



Plan du cours

- 1) L'atmosphère terrestre
- 2) Température
- 3) Pression atmosphérique
- 4) Humidité et Stabilité
- 5) Circulation Générale - Mouvement



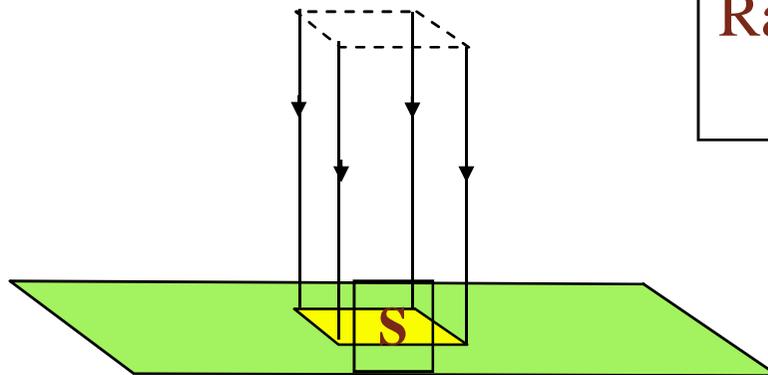
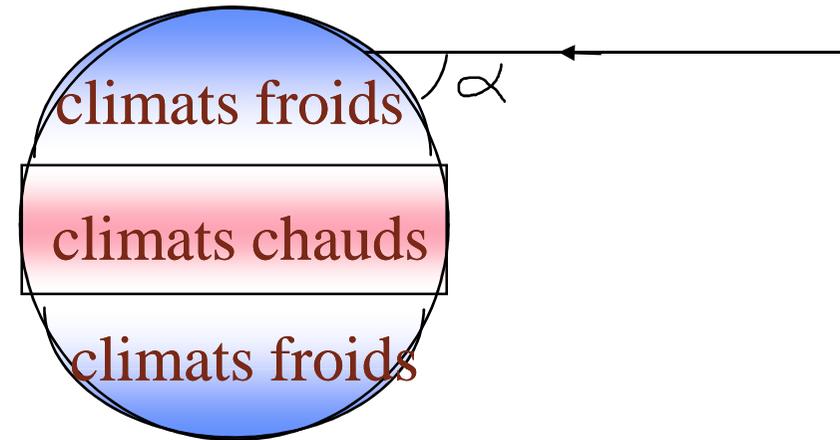
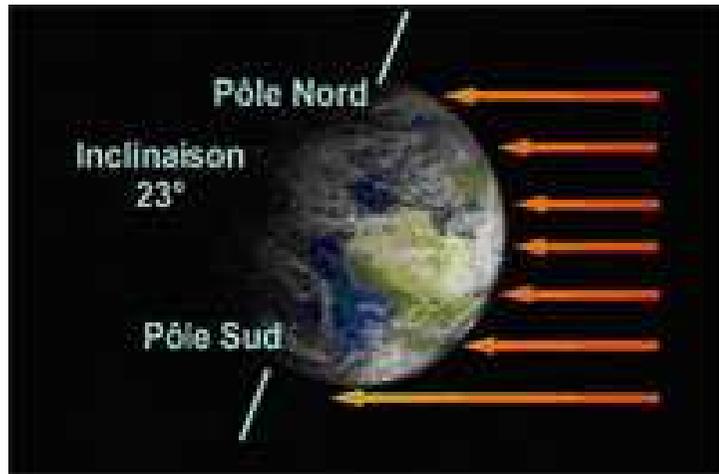
L'atmosphère n'est que rarement au repos. A toutes les échelles on peut observer des mouvements horizontaux et verticaux plus ou moins importants.

La première cause de mouvement reste un chauffage différentiel de la Terre et de son atmosphère.

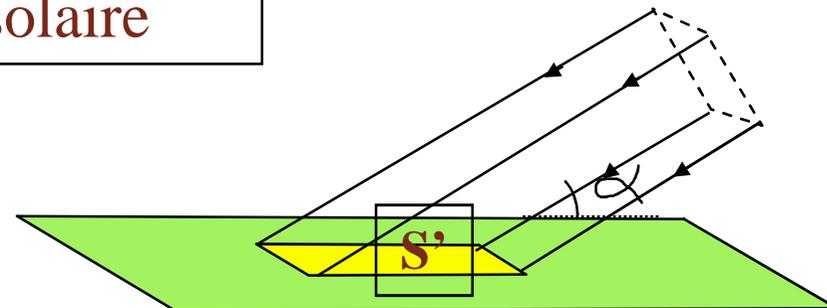
Ces différences de température engendrent des différences de pression. Or la nature ne supportant pas ces différences, elle veut revenir à l'équilibre : c'est le mouvement ou tout simplement le vent.



