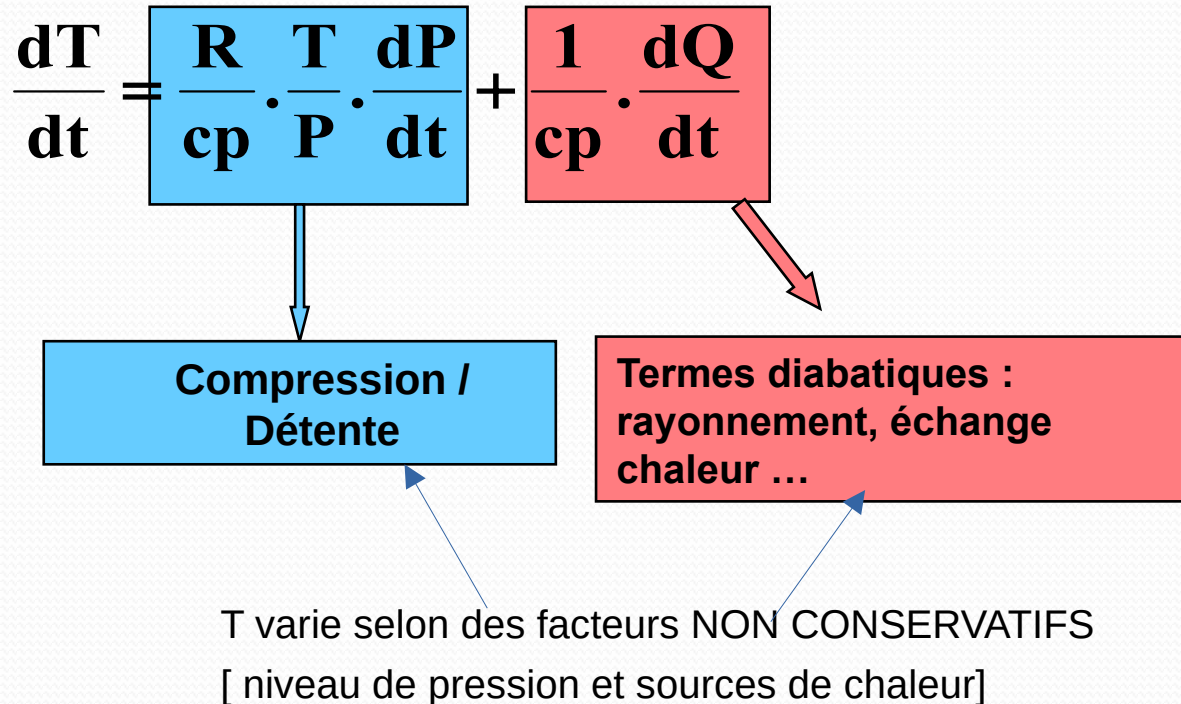
particule  $P_0, T_0, \rho_0$

- 1 revient à sa position initiale : stable, flottabilité négative
- 2 ne revient pas à sa position initiale : instable, flottabilité positive
- 3 reste à sa position : indifférent

# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – DÉFINITION ET PRINCIPES

Afin de connaître la densité d'une particule et par suite son mouvement, il nous faut être capable de prévoir sa température (humidité / état de saturation) quand elle se déplace verticalement, donc quelle(s) loi(s) régi(ssen)t son évolution

## EQUATION D'EVOLUTION DE LA TEMPERATURE



# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – DÉFINITION ET PRINCIPES

## LA TEMPERATURE POTENTIELLE : THETA $\theta$

C'est la température que prendrait une particule d'air sec amenée adiabatiquement (sans échange de chaleur) au niveau  $p=1000\text{hpa}$

Intérêts :

- C'est un paramètre conservatif lors des transformations adiabatiques : lors de mouvements verticaux, la température ne variera qu'en fonction de P puisque suivant l'hypothèse adiabatique les échanges de chaleur et le rayonnement n'interviennent pas dans l'évolution de la température
- C'est un des paramètres qui permettent de repérer et de suire certaines structures-clé de l'atmosphère.

→ une particule d'air sec va donc suivre les lignes d'iso- $\theta$  lors de ses mouvements verticaux et son gradient vertical vaut  $-1^\circ\text{C}/100\text{m}$  dans les basses couches de la troposphère (gradient adiabatique sec).

$$\frac{dT}{dt} = \frac{R}{c_p} \cdot \frac{T}{P} \cdot \frac{dP}{dt} + \frac{1}{c_p} \cdot \frac{dQ}{dt} \Rightarrow \theta = T \left[ \frac{1000}{P} \right]^{\frac{R}{c_p}} \quad \text{et} \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$$

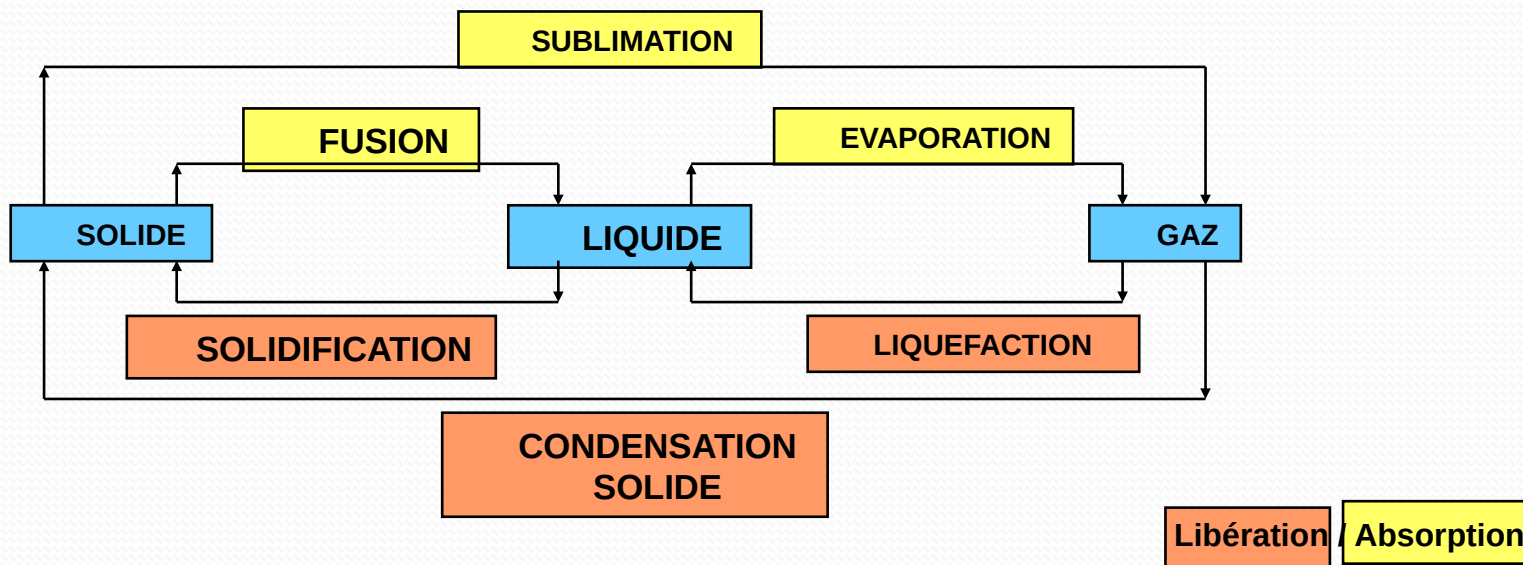
# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – DÉFINITION ET PRINCIPES

## LA TEMPERATURE PSEUDO-ADIABATIQUE POTENTIELLE

Mais on constate que cette hypothèse adiabatique pure et dure est mise à mal lorsque il y a changement de phase de l'eau, **changements d'état de l'eau qui libèrent ou absorbent de la chaleur** → influence sur la variation de T d'une particule saturée avec eau liquide suivant son mouvement vertical. D'où la nécessité de définir une autre température potentielle : la  $\theta_w$  (prononcer : theta prime w) pour les transformations pseudo-adiabatiques (celles avec eau liquide/solide dans la particule).

C'est la température que prendrait une particule d'air maintenue saturée et amenée au niveau  $p=1000\text{hpa}$ .

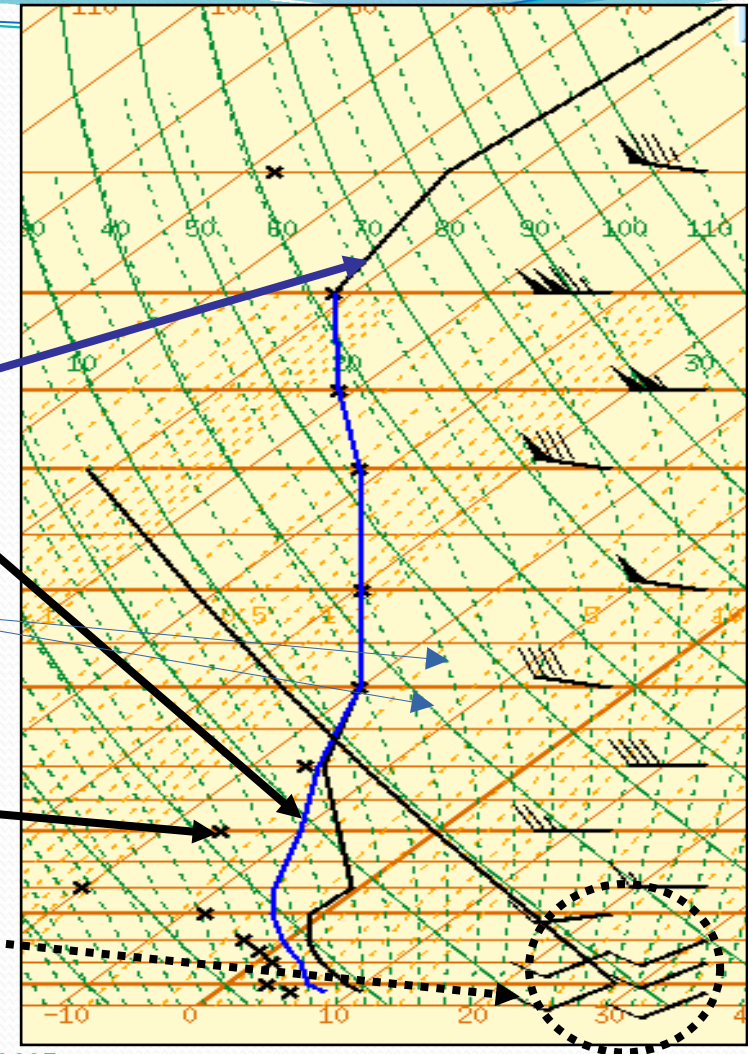
**Une particule saturée va donc suivre des lignes d'iso  $\theta_w$  lors de ses déplacements verticaux**  
**Son gradient vaut en moyenne  $-0,45^\circ\text{C}/100\text{m}$  dans l'atmosphère.**



# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – REPRESENTATION GRAPHIQUE : L'EMAGRAMME 761

En France, on utilise l'emagramme 761 pour représenter graphiquement le profil vertical de l'atmosphère (observé ou prévu). C'est un digramme pression/température classique mais avec les isothermes inclinés à 45°. On y trouve aussi des courbes thermodynamiques permettant de simuler le déplacement d'une particule d'air lors de mouvement verticaux. C'est la base pour l'étude de l'instabilité et de la convection. Il est composée de plusieurs éléments :

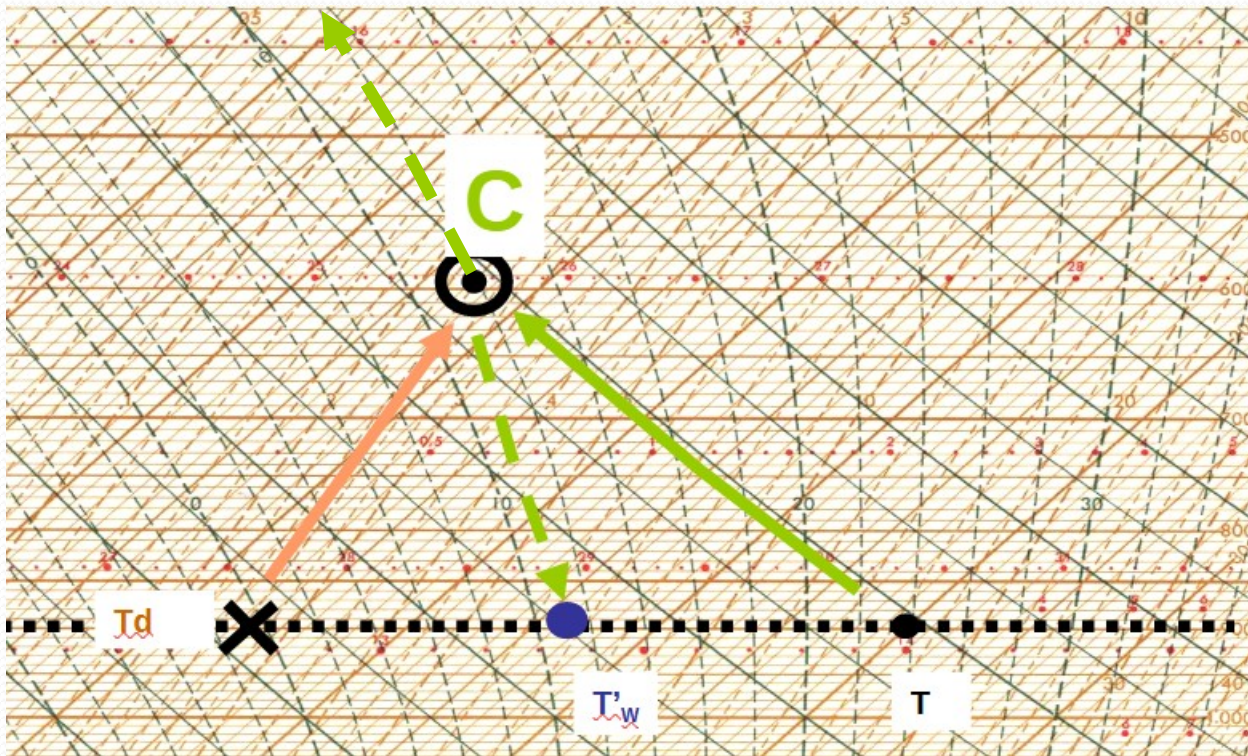
- Des courbes :
  - D'état en noir : variation sur la verticale de la température
  - bleue : variation de la température du thermomètre mouillée
- Courbes vertes :
  - Isoligne « adiabatique sèche » ou  $\text{iso-}\theta$  en vert
  - Isoligne « pseudo-adiabatique potentielle » ou  $\text{iso-}\theta'w$  en vert pointillé
- Les points de rosée
- Le vent aux niveaux standards





## Processus de condensation

C = point de condensation



Td = point de rosée

T<sub>w</sub> = température du thermomètre mouillé

T = température du thermomètre sec

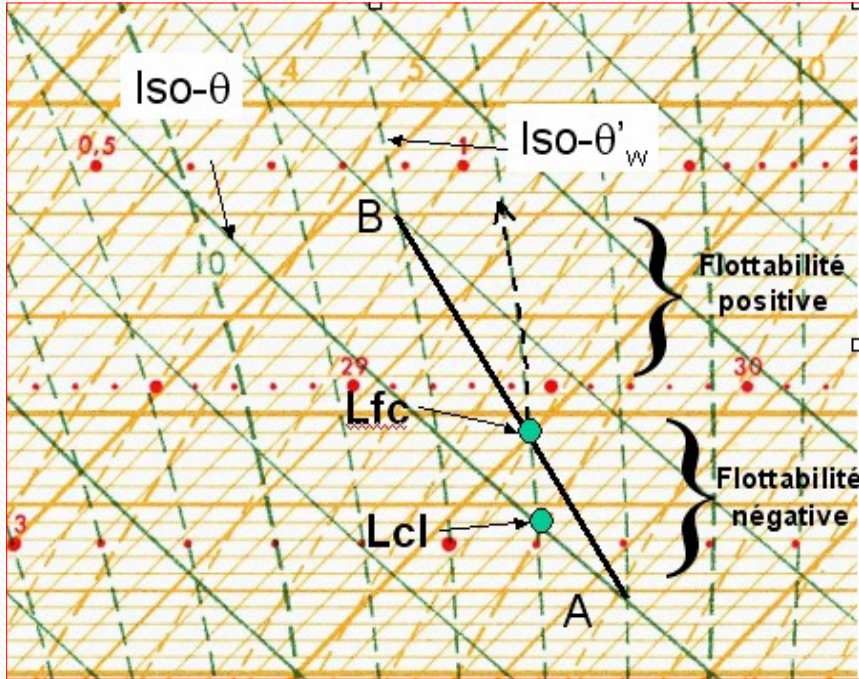
Aussi pour déterminer la densité, il faut savoir quelle courbe suivre afin de déterminer la température d'une particule ascendante ou descendante, il faut aussi voir si elle sature et où cela se produit.

1/ à partir d'un niveau donnée, suivre l'iso-theta jusqu'à rencontre la courbe des rapport de mélange « r » (contenu en eau donné par le pt de rosée) : au point de condensation « C » l'humidité relative sera de 100 %. Ensuite la particule continue de monter suivant les iso theta' w.

Si on descend du point de condensation vers le niveau de départ en suivant l'iso theta'w, on détermine la T'W qui sert à construire la courbe bleue des profils verticaux dite du « thermomètre mouillé ».