Répartition générale des climats

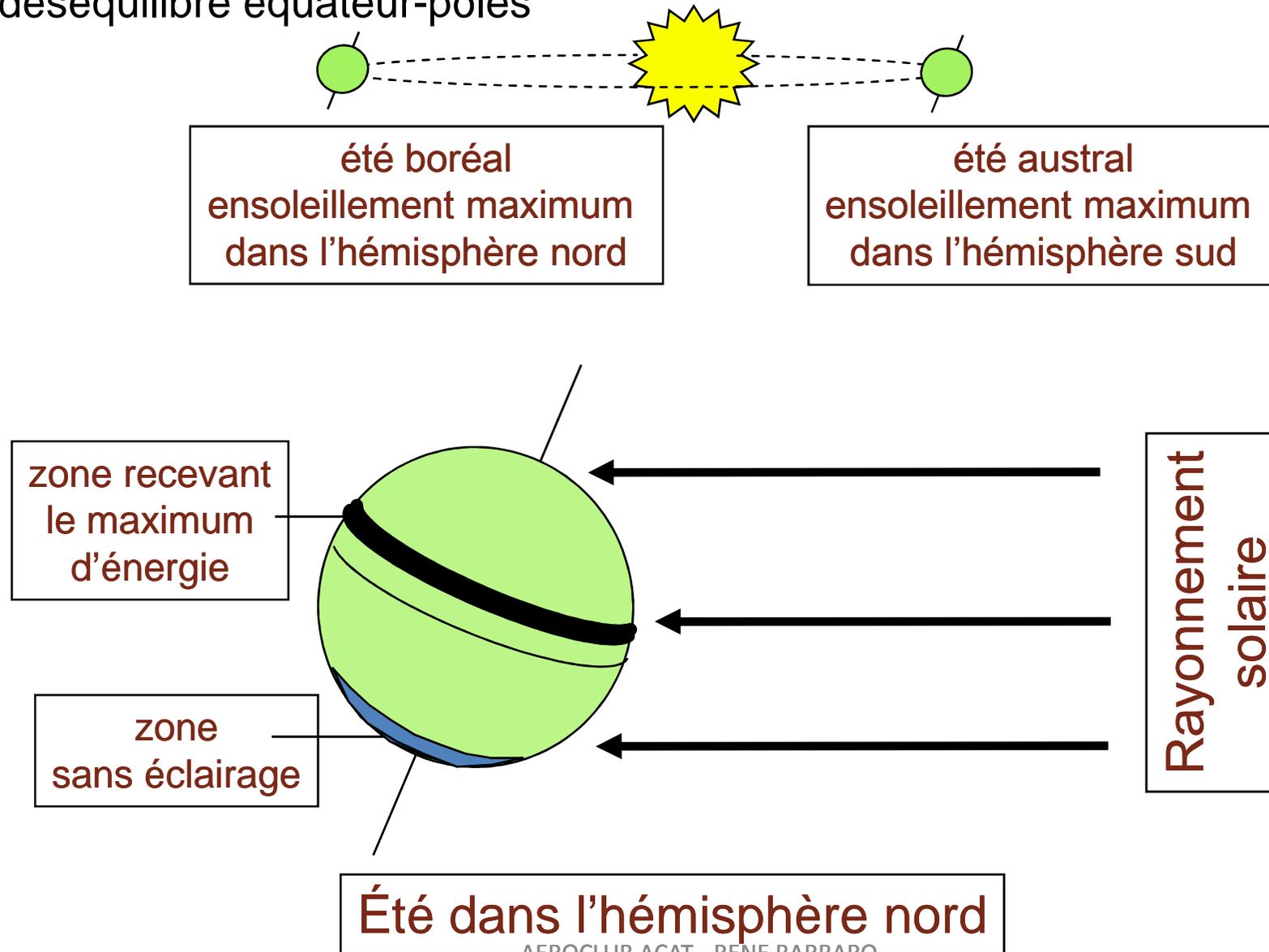


Rayonnement
solaire





Le déséquilibre équateur-pôles





Le déséquilibre équateur-pôles

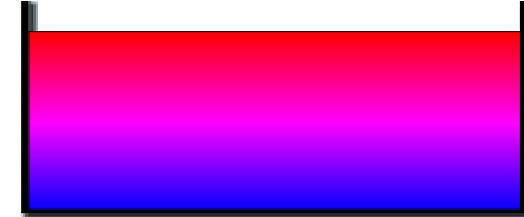
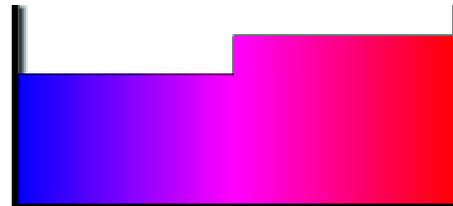
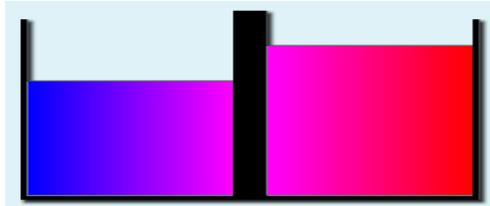
La circulation générale résulte d'un double déséquilibre :

- pôle / équateur (excédent aux tropiques)
- sol / altitude (excédent près du sol)

↳ **D'où nécessité d'échanges énergétiques compensatoires méridiens et verticaux**

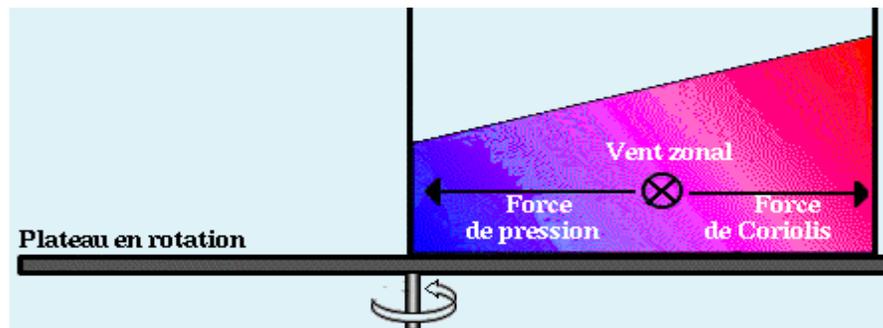


Le chauffage différentiel



Énergie potentielle minimale

La Terre étant en rotation, cela crée une nouvelle force qui dévie le mouvement naturel : la force de Coriolis.

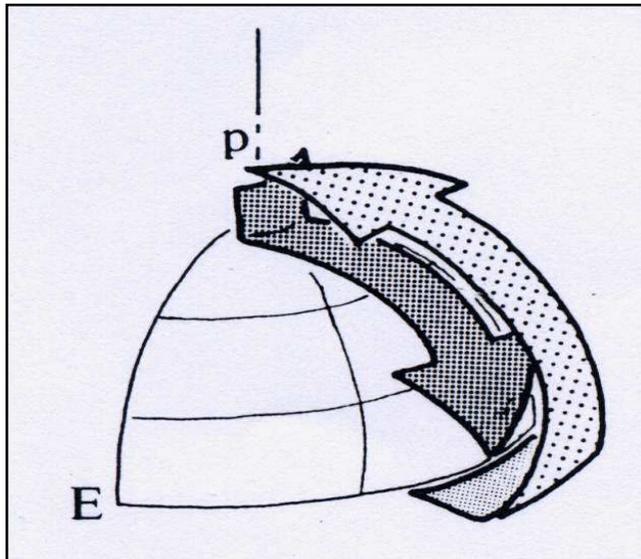


En bleu, le fluide lourd ; en rouge, le fluide léger.

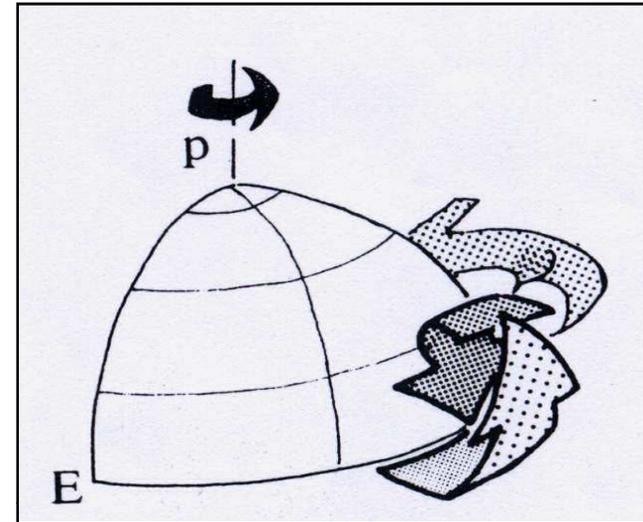
Énergie potentielle résiduelle =
carburant barocline