La particule va continuer de monter tant qu'elle sera plus chaude que son environnement donc jusqu'à ce qu'elle rencontre la courbe d'état, endroit qui marquera le sommet de la convection





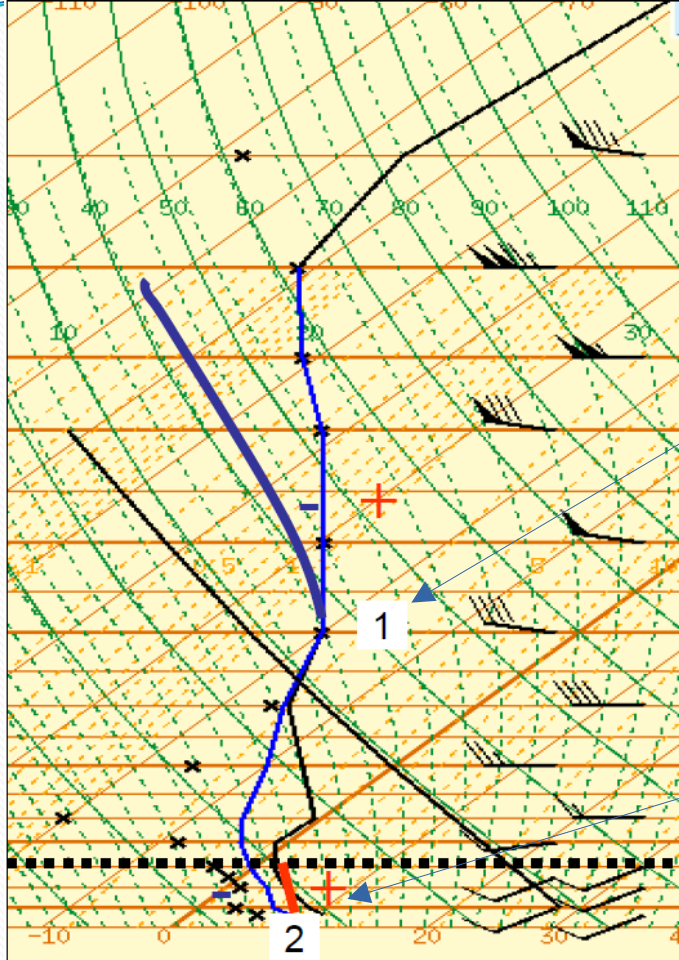
Quand particule soulevée atteint son point de condensation (Niveau de condensation « C » ou « Condensation Level », Lcl), la condensation libère de la chaleur.

Même si elle s'alourdit (apparition d'eau liquide), l'effet de libération de chaleur latente l'emporte, et la particule se refroidit moins vite que lorsqu'elle n'est pas saturée.

Elle peut finir par se retrouver plus chaude que l'environnement (Niveau de convection libre ou « Level of Free Convection » Lfc) : l'instabilité peut alors se déclencher et la particule va pouvoir atteindre spontanément des niveaux très élevés : c'est la formation du cumulus, du strato-cumulus ou, dans bien des cas, du cumulonimbus.

La couche de l'atmosphère sur laquelle la flottabilité est positive est appelée tranche convective, tranche dans laquelle les mouvements verticaux sont possibles avec ou sans saturation et donc avec ou sans nuages associés.

# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – INSTABILITÉ SUR UN EMAGRAMME 761

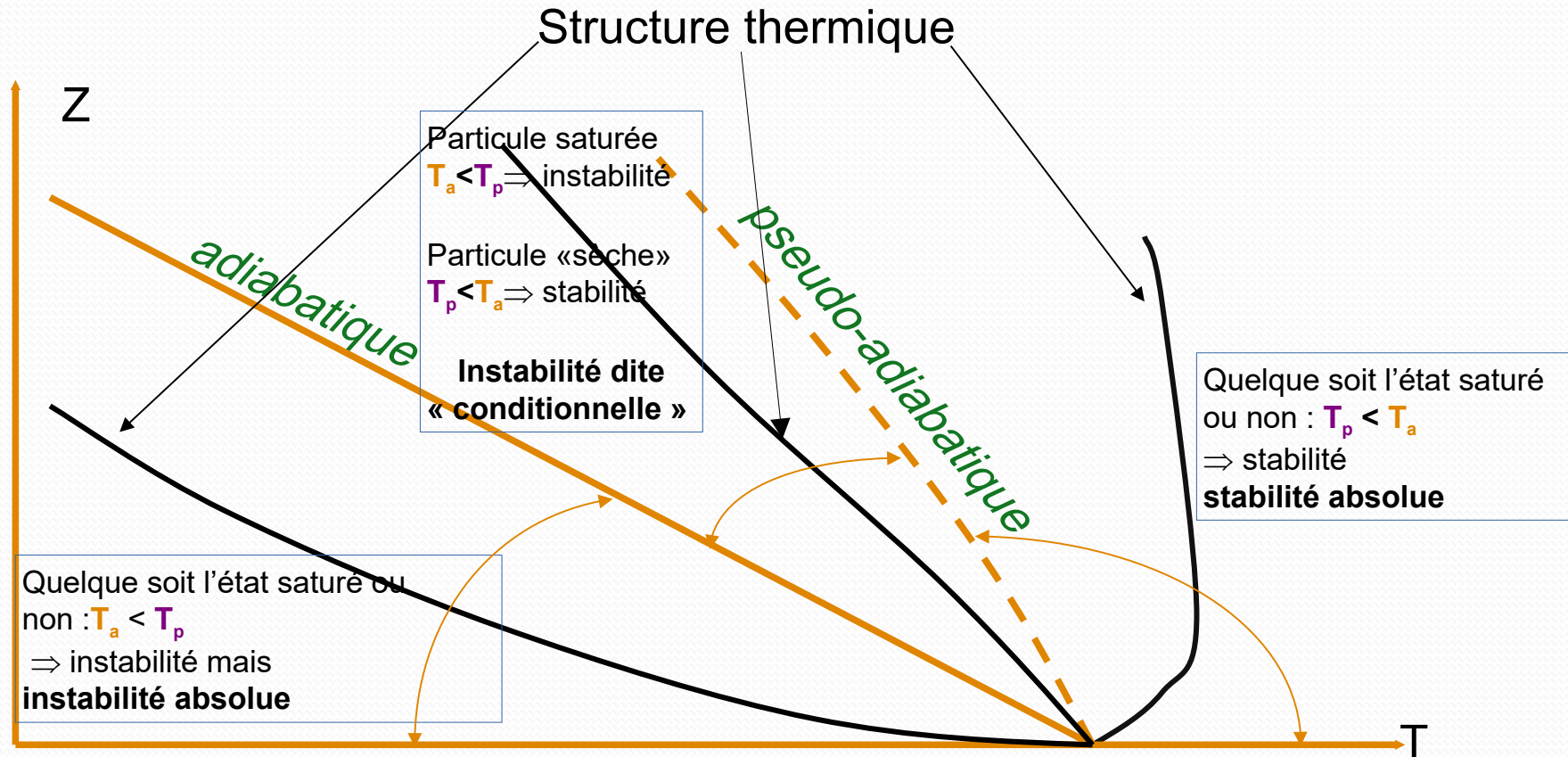


En 1, la particule, plus **froide** que l'air ambiant, **descend** = **stable**

En 2, la particule issue du sol, plus **chaude** que l'environnement, continue à **monter** = **instable**

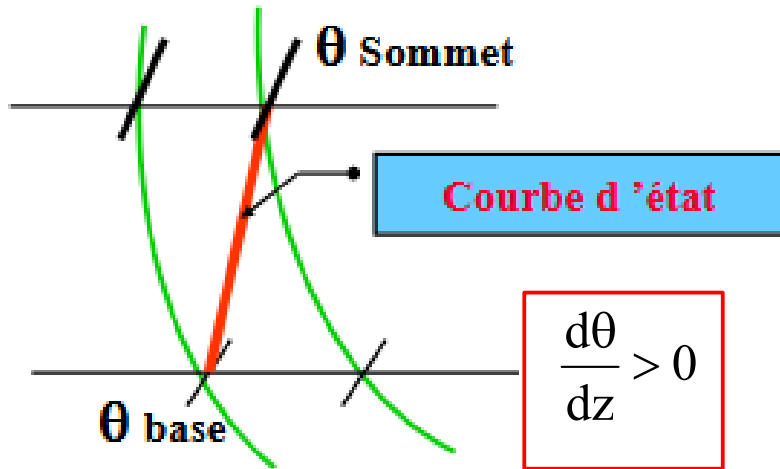
# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – INSTABILITÉ SUR UN EMAGRAMME 761

## Stabilité et instabilité verticale, en résumé :

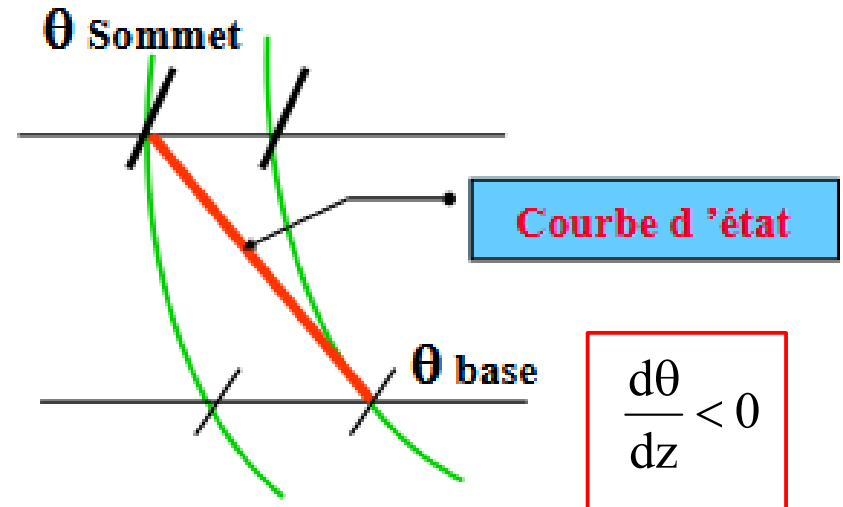


Stabilité et instabilité verticale avec les température potentielles :

**$\theta_{\text{Sommet}} > \theta_{\text{base}}$  : STABILITE**

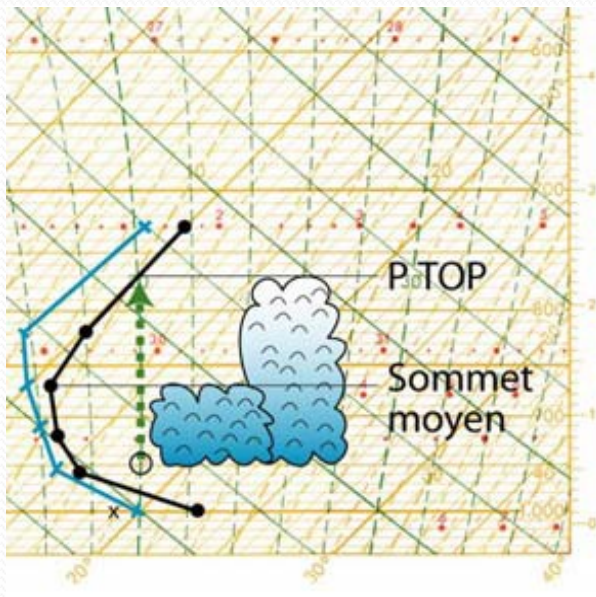


**$\theta_{\text{Sommet}} < \theta_{\text{base}}$  : INSTABILITE**

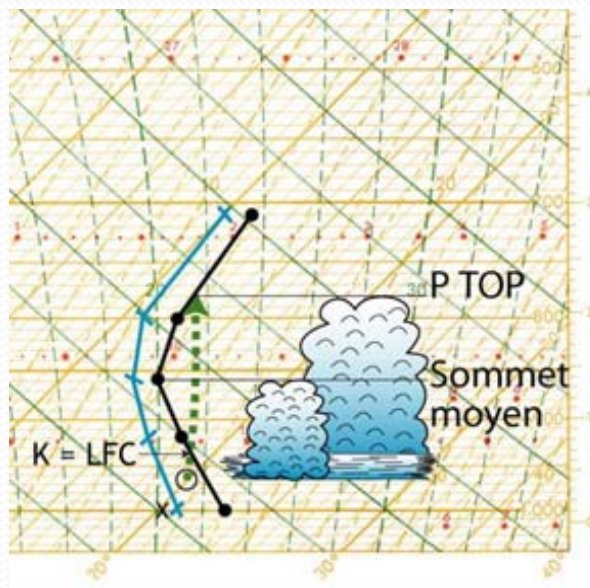




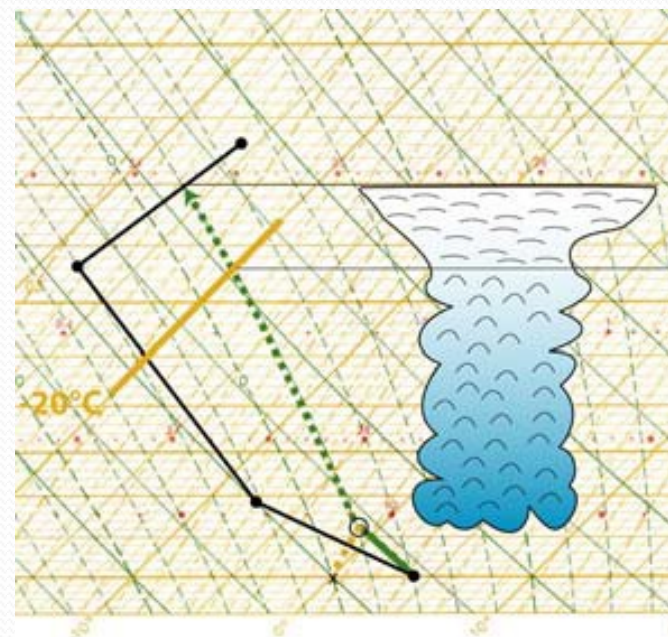
# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – EMAGRAMME 761, FORMATION DES NUAGES



Instabilité absolu IA  
→ formation de  
cumulus, CB



Instabilité sélective  
→ formation probable de  
Strato-cumulus puis de  
cumulus

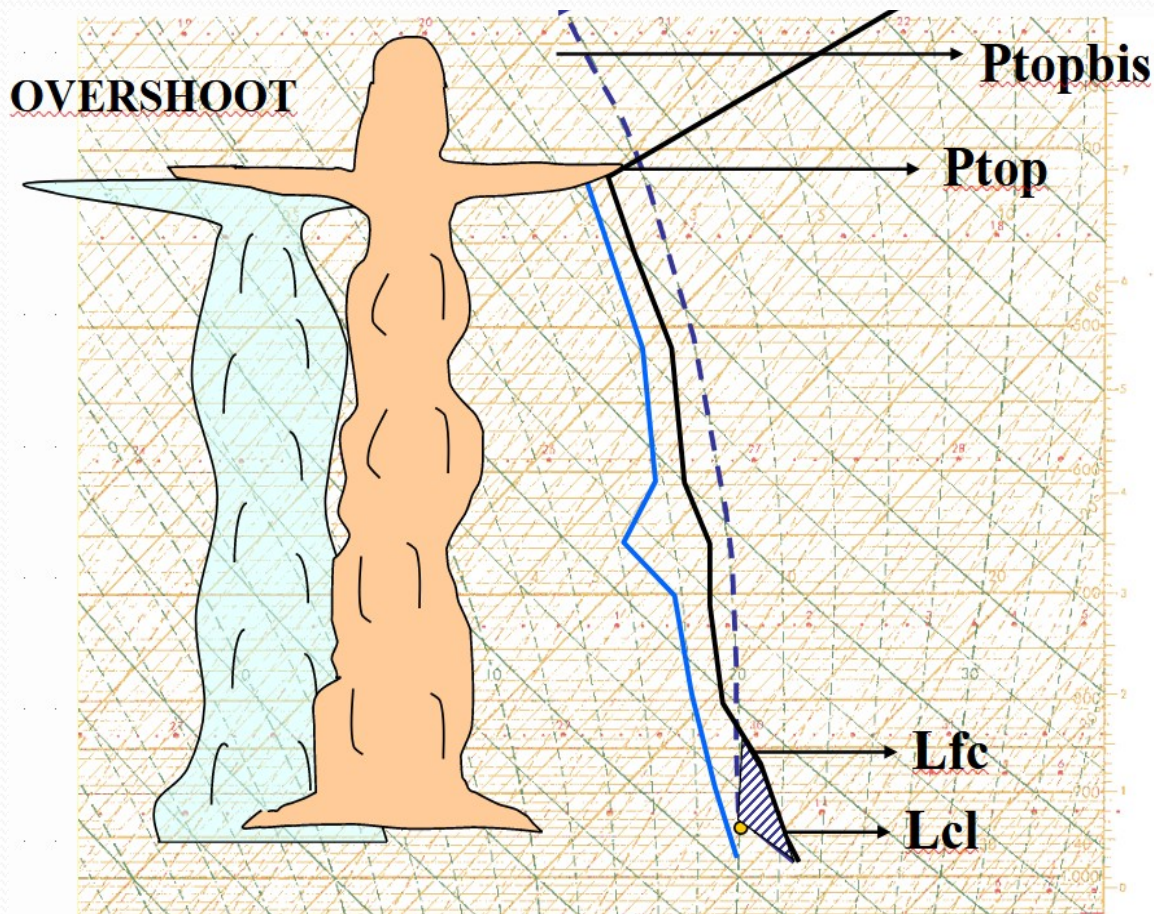


L'enclume d'un cumulonimbus se formera  
quand la particule soulevée atteindra une  
température interne de  $-20^{\circ}\text{C}$  /  $-25^{\circ}\text{C}$ .  
A cette température, les cristaux de glace  
sont majoritaires.



# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – EMAGRAMME 761

## Application aux nuages convectifs



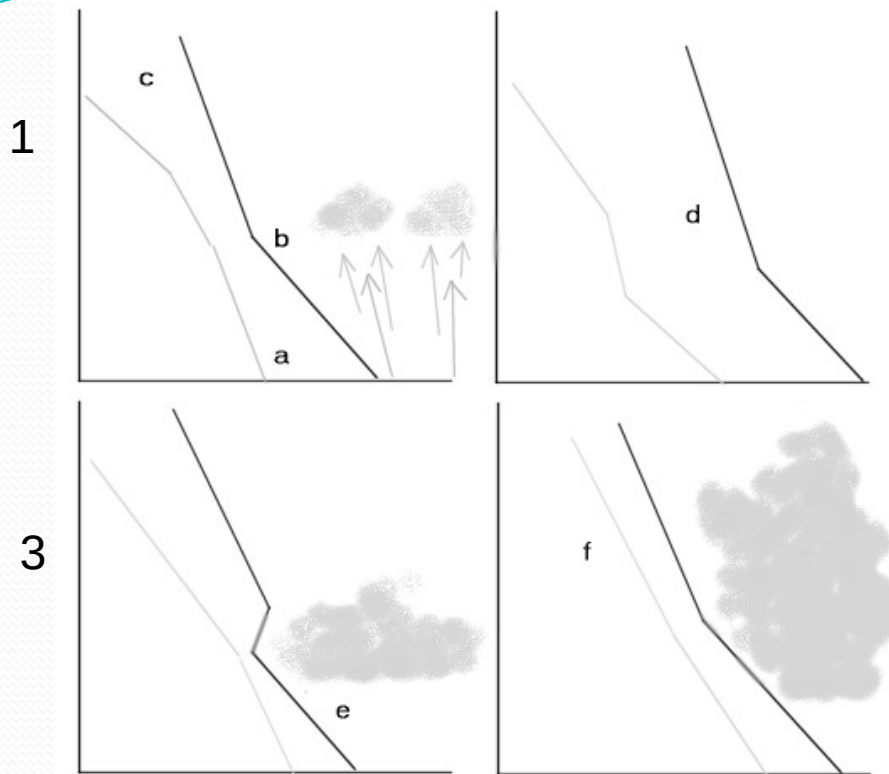
Les nuages convectifs, les cumulus, strato-cumulus et Cumulo-Nimbus sont les résultats des processus de refroidissement et de saturation liés aux mouvements verticaux issus de l'instabilité de la masse d'air (la convection)

Leur apparition dépend de deux facteurs essentiels :

- l'humidité de l'air de basses couches. Avec la température, l'humidité est l'autre carburant de la convection. Plus l'air est humide, plus bas est le point de condensation donc plus de chance d'être à droite des iso thea't'w et donc de pouvoir monter librement.