Cas d'une cuve en rotation

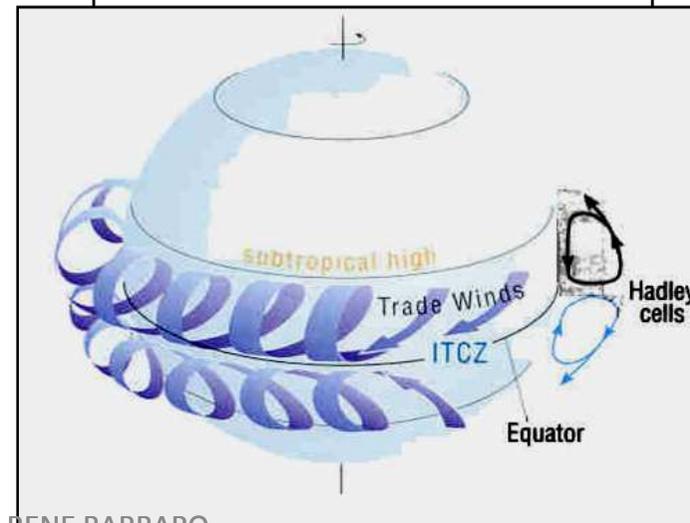
Transport d'énergie à grande échelle



**sans rotation de la
Terre**

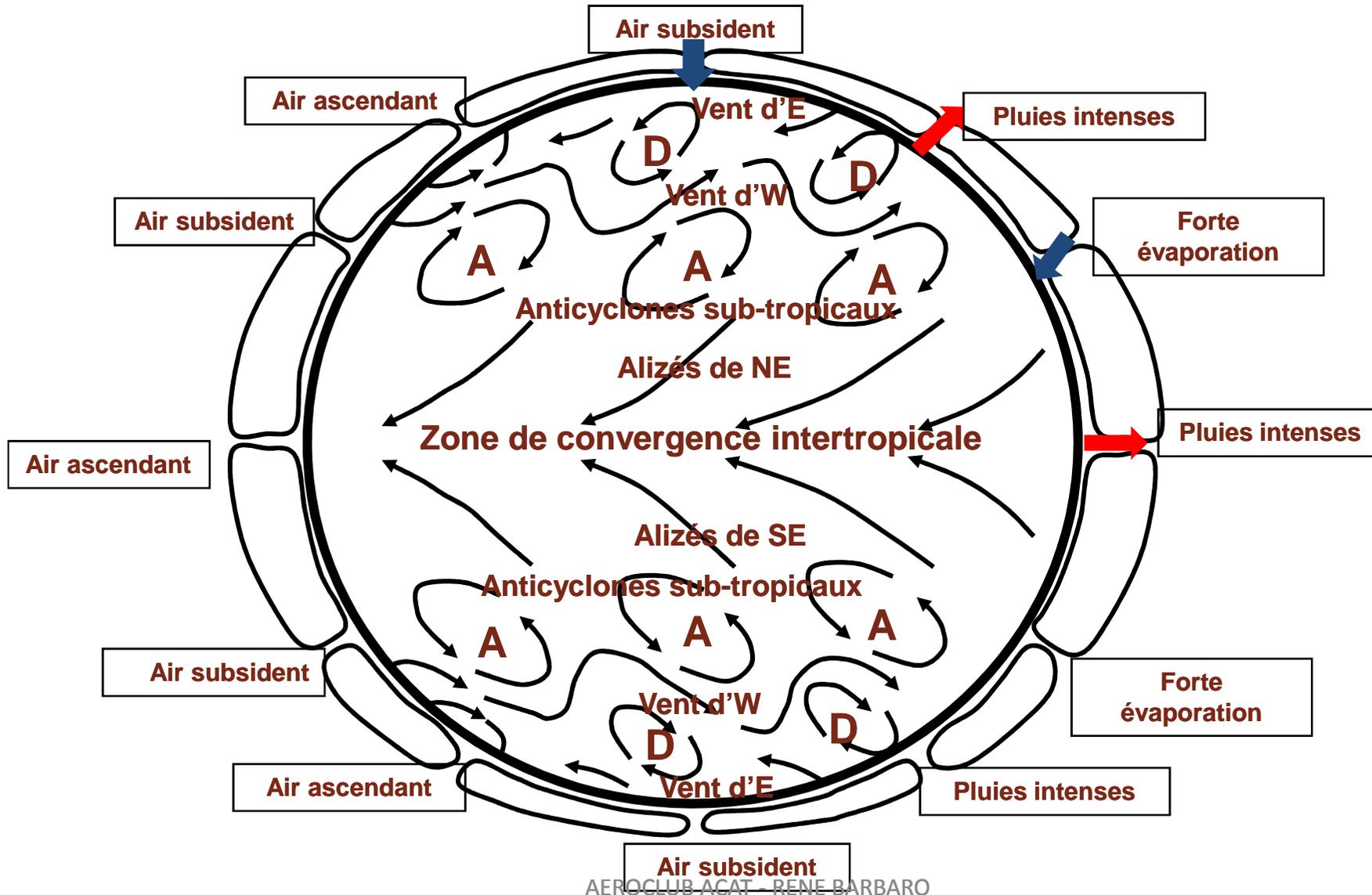


avec rotation





Transport d'énergie à grande échelle

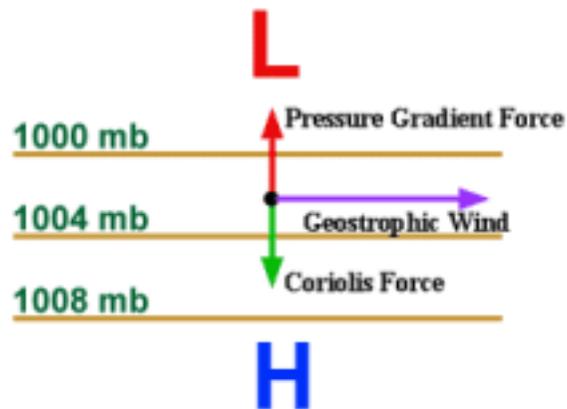




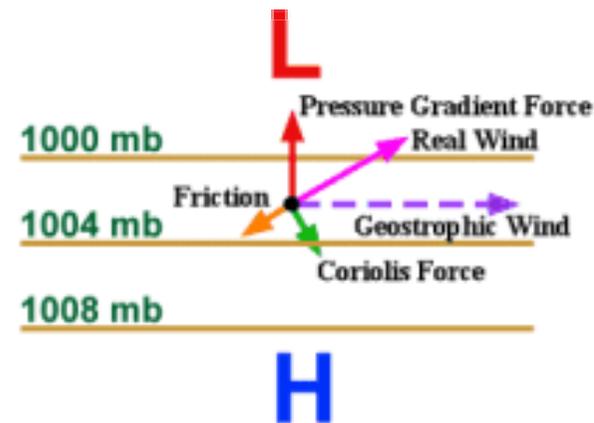
Ainsi dans l'atmosphère le mouvement horizontal (le vent!) est le résultat de l'action de deux forces :

- la force de pression, orienté des hautes valeurs vers les basses valeurs,
- la force d'inertie de Coriolis, créée par la rotation de la Terre, opposée directement à cette force de pression.

La force du vent horizontal est directement lié au gradient de pression (écartement des isobares/isohypses).



En altitude, le vent est parallèle aux isohypses.



En surface, il convient de tenir compte de la friction sur la surface, le vent est dévié vers les basses valeurs



$$|\vec{Vg}| = \left| \frac{G}{f} \frac{\Delta Z}{\Delta l} \right|$$

Règle de Buys Vallot :

- dans l'hémisphère nord le vent est parallèle aux isohypses et laisse les basses valeurs sur sa gauche et les hautes valeurs sur sa droite,
- Sa force est liée à l'écartement des isobares/isohypses.

Le vent est dit **géostrophique** lorsque l'on considère que son accélération est nulle, c'est une des hypothèses fondamentales en météorologie. Cela reste valable quasiment partout sauf près des dépressions.

Par ailleurs, en dehors de la couche limite, le vent géostrophique augmente avec l'altitude pour avoir généralement son maximum à la tropopause (les jets).

L'unité SI de la vitesse est le m/s mais en aéronautique on utilise le nœud (Kt), ou nautic mile, valant 1,852 m/s.



Plan du cours

- 1) L'atmosphère terrestre
- 2) Température
- 3) Pression atmosphérique
- 4) Humidité et Stabilité
- 5) Circulation Générale - Mouvement
- 6) Masses d'air



Définition

L'atmosphère n'est pas un fluide homogène mais un ensemble de grandes masses d'air , plus ou moins individualisées, plus ou moins homogènes et séparées par des discontinuités plus ou moins marquées.

Ainsi une masse d'air se caractérise par des paramètres relativement homogènes comme la température, l'humidité, la stabilité (et l'origine).