- l'épaisseur de la tranche convective. Si cette tranche monte jusqu'à la tropopause on aura des TCU ou CB et donc potentiellement des phénomènes dangereux (**convection profonde**) , sinon des Cu humilis à médiocris (**convection peu profonde**).

# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – EMAGRAMME 761



En noir : courbe d'état  
En gris : courbe bleue des T'w

Sur le graphique 1, on a de l'air peu humide au sol (a), moyennement humide en moyenne altitude (b) et sec en haute altitude (c). C'est le cas de figure idéal. On pourra rencontrer les quelques jolis cumulus humilis/médiocris guidant le vol, sans surdéveloppement. **Situation très prisée des planeurs et parapentistes car le cumulus matérialise l'ascendance.**

Sur le graphique 2,, l'air est sec à toute altitude. Il y a peu de chance de rencontrer des cumulus, surtout si le gradient de température en moyenne altitude n'est pas très fort. On parle alors de **thermique bleu**.

En 3, l'atmosphère est plutôt humide en basse et moyenne altitude. On risque fort de rencontrer des stratocumulus nombreux à surdéveloppement horizontal, surtout s'il y a une inversion de température.

En 4, l'atmosphère est humide à toute altitude. On peut s'attendre à des surdéveloppements horizontaux et aussi verticaux, donc à des orages, surtout si le gradient de température est fort et qu'il n'y a pas d'inversion.

# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR

Aux latitudes moyennes, l'atmosphère est stable à l'échelle synoptique.

**MAIS** des zones d'instabilité, généralement d'échelle aérologique voire de méso-échelle peuvent apparaître. Il faut pour cela avoir de l'**air relativement chaud et humide en basses couches**, et de l'**air plus froid et plutôt sec en altitude**. Cela est possible grâce à trois facteurs principaux :

- par **chauffage et apport d'humidité en surface** : principalement l'été sur les surfaces continentales (pourvu que le sol soit suffisamment humide), et plutôt en automne/hiver au dessus des océans (la mer est plus chaude que l'air) ;
- par **ascendances forcées de la masse d'air**, que ce soit au niveau synoptique ou de méso-échelle. Ces ascendances peuvent être forcées par l'environnement synoptique de grande échelle ou par le relief, et ont tendance à augmenter l'instabilité de la masse d'air. De faible intensité et d'échelle horizontale étendue (qqes cm/s), elles ne doivent pas être confondues avec les ascendances qui apparaissent lorsque la convection est déclenchée, ces dernières étant d'intensité beaucoup plus forte (qqes m/s) ;
- par **advection d'air froid en altitude** (au dessus de 600 hPa typiquement), ce dernier phénomène étant souvent associé aux ascendances synoptiques décrites au point précédent.

Lorsque l'atmosphère est instabilisée, un « forçage » extérieur va être nécessaire pour rompre l'équilibre. Ce forçage va initier des mouvements verticaux ascendants qui vont se trouver amplifiés par l'instabilité de l'atmosphère :

- Convergence en basses couches : convergence de brises (de pente, de mer), déviation/canalisation par un relief, convergence liée aux courants de densité de cellules orageuses pré-existantes,
- Soulèvement frontal : au niveau d'un front froid, les ascendances de la bande étroite sont d'intensité suffisante pour rompre l'équilibre.
- Soulèvement par propagation d'ondes de gravité en aval d'un relief, d'un front.



# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – ORIGINE DES MASSES D'AIR SUR L'EUROPE

**Pm : air froid et humide**  
**Instable dans sa progression**  
**vers le Sud.**

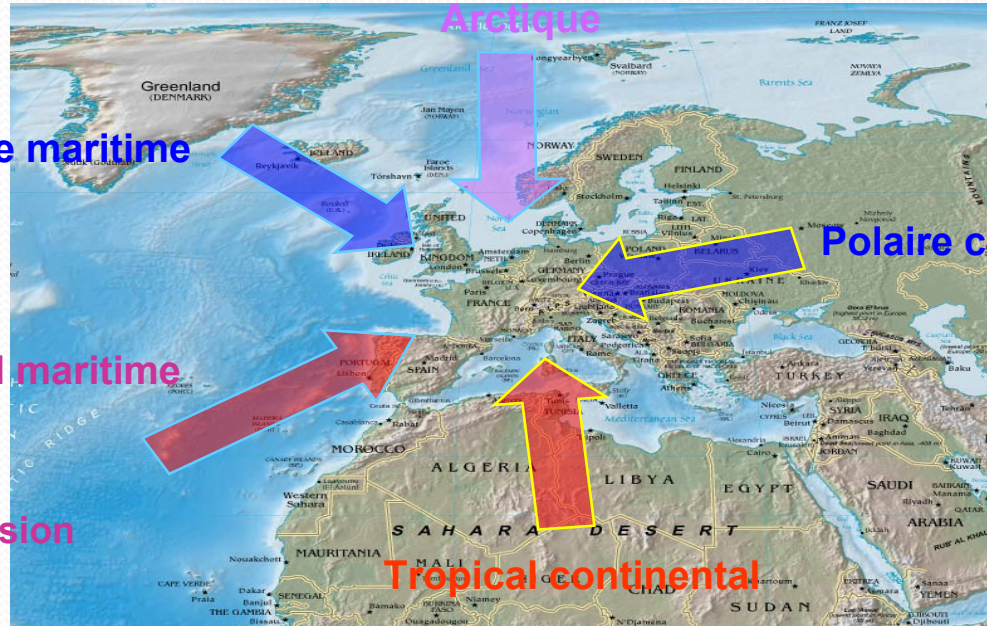
**Traîne, Cu, Sc Cb, SH** **Polaire maritime**

**Tropical maritime**

**Tm : air chaud et humide**  
**Se stabilisant dans sa progression**  
**vers le Nord. St, Sc DZ, -RA.**  
**Visibilité réduite. Brouillard**  
**d'advection en hiver et au**  
**printemps.**

**En été, activité convective renforcée sur les**  
**continents.**

**Nuages et précipitations sous l'effet d'une**  
**ascendance "frontale"**



**A : air très froid**

**En hiver, devenant instable en**  
**progressant au-dessus des**  
**mers en donnant SN et**  
**blizzards.**

**Très basses températures**

**Polaire continental**

**Pc : air froid**

**En hiver, air très sec sans**  
**nuage**

**pouvant s'humidifier en mer**  
**et devenir instable (Cu , SH).**

**Tc : air chaud et sec**

**En été, stable sans nuage.**

**Humidification sur la mer (BR, St, Sc).**

**Transport de sable possible.**

## INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – ORIGINE DES MASSES D'AIR

En arrivant à déterminer l'origine des masses d'air qui arrive sur notre pays et en fonction de la saison, on peut arriver à prévoir si de la convection peut apparaître, son intensité, le type de nuages avec base et sommet et enfin les phénomènes significatifs associés (averses, orages, rafales, tornades,...).

On distingue deux grandes origines de convection :

- la convection en **air froid**. Elle correspond aux masses d'air d'origine polaire qui ont subi un réchauffement à leur base en circulant au-dessus des océans.
- la convection en **air chaud**. Elle est liée à une masse d'air tropicale qui arrive sur notre pays en été.

Ce qui donne 4 types de convections : convection profonde en air chaud, convection peu profonde en air chaud, convection peu profonde en air frais, convection peu profonde en air chaud (nettement plus rare car l'air chaud anticyclonique est trop sec et subsident)

A cela il faut aussi regarder si la situation est dépressionnaire ou anticyclonique, si l'atmosphère est sèche ou humide,...

Il faut donc commencer toujours par une analyse de la situation générale en surface (carte des fronts) et en altitude (T et géopotentiel à 500 et 850 hPa dans le module prévision), puis affiner avec les paramètres du modèle à même de nous renseigner sur la convection.



## INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – ORIGINE DES MASSES D'AIR SUR L'EUROPE

## CONVECTION EN AIR FROID

Sur cet exemple on voit comment une masse d'air polaire (très froide à sa base) se réchauffe au fur et à mesure de son déplacement.

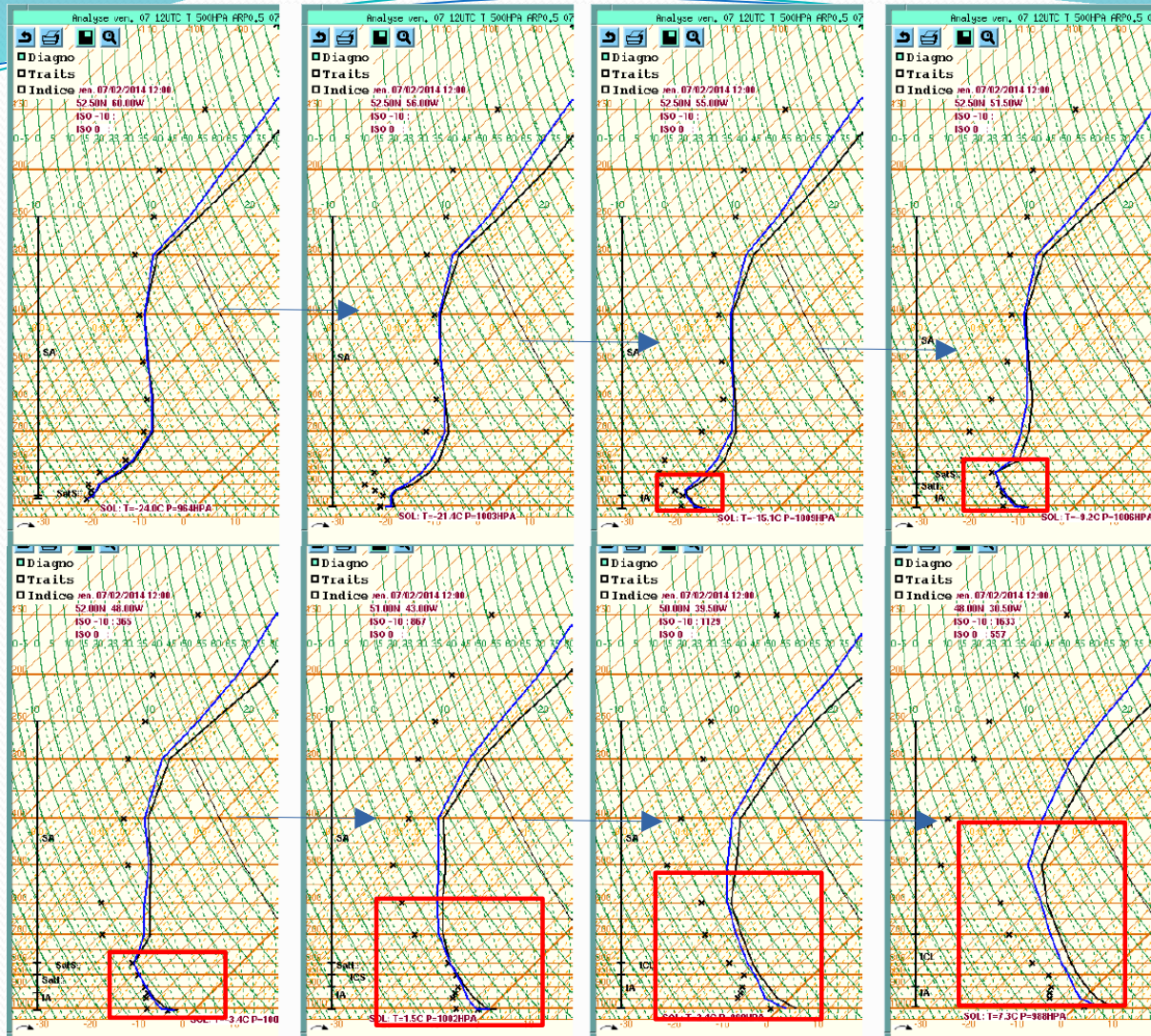
On voit que la tranche convective dans laquelle se forment les cumulus devient de plus en plus épaisse

## Où trouve-t-on ces masses d'air

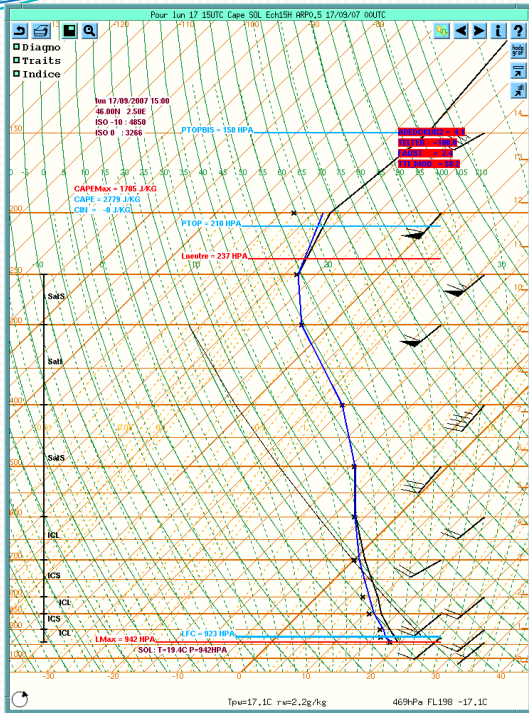
- A l'arrière des perturbations, dans l'air froid des traînes actives en toute saison, sauf en été (plus au nord)

- Dans les zones de basse T à 500 hPa (élément à repérer lors de l'analyse de la situation générale) ;

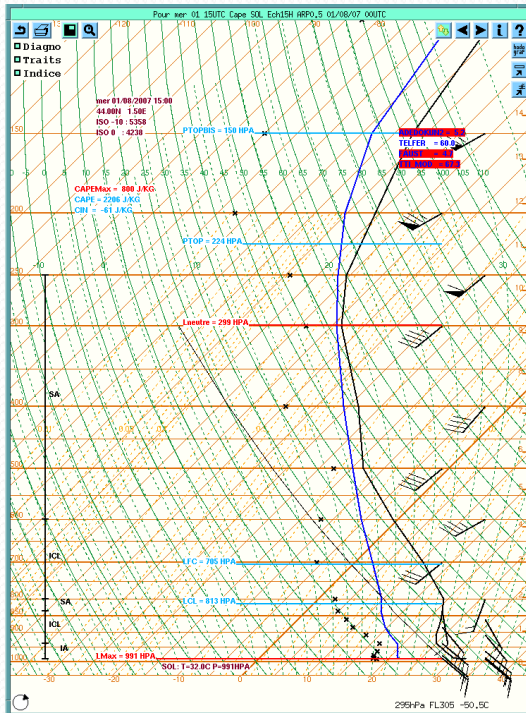
- En mer / océan lors de vagues de froid (réchauffement par la base)



## INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – ORIGINE DES MASSES D'AIR SUR L'EUROPE



Version humide : on voit que les deux courbes sont très rapprochées, signe de forte humidité. De plus le profil vertical des très basses couches laisse à penser à des bases assez basses.



Version sèche : courbes écartées.  
Basses couches très sèches, il  
faudra donc un très puissant  
forçage pour amener cette masse  
d'air à saturation. Bases de  
nuages assez hautes.

## CONVECTION EN AIR CHAUD

Masses d'air dans lesquelles on retrouve à la fois des caractéristiques thermiques et dynamique :

- Thermique car il y a un maximum d'air chaud en basses couches

- Dynamique :

- Air chaud souvent advecté par la circulation synoptique (masse d'air tropicale avec flux de sud sur la France) à l'avant d'un front froid
- Les ascendances synoptiques rendront la masse d'air plus humide ;

## Masse d'air typique des orages estivaux et des situations fortement précipitantes en Méditerranée



# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – CONVECTION PROFONDE ET PEU PROFONDE

La convection peut intéresser la totalité de l'épaisseur de la troposphère, elle est alors qualifiée de **profonde**. C'est le domaine de l'orage avec CB et TCU développés associés à des phénomènes très dangereux pour l'aviation tant générale que commerciale. Elle peut se déclencher à toute heure, car pilotée par de nombreux phénomènes dynamiques, mais le plus important reste le réchauffement diurne, les systèmes créés pouvant alors persister la nuit.

La convection peut également n'intéresser qu'une tranche de la troposphère, elle est dans ce cas qualifiée de **peu profonde** avec des petits cumulus (dits de « beau temps ») ou alors des thermiques purs. Peu de dangers objectifs pour l'aviation générale, juste un « peu » de turbulence sous les cumulus. C'est une convection diurne, qui s'arrête la nuit par inversion de la température près du sol

Cette convection peu profonde s'inscrit le plus souvent dans la **couche limite** et ne dépasse que rarement les 2000 à 3000m d'épaisseur. Elle est souvent recherchée par les vélivoles en plaine et les parapentistes.



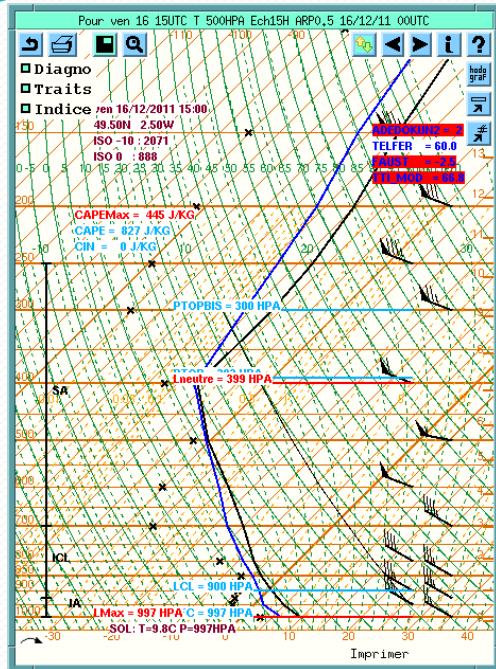
Orage supercellulaire, convection profonde



Cumulus humilis, convection peu profonde

# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – CONVECTION PROFONDE ET PEU PROFONDE

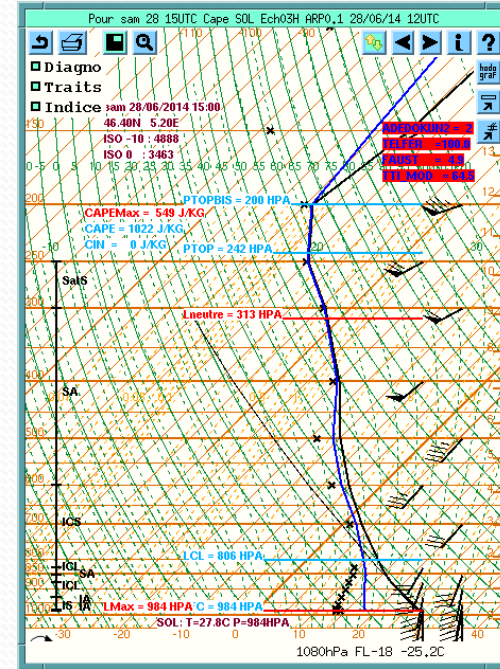
## Différence entre convection profonde en air froid et en air chaud



convection  
en air froid

convection  
en air chaud

Attention, quand on dit air chaud ou  
air froid, c'est un relatif à  
l'environnement !

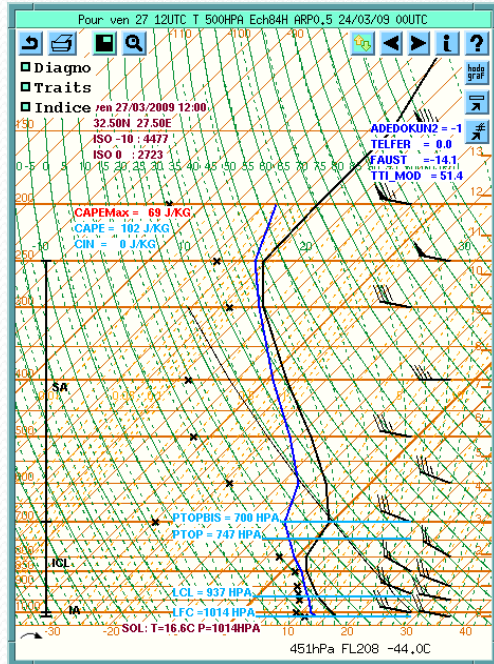


- Air plus froid
- Tropopause plus basse
- Flux à tendance nord/nord-ouest
- Souvent plus humide
- Situé dans des zones froide à T500 hPa (refroidissement en altitude) → **traîne active l'hiver et printemps**

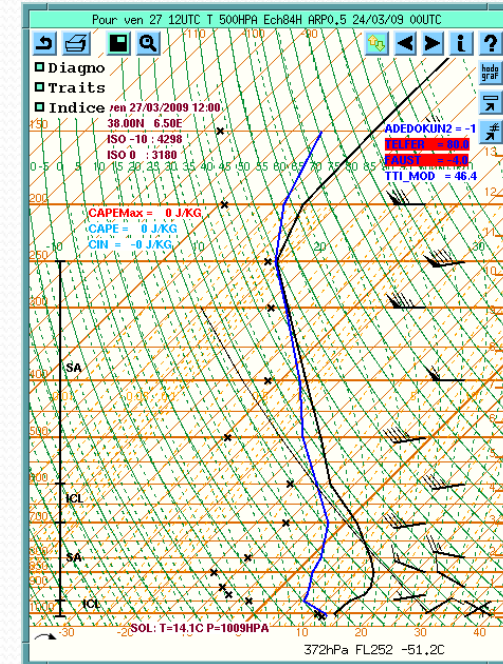
- Air chaud
- Tropopause plus haute
- Flux à tendance sud et souvent plus sec dans les basses couches
- Situé dans des zones de maximum relatif en  $\theta'w$  850 hPa (réchauffement à la base) → **marais barométrique l'été**

# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – CONVECTION PROFONDE ET PEU PROFONDE

## Différence entre convection peu profonde en air froid et masse d'air subsidente



convection  
en air froid peu  
profonde



masse d'air  
subsidente

- Air plus froid/frais
  - Plus humide en basses couches
  - Inversion possible mais moins basse ou - marquée (petite couche convective dans la couche limite)
- Typique en été à l'arrière de fronts froids avec tendance anticyclonique

- Air plus doux
- Moins humide en basses couches
- Subsidence (= inversion) plus Marquée,
- Champs plus élevés à tous les niveaux, **typiques des anticyclones l'été.**



## La convection profonde se trouve :

- **dans l'air froid dynamique des traînes actives.** Le profil vertical est instable (cycle diurne sur terre) et le contexte dépressionnaire favorise les vitesses verticales de grande échelle qui vont favoriser la convection. CB pouvant être accompagnés de fortes rafales, neige et grésil en hiver/printemps (temps à giboulées).
- **dans l'air chaud en été avec un contexte de marais barométrique ou dépressionnaire.** Sur les terres surchauffées en été, les basses couches acquièrent rapidement un gradient sur-adiabatique qui déclenche de la convection. Cette convection peut être favorisée par des convergence de vents en basses couches, par un contexte dépressionnaire, notamment avec l'arrivée d'un front froid. Si l'humidité est suffisante, alors il se forment des CB de grande ampleur, CB qui peuvent ensuite s'organiser en MCS si le dynamisme d'altitude est favorable. Rafales et grêle (voire tornade) accompagnent ces orages.
- **dans des perturbations** dont le dynamisme de l'air froid va venir soulever l'air chaud au niveau du front froid et former des CB noyés dans la masse (CB EMBD).

## La convection peu profonde se trouve :

- **dans de l'air froid/frais mais avec un contexte anticyclonique.** Typiquement en été à l'arrière d'un front froid. La subsidence typique des anticyclones entraîne des mouvements verticaux vers le bas ce qui assèche une partie de l'atmosphère empêchant ainsi le développement de la convection. Si convection il y a, elle reste limitée à la couche limite sous l'inversion de subsidence. Les nuages formés sont de petits cumulus ou strato-cumulus donnant rarement des averses.  
En hiver cette petite convection peut se retrouver immédiatement à l'arrière du front froid avant l'arrivée de l'air froid dynamique
- **en été dans de l'air chaud quand l'anticyclone commence à se décaler → le flux passe au sud et se réchauffe.** La subsidence s'affaiblit un peu et quelques cumulus peuvent se développer ; situation favorable aux thermiques purs parfois assez développés idéales pour les vélivoles et parapentistes.  
La convergence de pente favorise cette convection en montagne.

# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – CONVECTION PROFONDE, CB ET DANGERS

Le Cumulo-Nimbus ou CB, est le nuage d'orage. Il s'étend sur toute la troposphère et génère nombre de dangers qu'un pilote doit anticiper et se prémunir.

- 1/ l'**orage**. La foudre est une décharge électrique entre le sol et le nuage ou entre nuages. Si les avions de lignes en métal font « cage de Faraday », il en est tout autrement pour les avions légers.

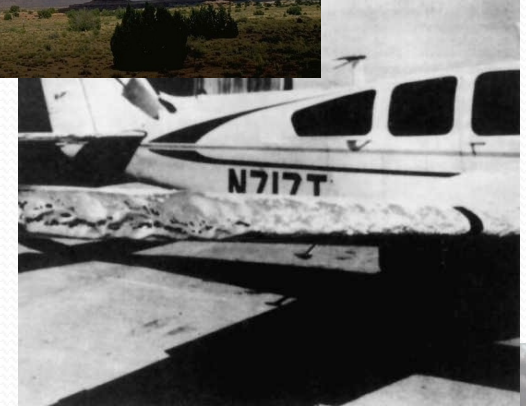
- 2/ **fortes pluies/ grêle / grésil / neige**. Un Cb est une véritable machine à fabriquer des grêlons grâce aux fortes vitesses ascendantes en son sein (10 à 20m/s, parfois 30!). Il donne aussi de très fortes intensité de pluie voire de la neige en hiver. Sur un radar météo, les CB/TCU ont une signature très distincte avec des intensité très fortes.

- 3/ **rafales**. Plus connu sous le nom de « grain » c'est un phénomène courant sous un CB. C'est le résultat de l'étalement au sol de l'air froid du CB (le courant de densité) qui se produit avec les précipitations (responsable des arcs).

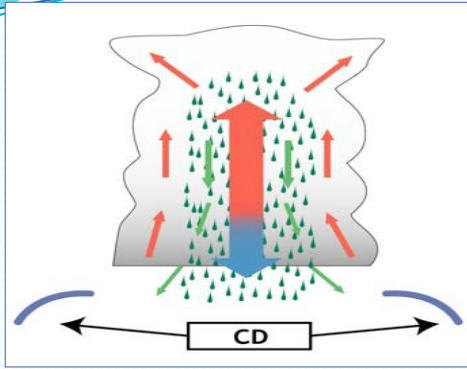
- 4/ **tornades**. Phénomène tourbillonnaire de petite échelle, c'est le phénomène le plus dévastateur lié à un CB. Dangers pour avions au sol (car a priori on ne vole pas dans ces conditions). Rares sous nos latitudes mais cela pourrait changer avec le changement de climat.

5/ **turbulence**. Les CB génèrent du cisaillement de vent qui donne de la turbulence locale sévère. De même la turbulence de sillage peut être périlleuse pour un avion VFR

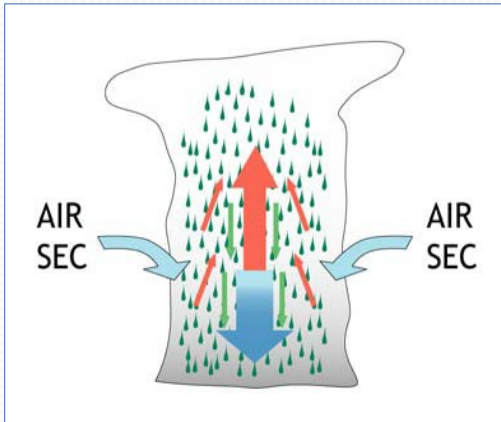
**Donc ne jamais essayer de traverser sous un CB ou TCU, votre vie peut en dépendre. Contourner à plus de 10/15 NM et éviter le sillage. Si passage bloqué, faire demi-tour ou atterrir d'urgence.**



# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – CONVECTION PROFONDE, CB ET COURANT DE DENSITÉ



courant de densité – cellule en phase de dissipation (en l'absence d'autres éléments)

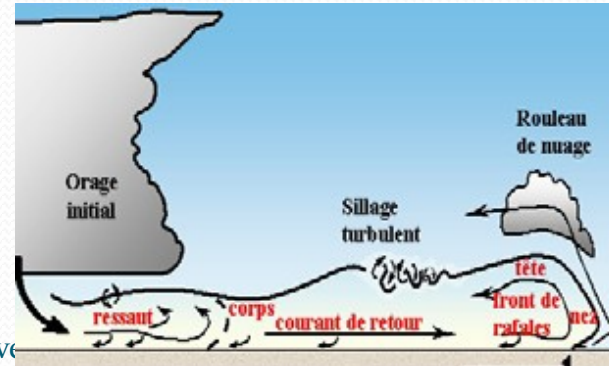


création et alimentation du courant de densité par la subsidence qui entraîne l'air sec présent

Un orage se forme grâce à des courants ascendants. Mais au terme de sa croissance des courants subsidents (vers le bas) se forment dans le CB en lien avec les précipitations. Celles-ci entraînent avec elles l'air froid des parties hautes du Cb vers le bas. Arrivé près du sol, cet air froid s'étale et se répand tout autour du CB. Cela crée des rafales et de la turbulence parfois assez loin du CB lui-même

Ses manifestations sont :

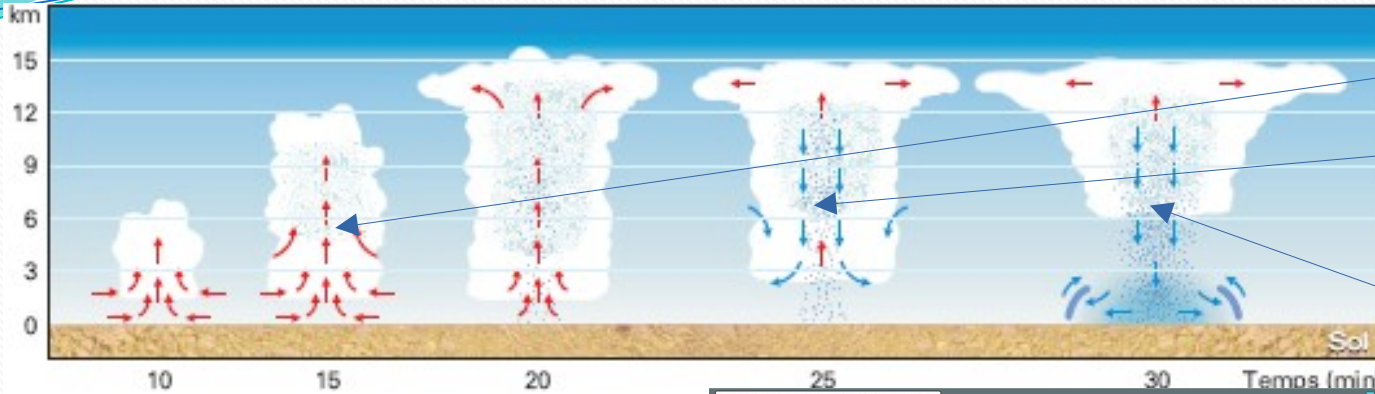
- rotation et intensification du vent, les rafales peuvent atteindre 25 m.s-1 (plus de 40 m.s-1 pour les plus intenses faisant penser à des tornades) ;
- baisse de température de 2 à 10 degrés, voire 15 degrés, suivant les cas (averse de pluie se transformant en neige sur la fin à cause de ce refroidissement) ;
- hausse de pression de 1 à 2 hPa en général, mais des maximums de 10 hPa ont été observés ;
- précipitations intenses, pouvant dépasser 100 millimètres par heure, parfois accompagnées de grêle





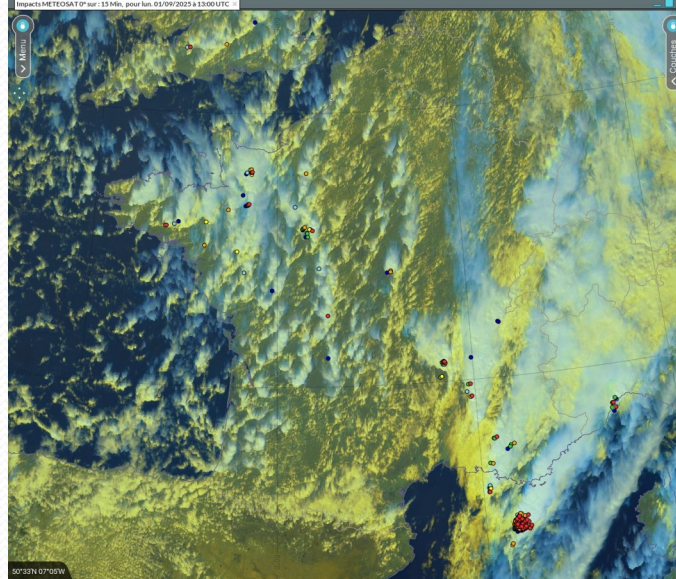
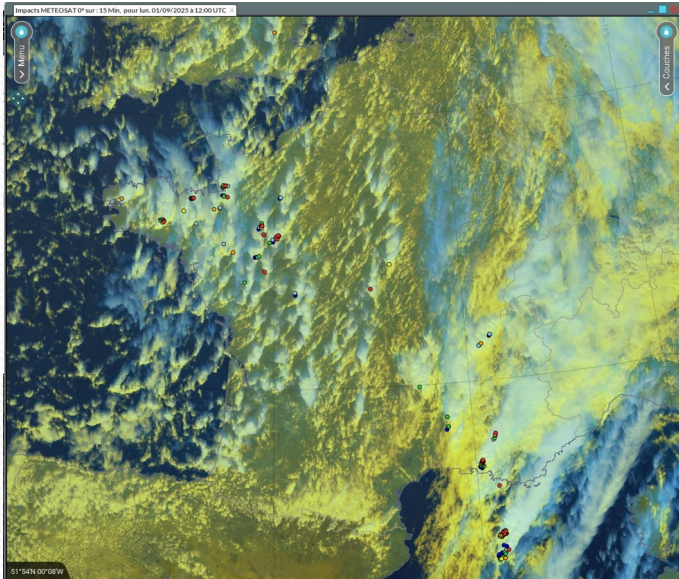
# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – DIFFÉRENTS TYPE D'ORAGE

## Orage mono-cellulaire



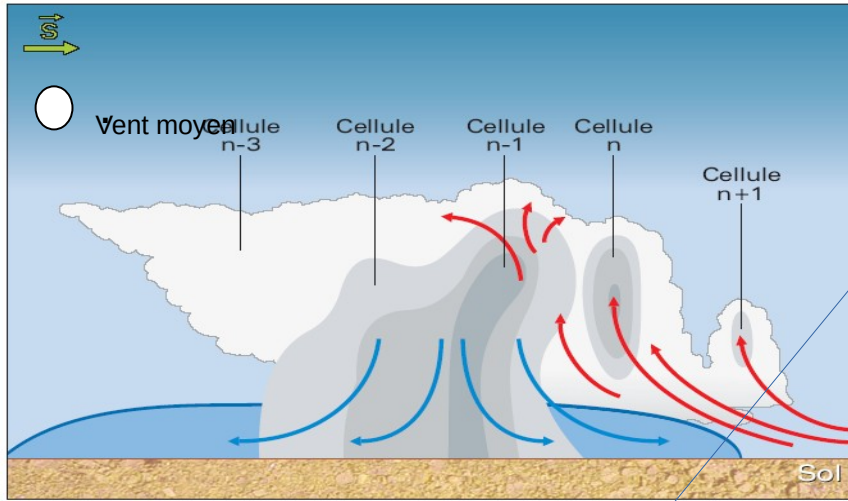
- Ascendance (phase de développement)
- Grossissement des particules d'eau liquide et solide + évaporation → subsidence (phase de maturité)
- Précipitations, courant de densité → front de rafale (phase de dissipation)

Ces orages sont souvent de taille modeste, en général facilement contournables (sauf s'ils sont trop nombreux, comme dans une traîne).