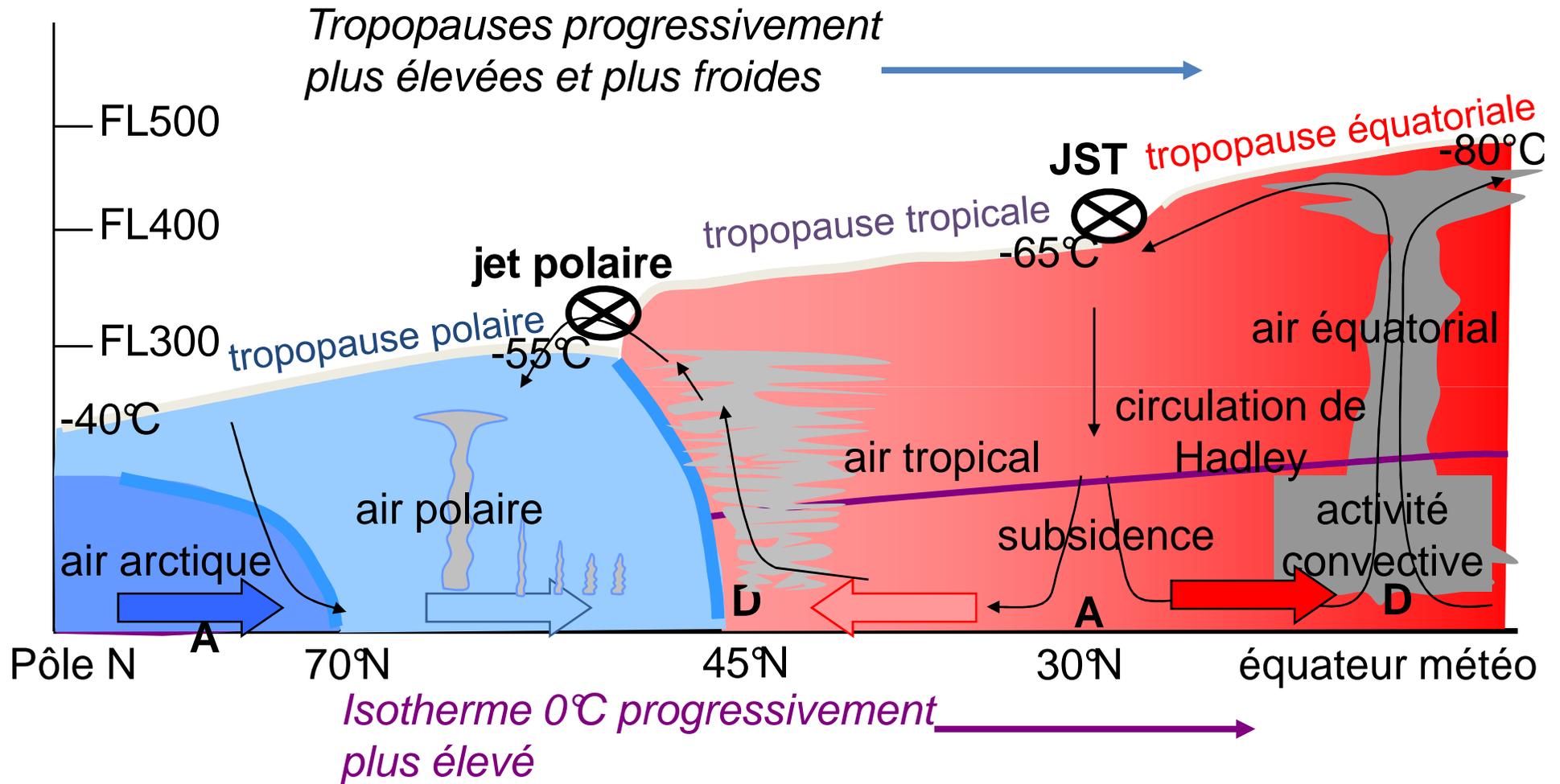
La température n'est pas la température sensible mais la température pseudo-adiabatique potentielle, la θ'_w qui possède d'intéressantes propriétés:

- invariante lors des échanges adiabatiques
- invariante lors de changements de phases de l'eau (hypothèse pseudo-adiabatique)
- différente d'une masse d'air à une autre
- constante dans une masse d'air homogène
- très lentement variable dans le temps dans une masse d'air donnée.

La représentation classique et pratique est celle de l'émagramme 761



Approche géographique





Evolution des masses d'air.

Deux grandes familles peuvent se détacher.

D'un côté, les évolutions de type **thermique** :

- Réchauffement / refroidissement à la base
- Changement de nature des sols (ex : terre -> mer)
- *Ne pas tenir compte de l'évolution diurne (non synoptique et cyclique)*

De l'autre, les évolutions de type **dynamique** :

- Ascendances de grande échelle
 - Zones frontales
 - Humidification
 - Homogénéisation
- Subsidence de grande échelle
 - Assèchement
 - Stabilise (peut faire apparaître une inversion)



Evolution des masses d'air. Evolution thermique

Les masses d'air évoluent. Elles sont influencées par le milieu sur lequel elles circulent.

- Une masse d'air qui évolue par refroidissement à la base devient :

Radiative, symbole **R**.

On la trouve dans les anticyclones continentaux l'hiver ou presque toute l'année aux pôles.

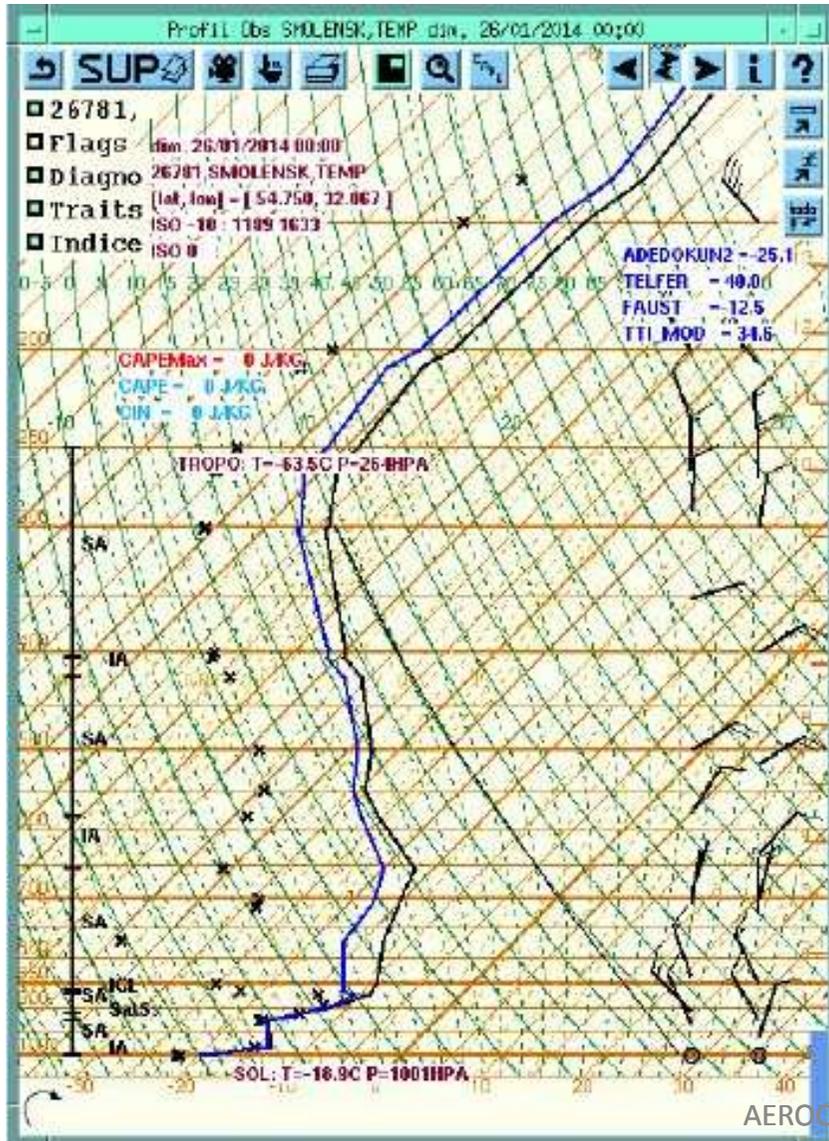
-Une masse d'air froide qui évolue par réchauffement à la base devient :

Convective, symbole **C**.

On la trouve, entre autres, dans les circulations méridiennes vers le sud lorsque de l'air polaire entame son trajet vers des latitudes plus tempérées au-dessus des océans. Elle est typique du temps de traine.



Evolution des masses d'air. Evolution thermique Radiatif : refroidissement à la base



Où trouve-t-on cet air radiatif :

- Loin des systèmes perturbés près d'un **anticyclone thermique** d'hiver, au dessus d'un continent (pôles, Canada, Europe du nord, Sibérie...).

- Lors d'une vague de froid sur la France, par flux d'E ou NE (anticyclone de Sibérie..)
Quelquefois, à l'avant d'un front chaud ou sous une occlusion, après une période froide.

Nuages stratiformes si saturé : brouillards ou Sc.

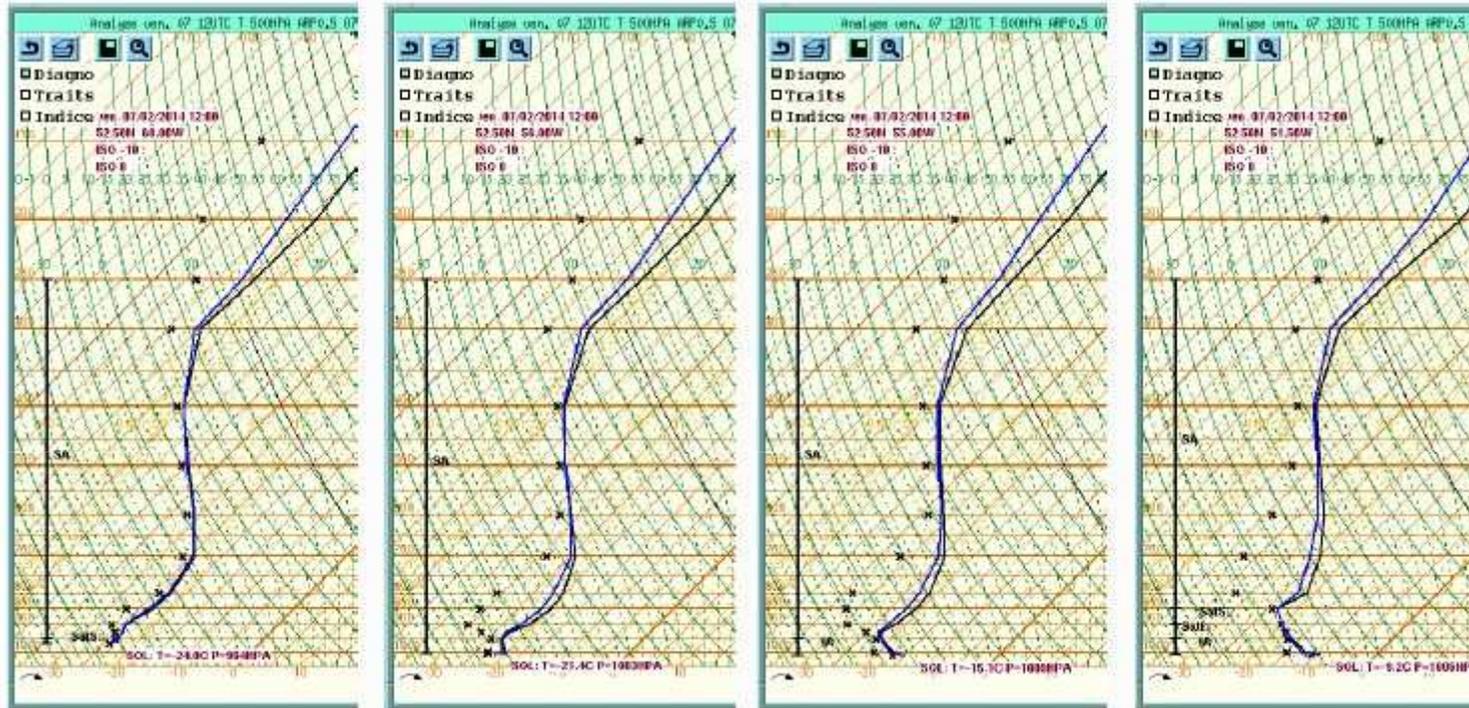
Remarque :