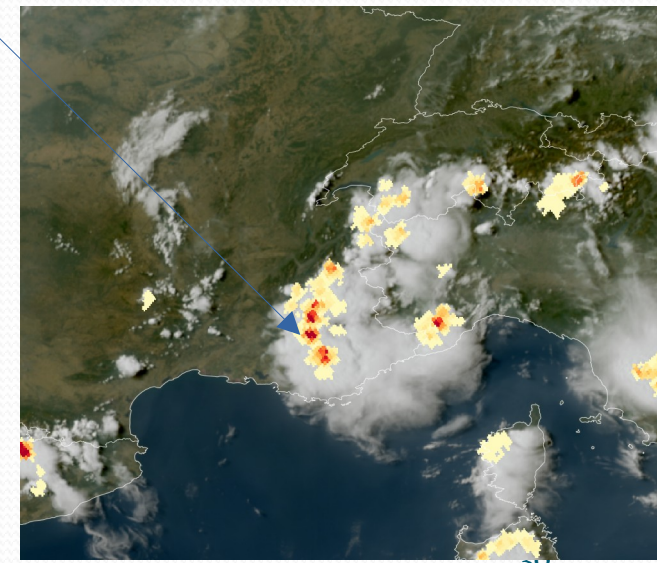
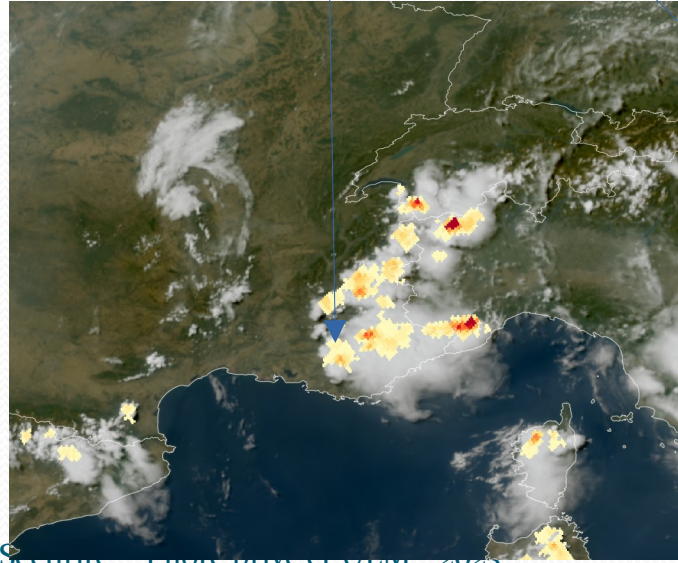
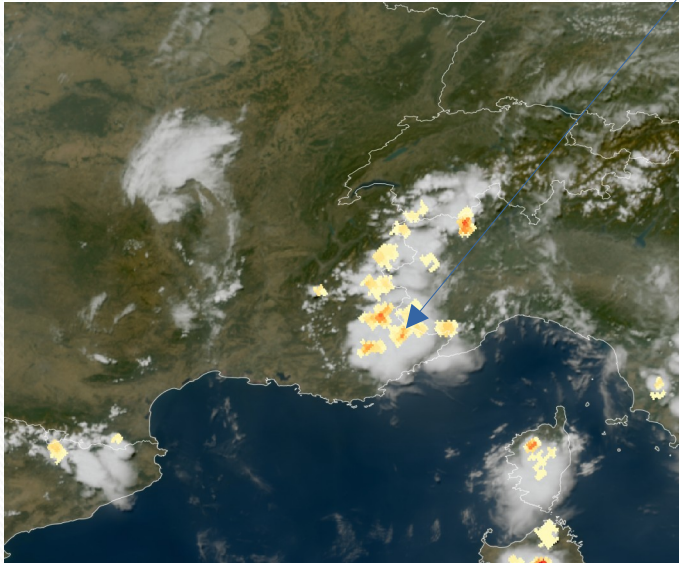
# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – DIFFÉRENTS TYPE D'ORAGE



## Orage multi-cellulaire

- La cellule n-1 est en **phase mature**.
- Les cellules n et n+1 sont **en train de se développer** là où les ascendances sont favorisées par l'interaction entre le courant de densité et le cisaillement de l'environnement.
- Les cellules n-2 et n-3 sont **en phase de dissipation**.

Orages difficilement contournables, generateur de turbulence parfois sévère tant à l'avant (cisaillement vertical de vent) qu'à l'arrière (courant de densité).



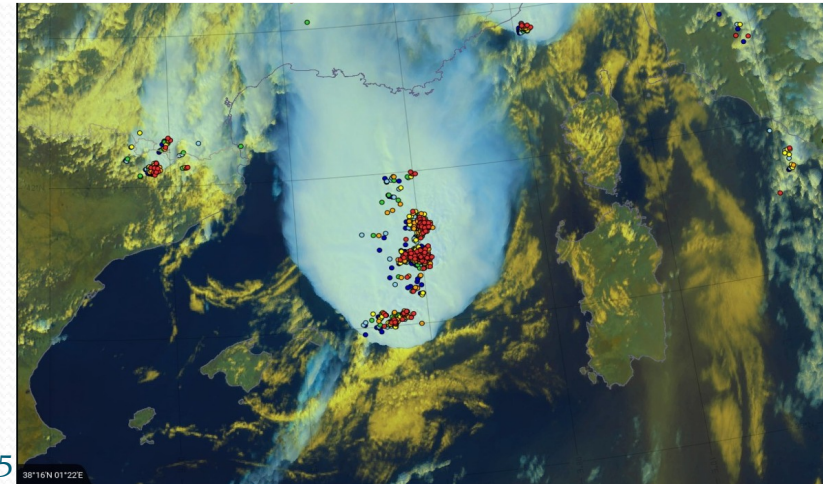
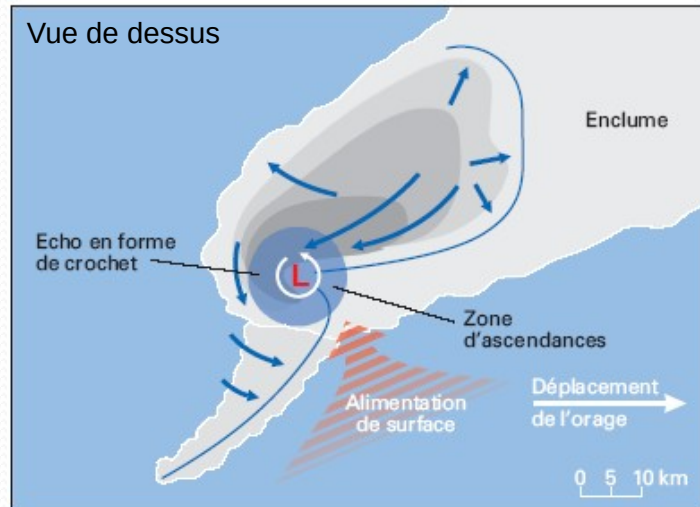
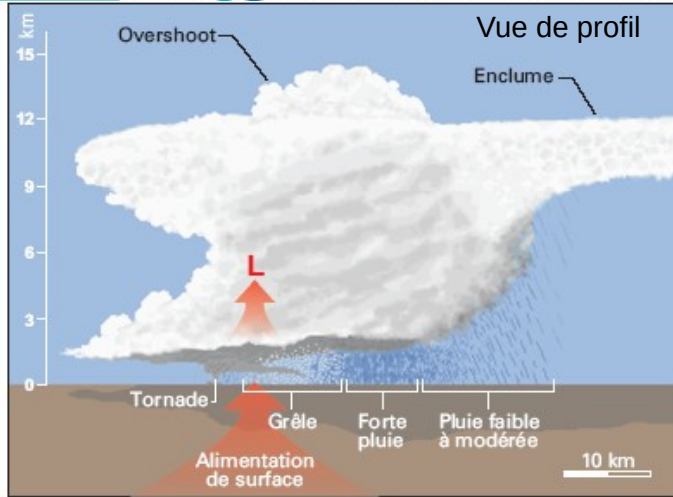
# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – DIFFÉRENTS TYPE D'ORAGE

## Orage supercellulaire

Ces orages sont parmi les plus développés, les plus grands et les plus puissants. C'est une et une seule cellule qui grâce à une organisation particulière du vent dans la cellule et autour de la cellule, peut se régénérer toute seule et se déplacer. Elle peut durer plusieurs heures, tant que son alimentation chaude persiste et que le cisaillement de vent ne change pas.

Ce genre de cellule peut donner :

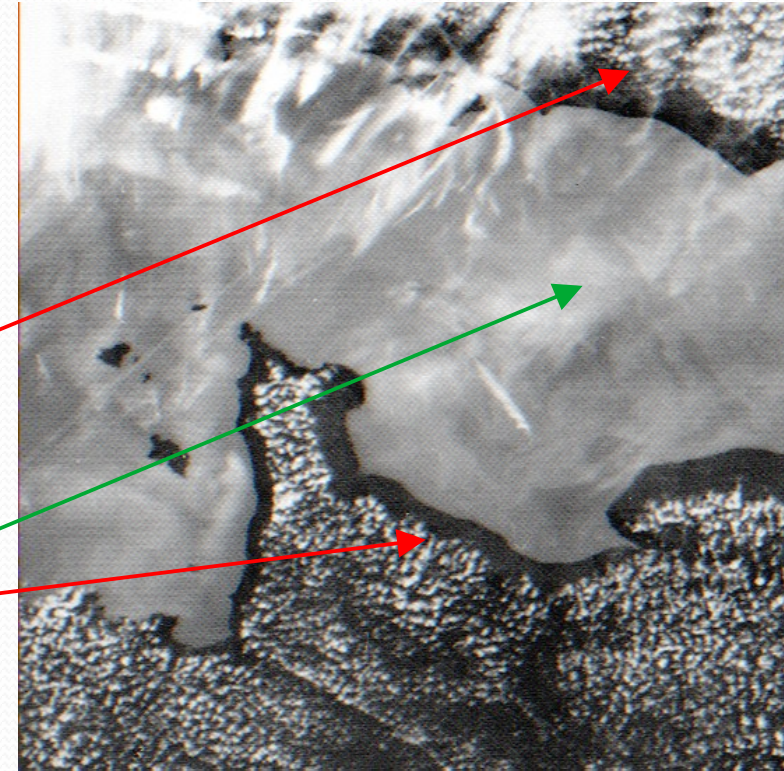
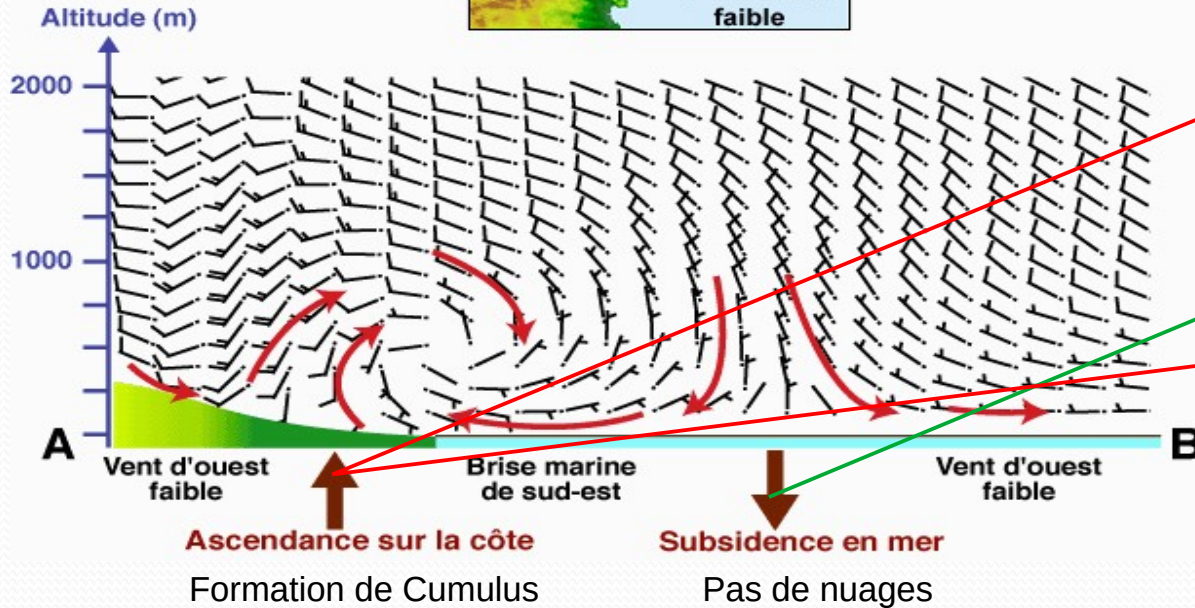
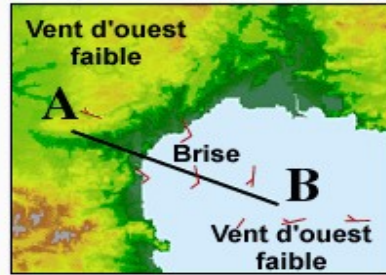
- fortes rafales
  - fortes précipitations et grosse grêle (5/10cm),
  - tornades
  - fortes turbulences aussi bien en altitude que dans les basses couches.
- => gros danger pour tout type d'avion, y compris les liners





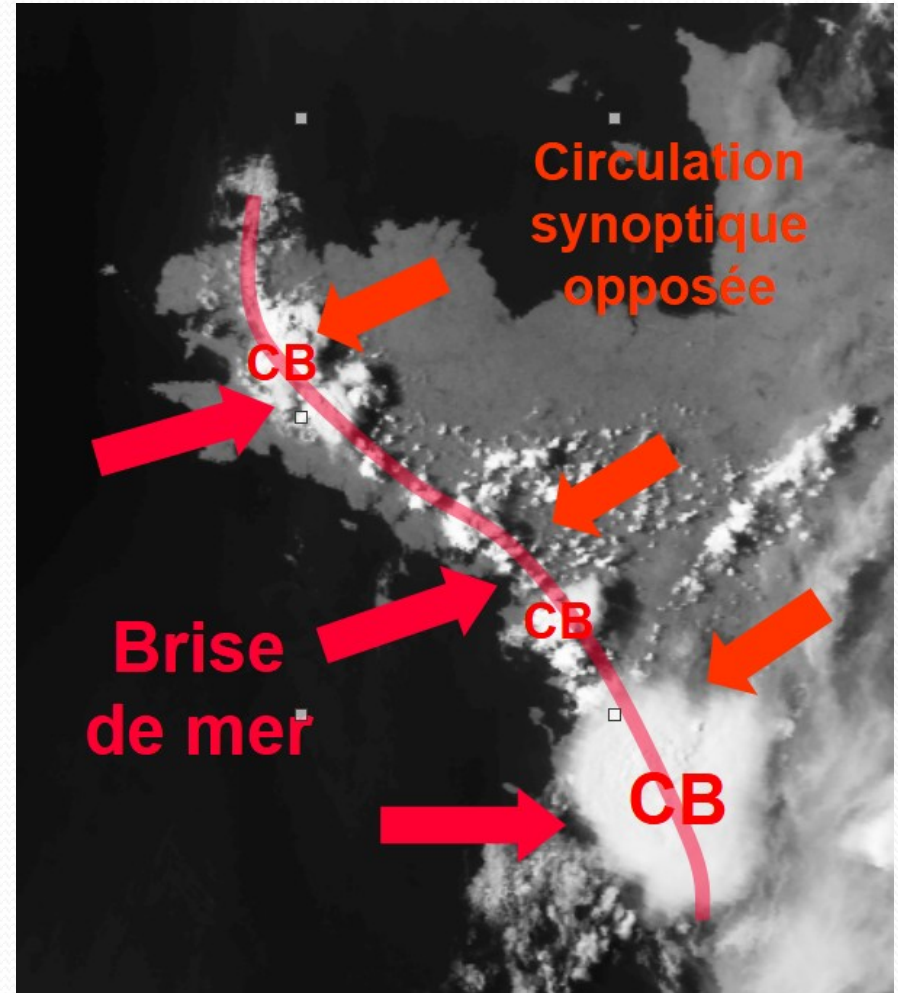
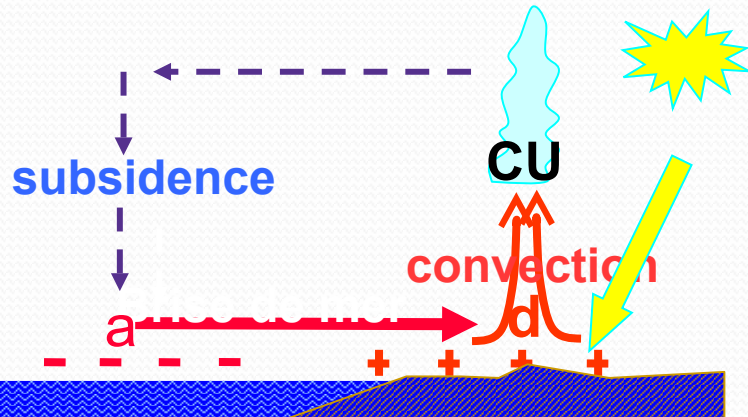
# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – PHENOMENES LOCAUX : BRISE DE MER

Coupe verticale

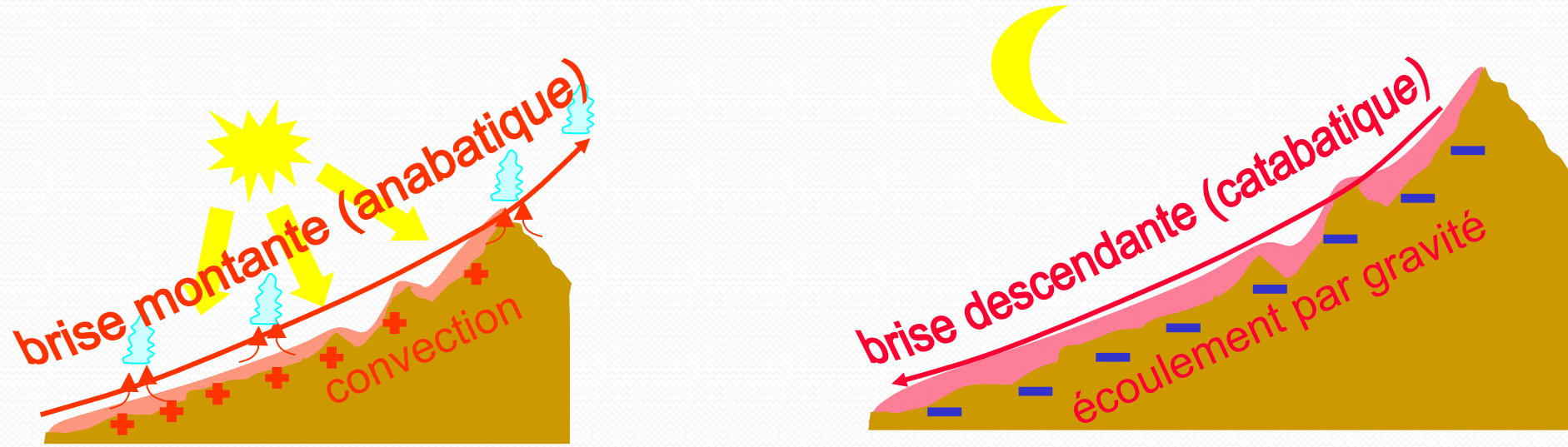


## Front de brise de mer

- conflit entre la brise de mer et une circulation opposée (vent synoptique par exemple)
- turbulence et fabrication nuageuse importante à l'intérieur des terres
- l'air marin peut pénétrer jusqu'à 30 NM à l'intérieur des terres avec extension verticale de 1000 à 1500 ft, → soulèvement de l'air chaud et formation de Cu, TCU voire CB si convergence avec le flux général et instabilité de la masse d'air.



# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – PHENOMENES LOCAUX : BRISE DE PENTE

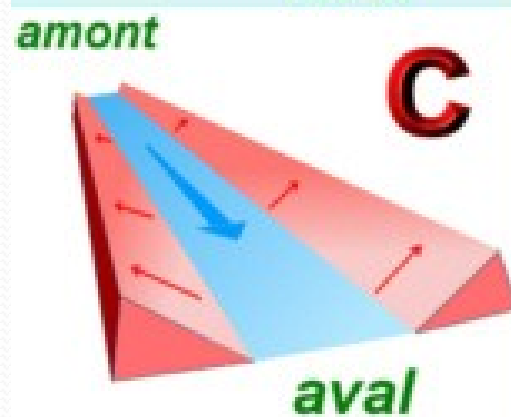
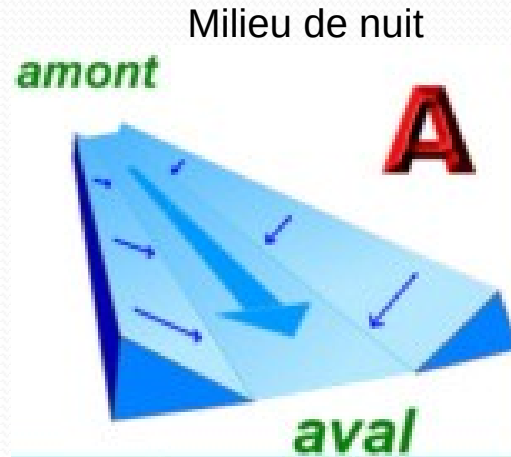


Quand le soleil chauffe suffisamment les pentes du relief, de la convection se met en place, ce qui crée des mouvements verticaux sur les pentes pouvant aller à la création de Cumulus. Ces ascendances sur les flancs de la montagne entraînent la mise en place de la brise de vallée montante. Ces ascendances peuvent converger au niveau des crêtes entraînant une convection encore plus importante, celle-ci fabrique souvent des TCU, voire CB si l'humidité est suffisante. Ces ascendances peuvent aussi rester sèches, thermiques purs plus difficile à trouver pour les parapentistes.



# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – PHENOMENES LOCAUX : BRISE DE PENTE

Brises de vallée  
et de pente  
**descendantes**



Début de matinée

Séminaire Sécurité - Pilote privé et ULM - 2025



Milieu  
d'après-midi

Brise de vallée  
**ascendante** et  
brise de pente  
**descendante**

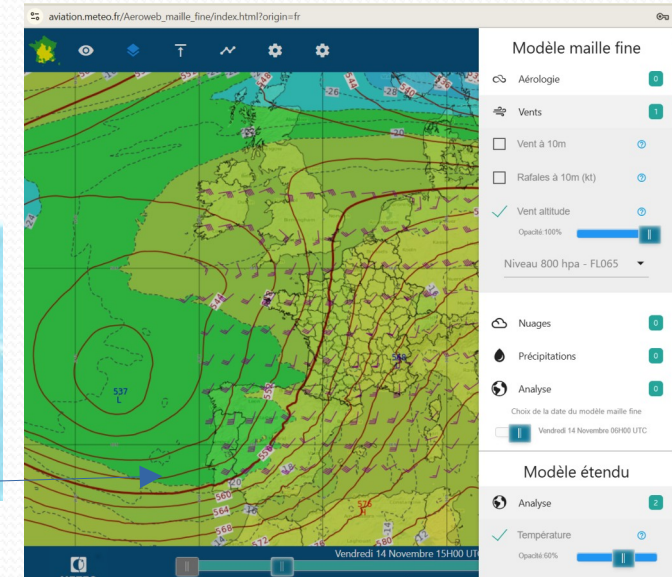
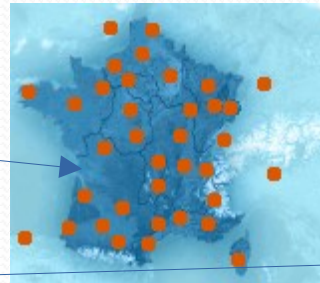
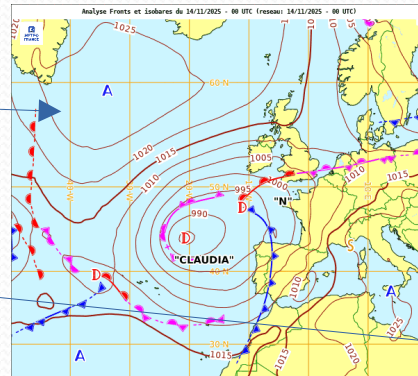
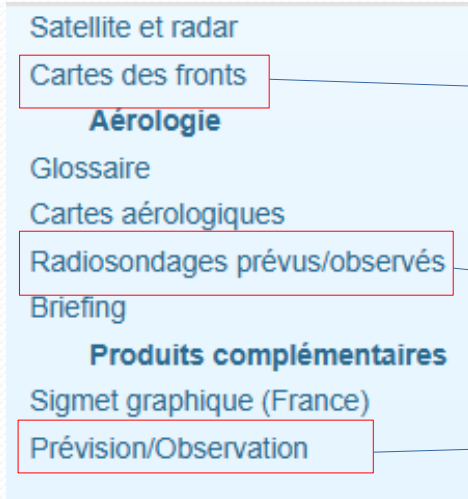
Brises de  
vallée et de  
pente  
**ascendantes**

# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – LA PREVISION DE LA CONVECTION AVEC AEROWEB

La prévision de la convection, profonde ou pas, peut se faire de façon générale avec Aeroweb via son module « Observations/Prévisions ».

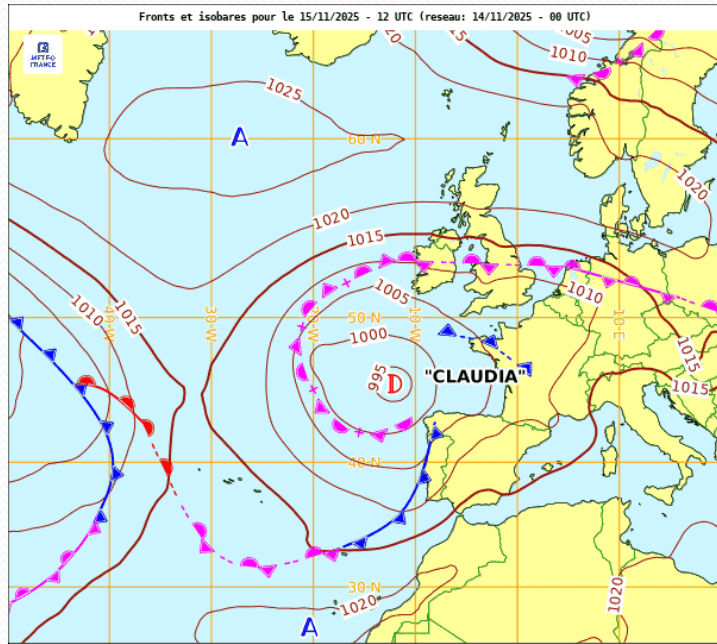
On trouve dans la partie prévision des éléments qui seront de nature à nous renseigner sur la possibilité de phénomènes convectifs et de déterminer si ce sera de la convection profonde ou non. Il va sans dire que pour la sécurité des vols, la convection peu profonde est largement préférable et on se gardera bien d'approcher les TCU et CB.

On trouve également sur Aeroweb les profils prévus, ce sera une aide des plus précieuse pour nous faire une idée de la convection. On y trouvera aussi la Carte des fronts, élément essentiel dans la compréhension de la situation.

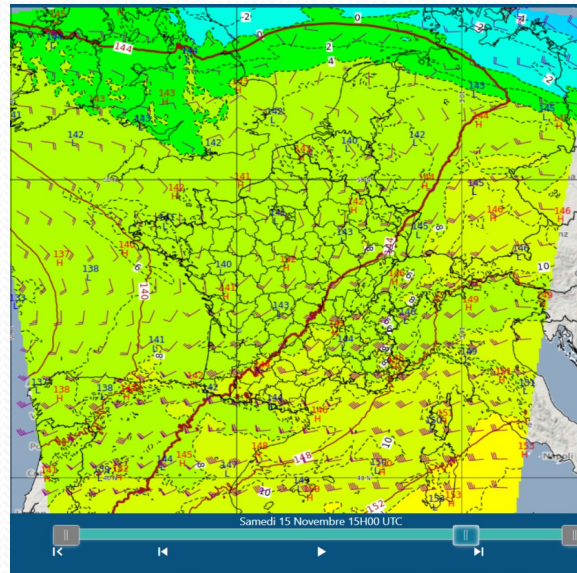


# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – LA PREVISION DE LA CONVECTION AVEC AEROWEB

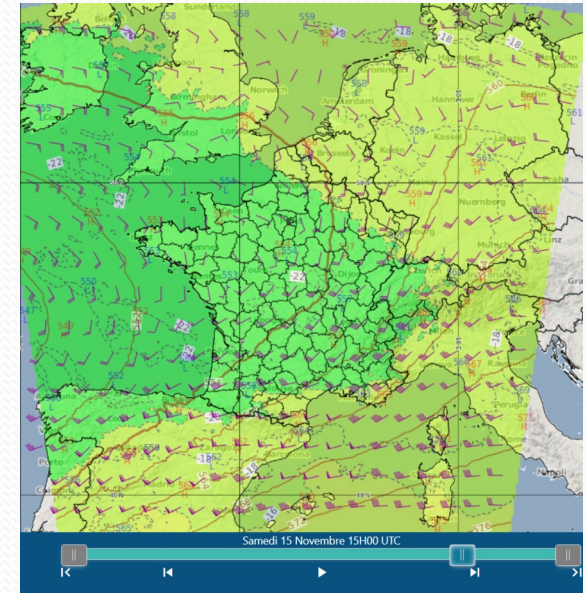
Dans son module « Observations/prévisions » Aeroweb propose un accès aux images satellites, radar et foudre. Pour la prévision, divers champs des modèles numériques Arome et Arpege sont accessibles. Ceux-ci permettent de faire une analyse de la situation et une prévision jusqu'à 48h.



Carte des fronts



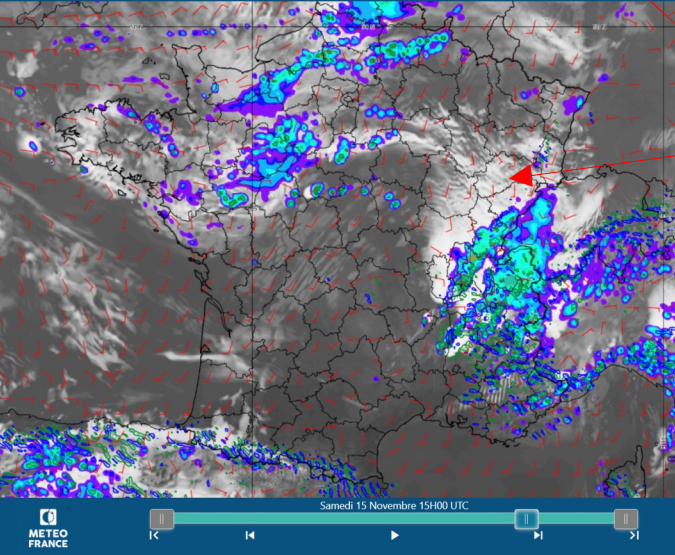
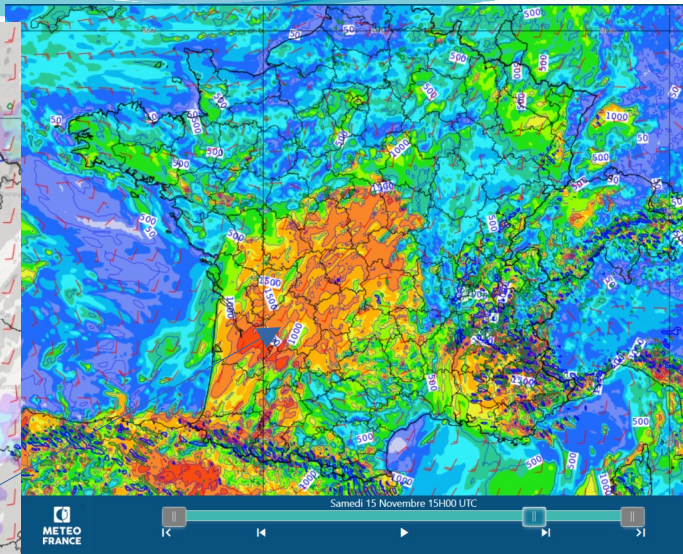
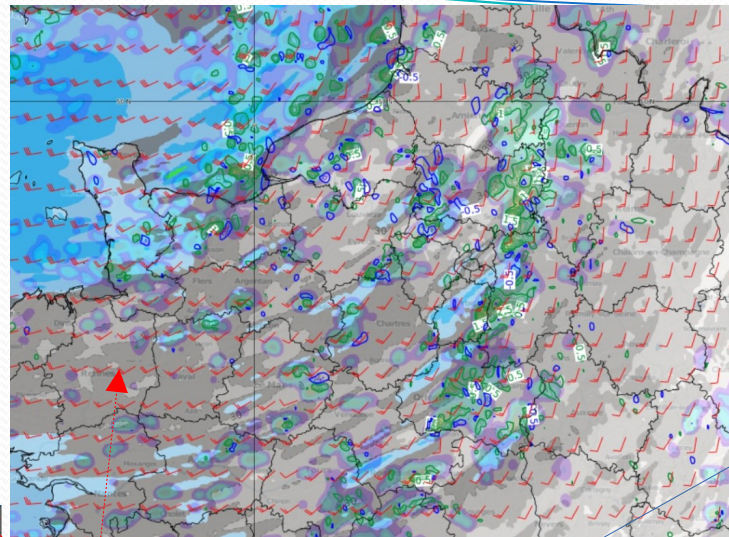
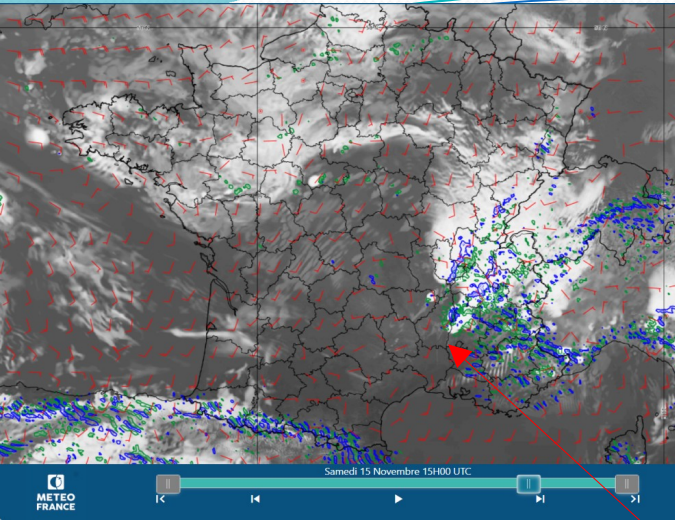
Température et géopotiel à 850hPa



Température et géopotiel à 500hPa



# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – LA PREVISION DE LA CONVECTION AVEC AEROWEB

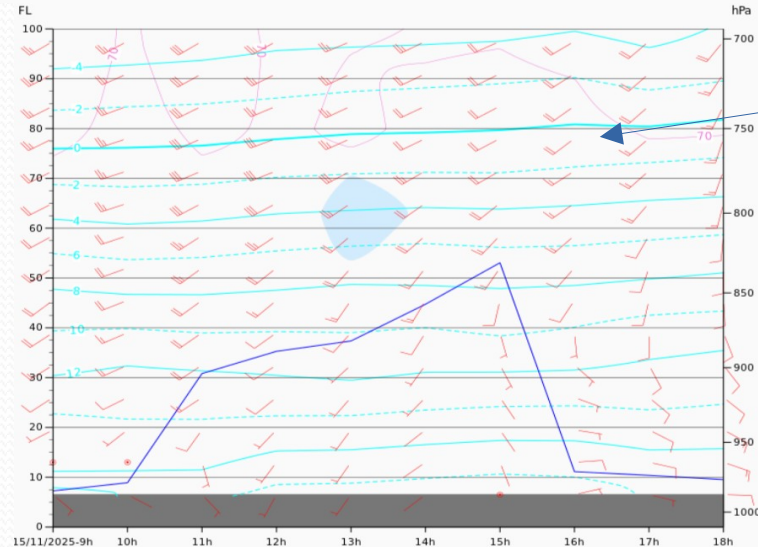
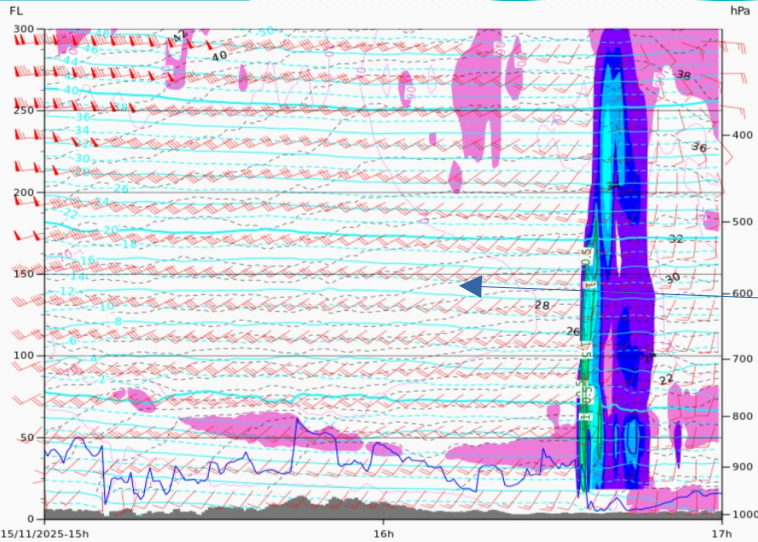


Après une analyse de la situation générale, les paramètres à regarder pour la convection sont :

- image satellite prévue avec vitesses verticales et/ou précipitations → zones de CB et d'averses bien évidentes (cf séminaire 2021 sur interprétation image sat infrarouge ou fiche Aeroweb « Images satellites »).
- hauteur de couche limite (HCLI) et TKE (en coupe) : estimation de la hauteur de la convection peu profonde et de la turbulence associée,
- humidité et couches nuageuses,
- vent et champ de rafales → estimer le potentiel de rafales sous TCU/CB.