A ne pas confondre avec une simple inversion de surface nocturne qui, comme son nom l'indique, disparaît en journée !...



Evolution des masses d'air. Evolution thermique

Convectif : convection en air froid (C) : réchauffement par la base



La convection s'établit progressivement par réchauffement à la base (instabilisation de la masse d'air)

Ce processus est en général lié au passage d'une masse d'air froide continentale sur une surface maritime.

Cette masse d'air peut ensuite être transportée, gardant des caractéristiques instables par présence d'air froid en altitude

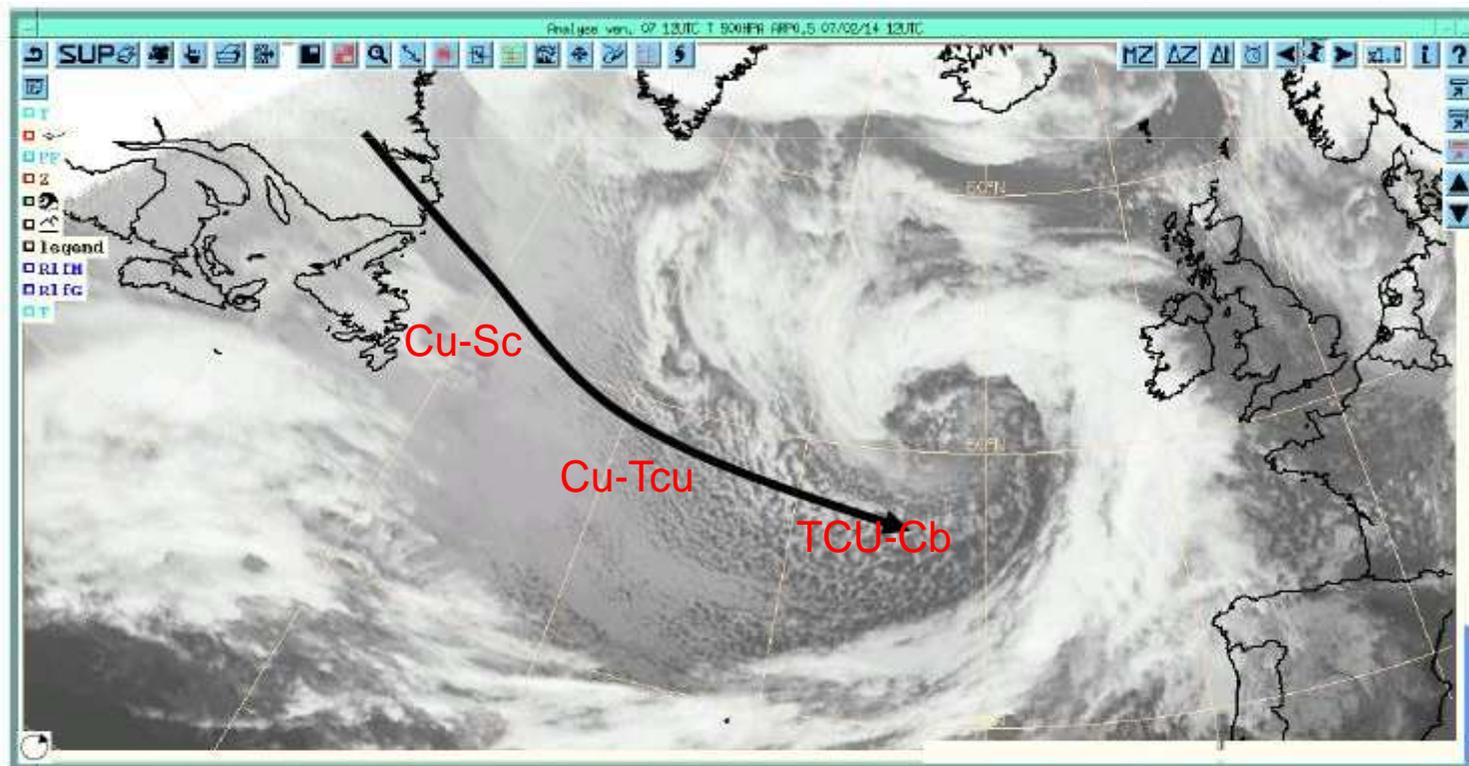


Evolution des masses d'air. Evolution thermique

Convectif : convection en air froid (C) : réchauffement par la base

Où trouve-t-on préférentiellement ce type d'air?