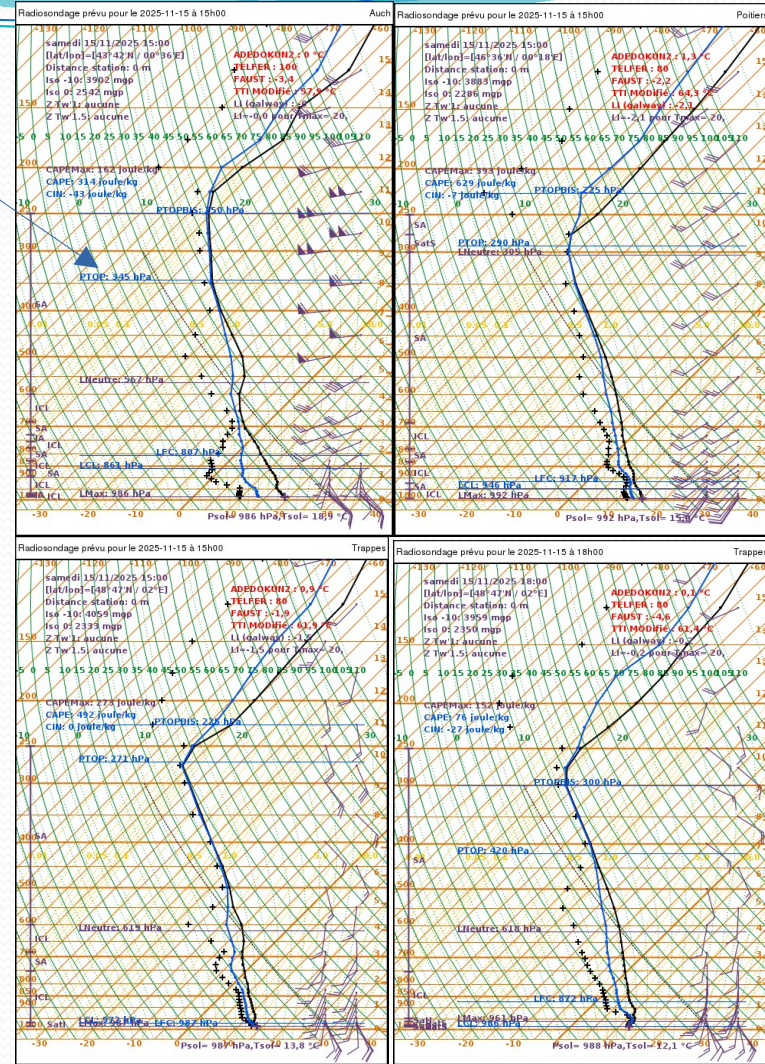


# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – LA PREVISION DE LA CONVECTION AVEC AEROWEB



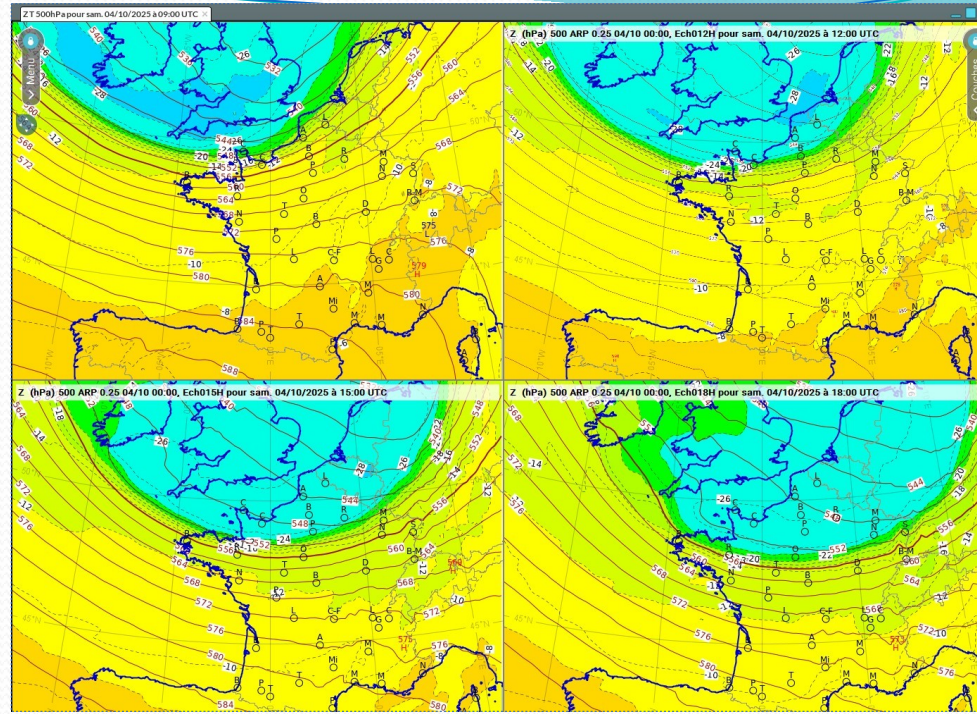
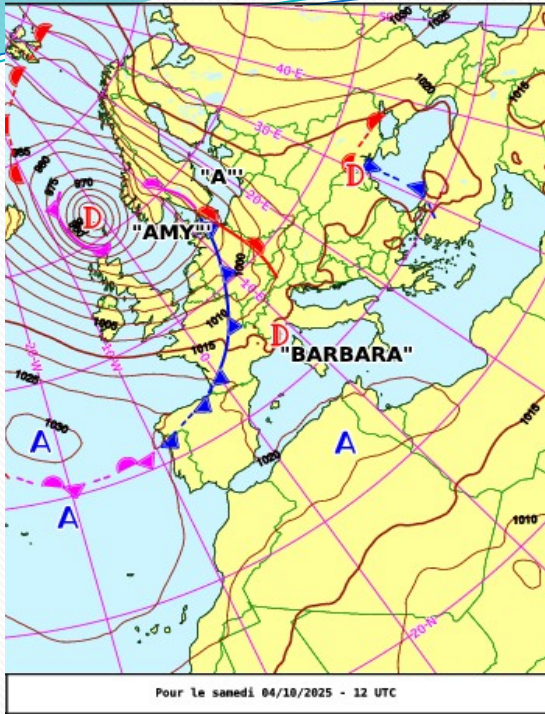
- profils verticaux prévus : analyse de l'instabilité, détermination du type de convection (profonde, peu profonde, humide, sèche...),
- coupe trajet → superposer HCLI (ligne bleue), Humidité (rose), précipitations (bleu/vert/jaune). La HCLI donne une idée du niveau où voler pour ne pas subir la turbulence. Les averses et CB sont aussi bien représentés (fortes vitesses verticales).
- coupe terrain → évolution temporelle de paramètres comme température (bleu ciel), HCLI, vent, humidité, précipitations L'évolution de la HCLI donne une bonne idée du début de la petite convection et la fin, ce qui est très utile pour les vélivoles ou parapentistes.

écurité - Pilote privé et ULM - 2025





# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – CONVECTION EN AIR FROID – TEMPÊTE AMY, 04/10/25



Evolution  
de la  
température  
à 500hpa  
entre 0900z  
et 1800z

Z T 500hPa

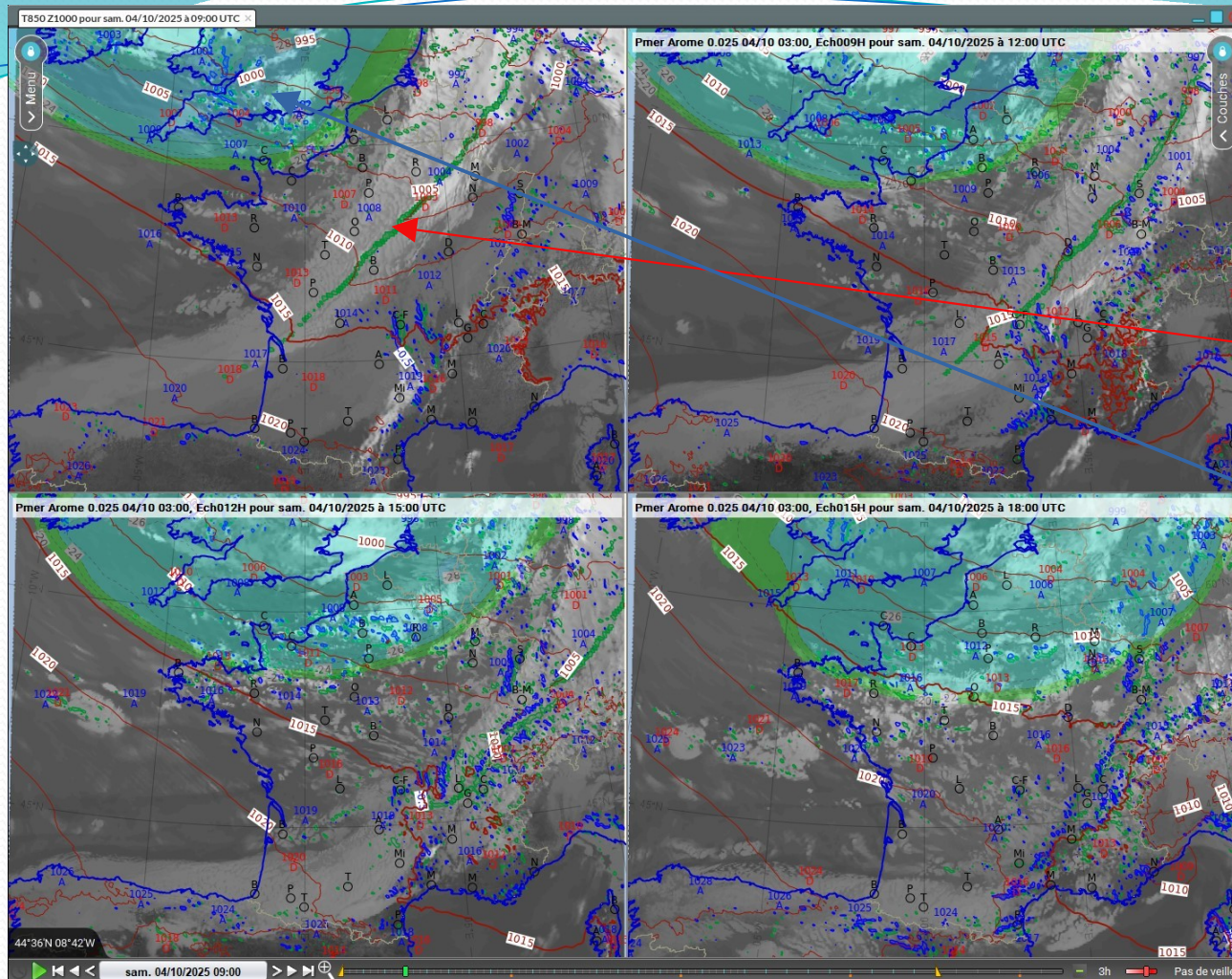
Étude de la convection en air froid avec le tempête AMY du 4/10/2025.

Sur la carte des front, on voit la tempête qui circule assez nord avec un front froid très étendu, du Danemark jusqu'au sud-ouest de la France. Conditions dépressionnaires sur la moitié nord du pays, tendance anticyclonique sur le sud.

En altitude, on voit que l'air le plus froid à 500hPa, reste cantonné au 1/3 nord du pays. On peut supposer un dégradé nord/sud dans la convection, avec une convection profonde au nord (TCU et CB) et moins développée plus on va vers le sud (petit TCU et cumulus/strato-cumulus).



# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – CONVECTION EN AIR FROID – TEMPÊTE AMY



On va utiliser les paramètres disponibles avec Aeroweb de 09z à 18z

- Image sat prévue
- Vitesses verticales
- Température à 500hPa

Tout d'abord on distingue très bien la bande de front froid à 09z avec l'air froid d'altitude qui arrive sur la Manche.

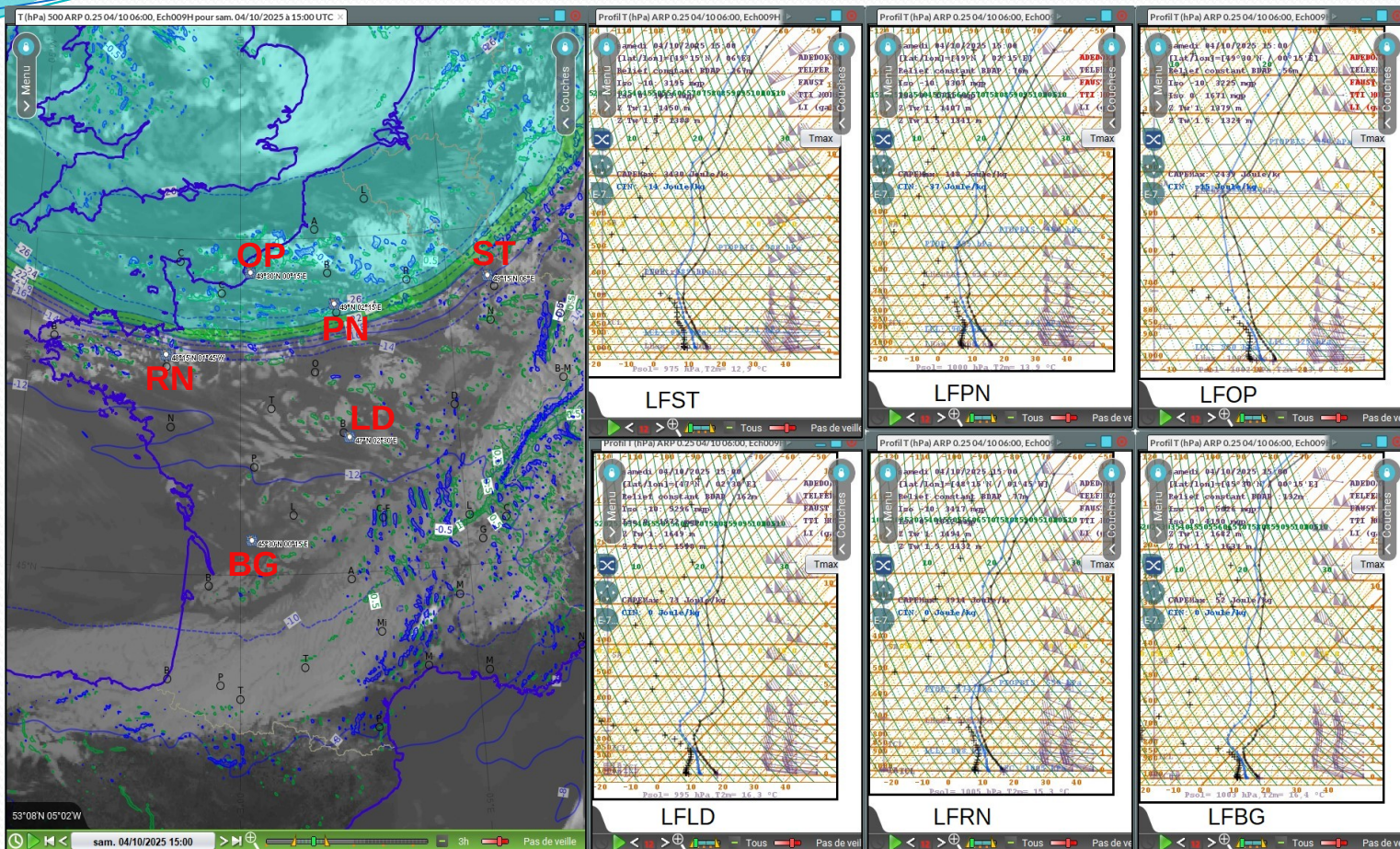
Sur les échéances suivantes on voit que le FF s'enfonce vers le sud-est et que l'air froid gagne un 1/3 nord du pays.

Sous cet air froid, on voit des nuages blancs apparaître → nuages épais, plutôt isolés, ce sont des CB. De plus associés à des vitesses verticales, cela montre leur intensité → **convection profonde (TCU/CB).**

Plus au sud de l'air froid, l'image prévue reste grise, signe d'un développement moindre des cumulus (de plus champs devenant anticyclonique) → **convection moins profonde (CU, SC).**



# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – CONVECTION EN AIR FROID – TEMPÊTE AMY



Sur les RS prévus à 1500z, on distingue très bien :

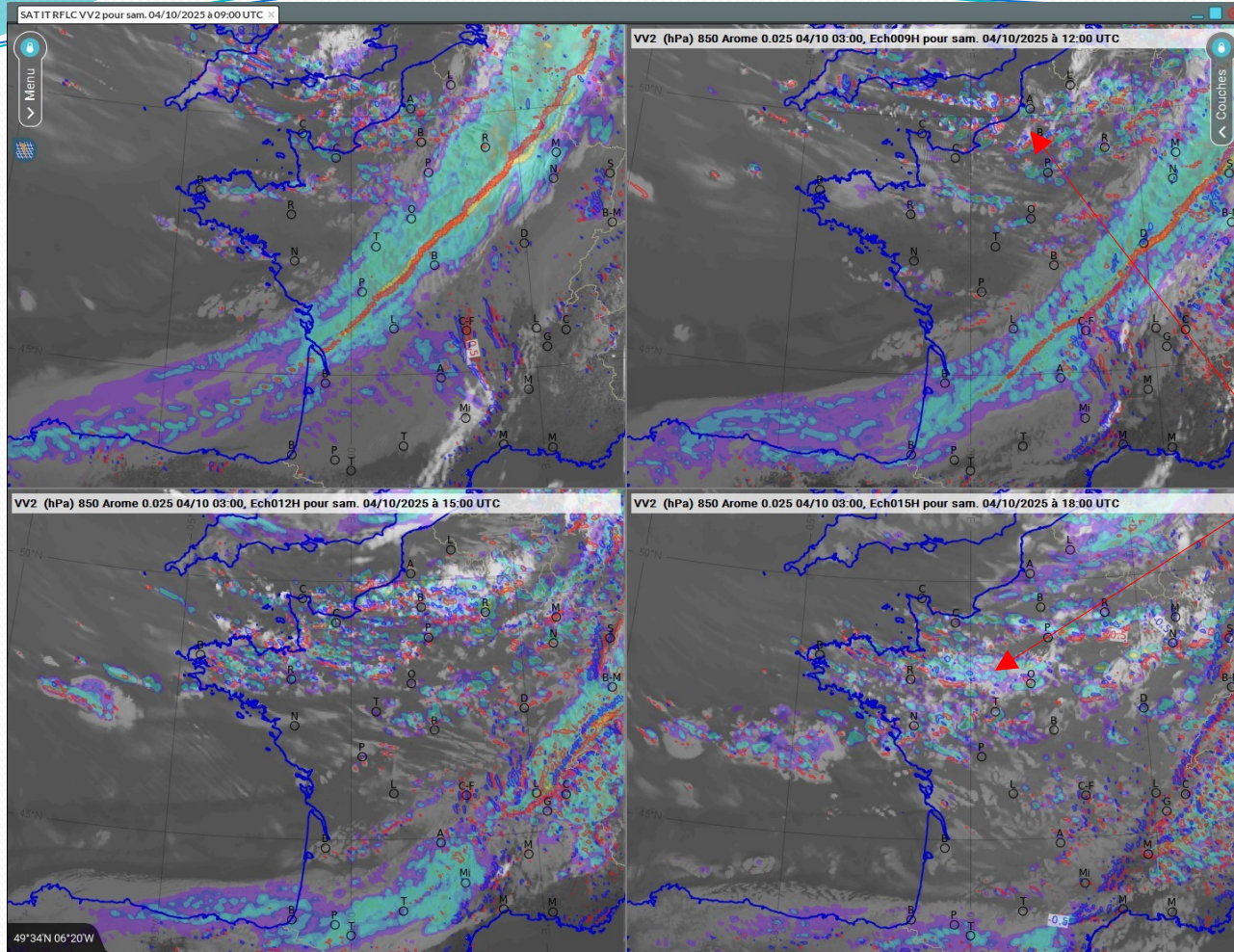
1/ la convection profonde bien installée à PN et OP avec des CB (TOP FL180/200), fortes averses et rafales.

2/ une convection un peu moins profonde à ST et RN, TCU probables (TOP FL140) avec averses, quelques rafales.

3/ une convection peu profonde avec même une petite subsidence bien visible plus au sud : cumulus mediocris avec des bases voisines de 030/040 et des TOP vers 080 vers LD et FL060 vers Cognac.



# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – CONVECTION EN AIR FROID – TEMPÊTE AMY

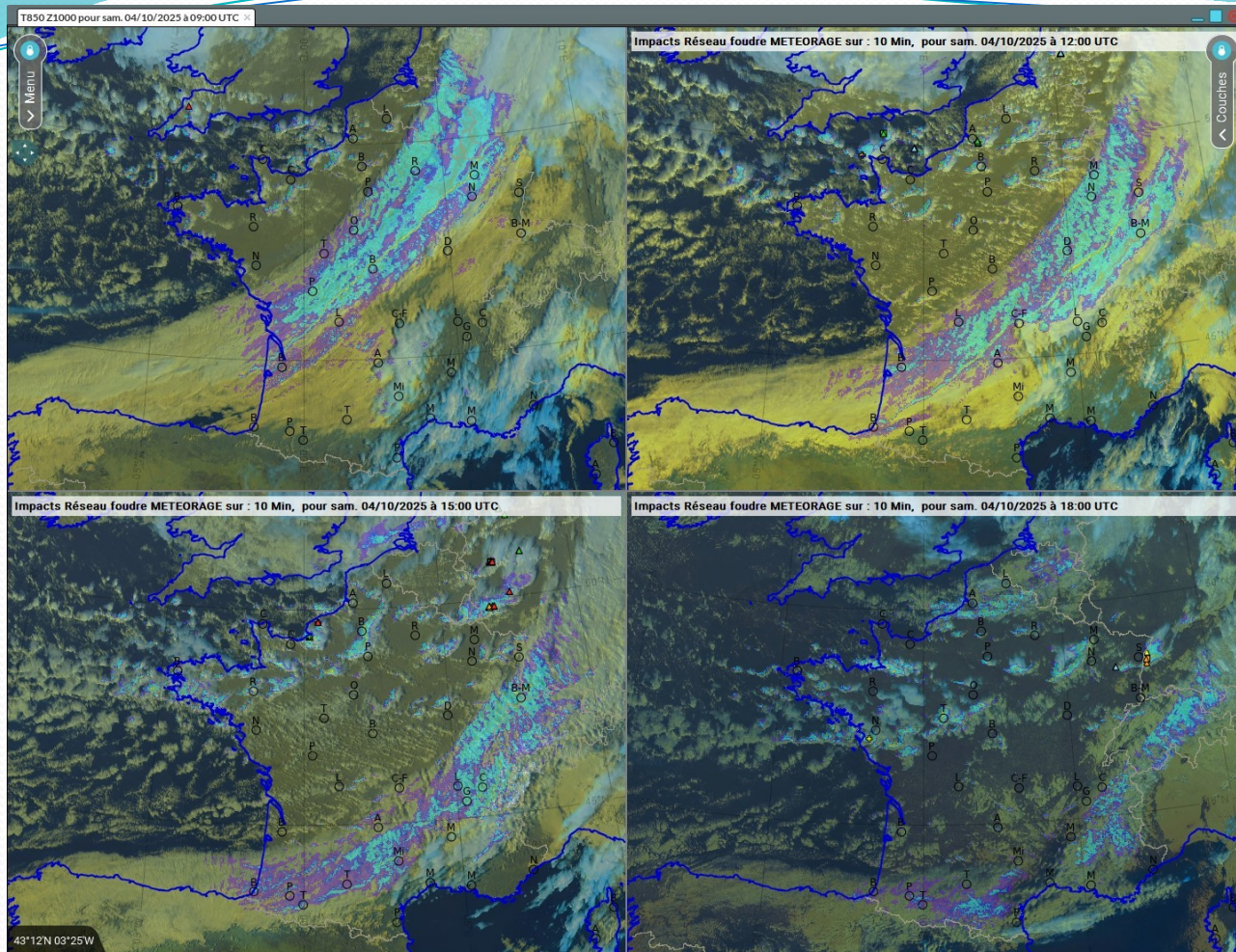


Si on prend les images satellites prévues avec les précipitations et les vitesses verticales, on distingue aussi très bien le régime d'averses qui se met en place de la Manche vers les frontières de l'Est.

Bien repérer que les nuages blancs et isolés (des CB/TCU) sont en lien avec les précipitations prévues et avec les vitesses verticales



# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – CONVECTION EN AIR FROID – TEMPÊTE AMY



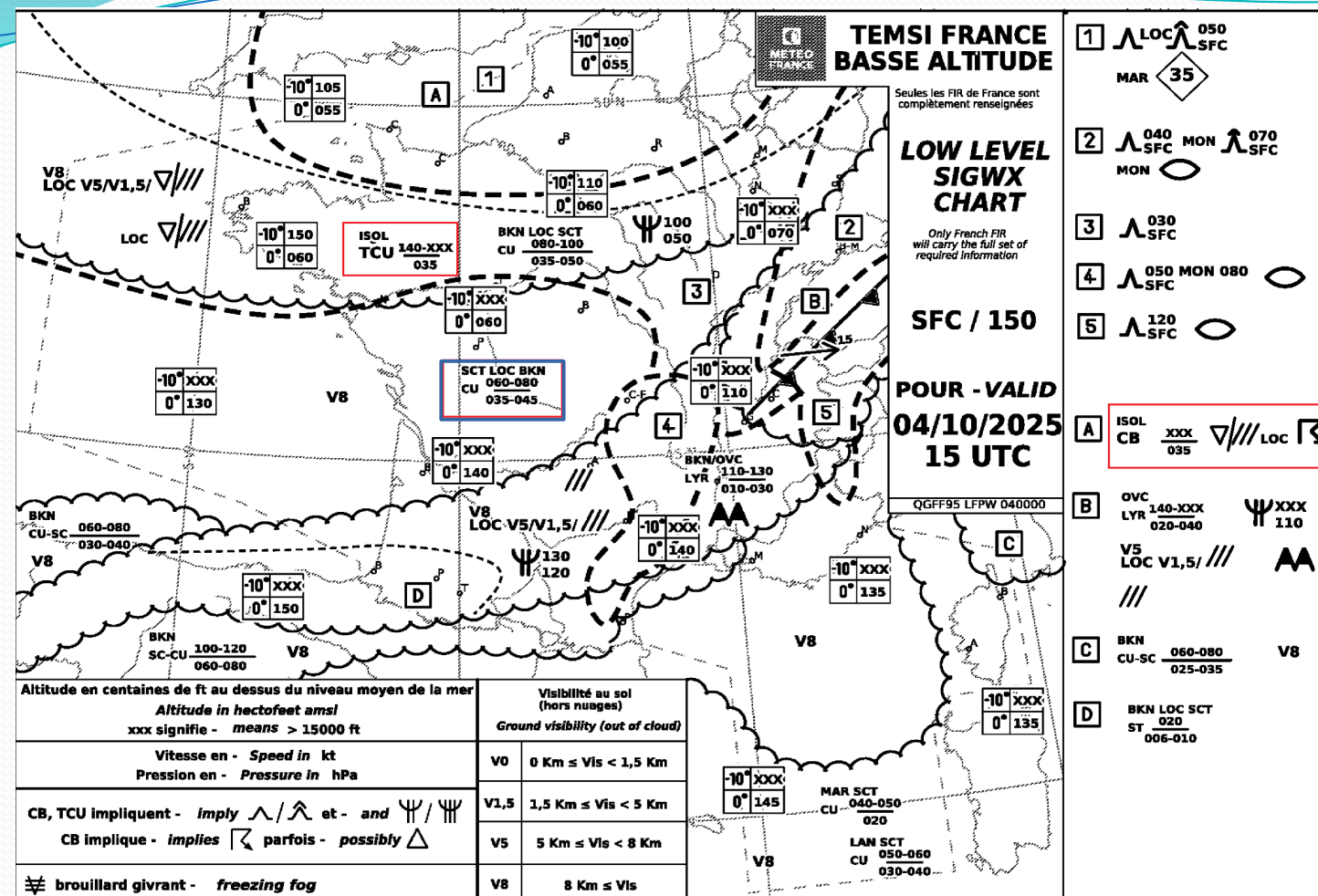
Sur les images satellites observées on voit bien les CB sur le nord du pays avec des averses, on remarque aussi que l'espace entre CB et presque clair = piège car les CB se déplacent très vite et il peut être problématique de revenir vers son AD de départ...

Plus au sud dans la traîne moins active, cumulus bien moins développés et sans averses = conditions volables (nonobstant le vent qui soufflait très fort ce jour là).

C'est par ailleurs ce jour là qu'a eu lieu les fortes rafales entre Rouen et Paris, comme quoi des CB même au FL200 peuvent générer de très fortes rafales (cf slide suivante).



# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – CONVECTION EN AIR FROID – TEMPÊTE AMY



CB vers la Manche vers 1500loc.

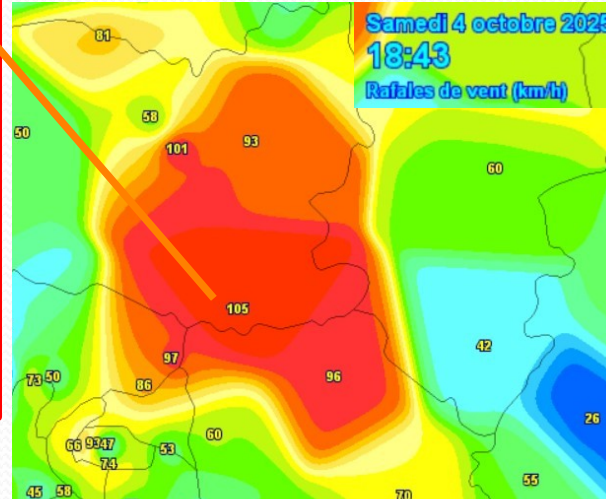
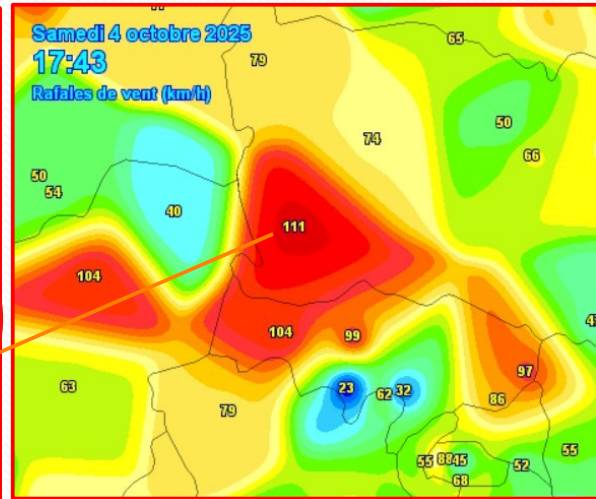
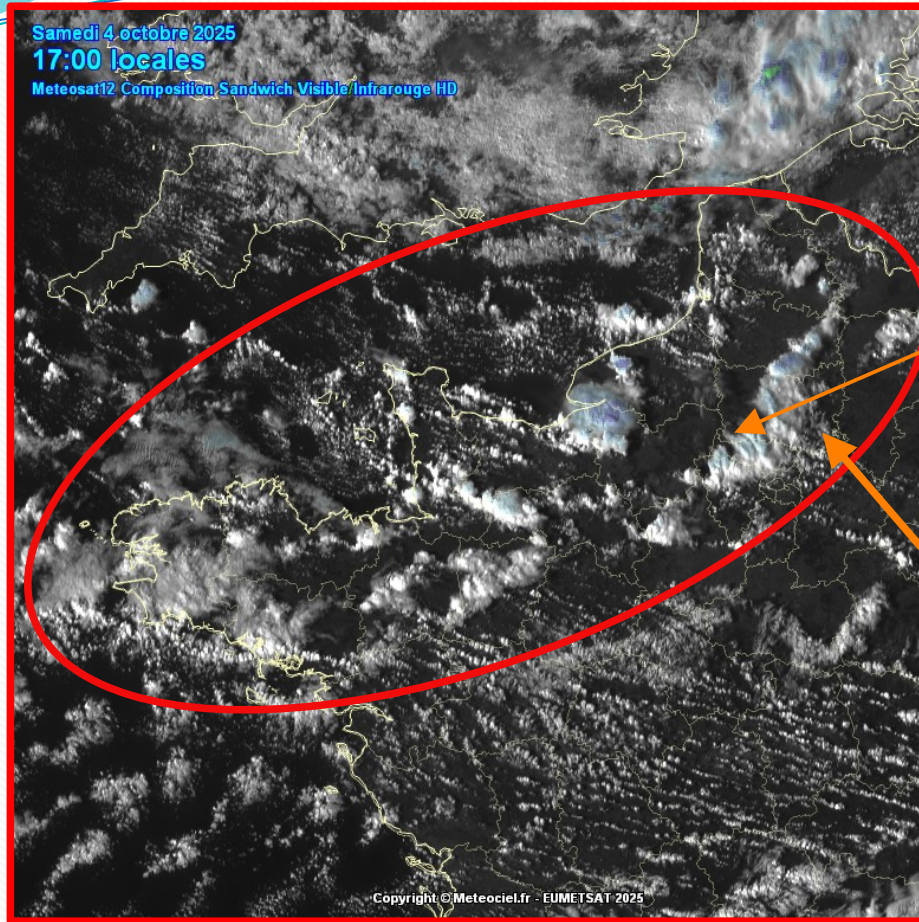
Le TBA de 1500z confirme bien les TCU et CB sur le nord du pays et de petits cumulus entre le front et la traîne active

Cu vers la Corrèze à 1700loc





# INSTABILITÉ DES MASSES D'AIR – CONVECTION EN AIR FROID – TEMPÊTE AMY



Sur l'image satellite visible (à gauche) on voit très bien les CB sur la région parisienne.

A droite, les relevés des rafales générées par les CB entre 1700 et 1900h locales sur le val d'Oise et l'Oise.