- A l'arrière des perturbations, dans les traînes
- Dans l'air frais / froid
- Dans les zones de basses T à 500 hPa
- En mer / océan lors de vagues de froid (réchauffement par la base)



passage d'une masse d'air radiative à une masse d'air convective de plus en plus profonde
masse d'air continentale hivernale se réchauffant de plus en plus par la base



Evolution des masses d'air. Evolution thermique

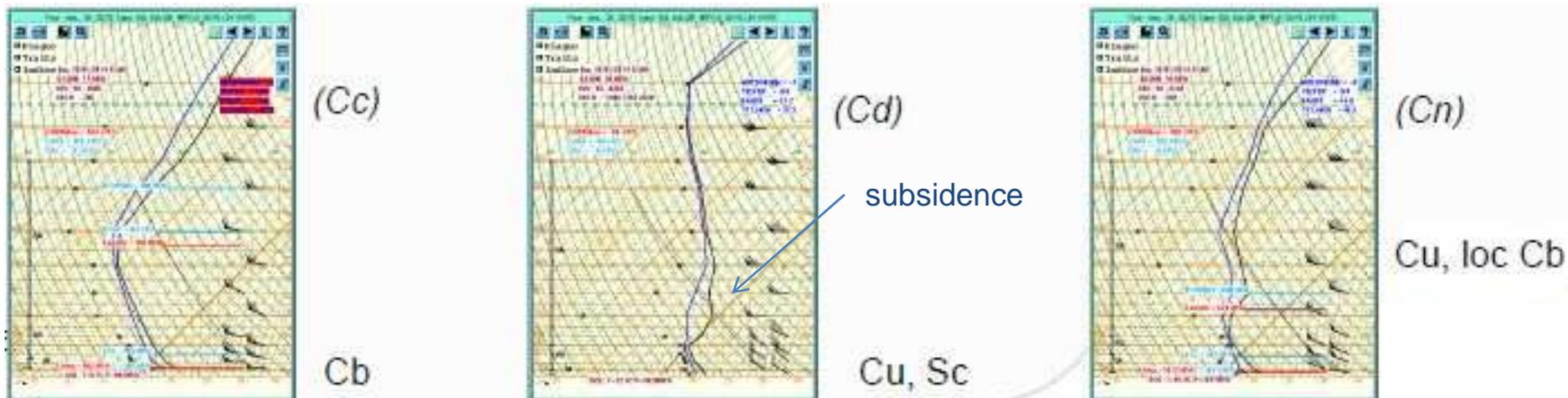
Convectif : convection en air froid (C) : réchauffement par la base

Une masse d'air convective en air froid peut être soumise à des facteurs de plus grande échelle :

– Ascendances / Air froid (dynamique) d'altitude \Rightarrow convection profonde en air froid accentuée par le cyclonisme, type Cc (cu, sc, souvent CB ; shra/sn, tsra)

– Subsidences \Rightarrow convection peu profonde en air froid, tendance allant même jusqu'à l'apparition d'une couche d'inversion : type Cd (cu, sc loc shra/sn)

Dans les cas intermédiaires, on pourra la qualifier de convection modérée en air froid, type Cn (cu, tcu, CB ; shra/sn)

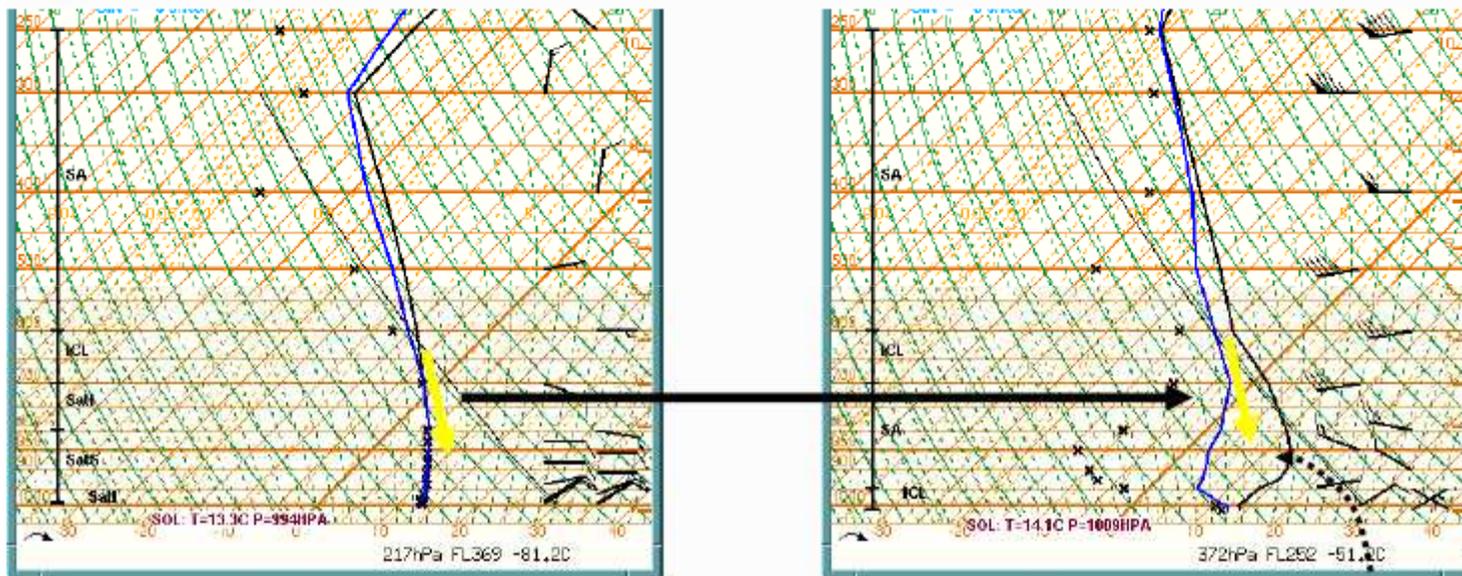




Evolution des masses d'air.

Evolution dynamique. Mouvements verticaux prépondérants.

Mouvement subsident



- réchauffe et « assèche » (écarte les courbes d'état et bleue)
- stabilise la masse d'air
- tend à créer une couche d'inversion (RS en forme de « sapin de Noël »)



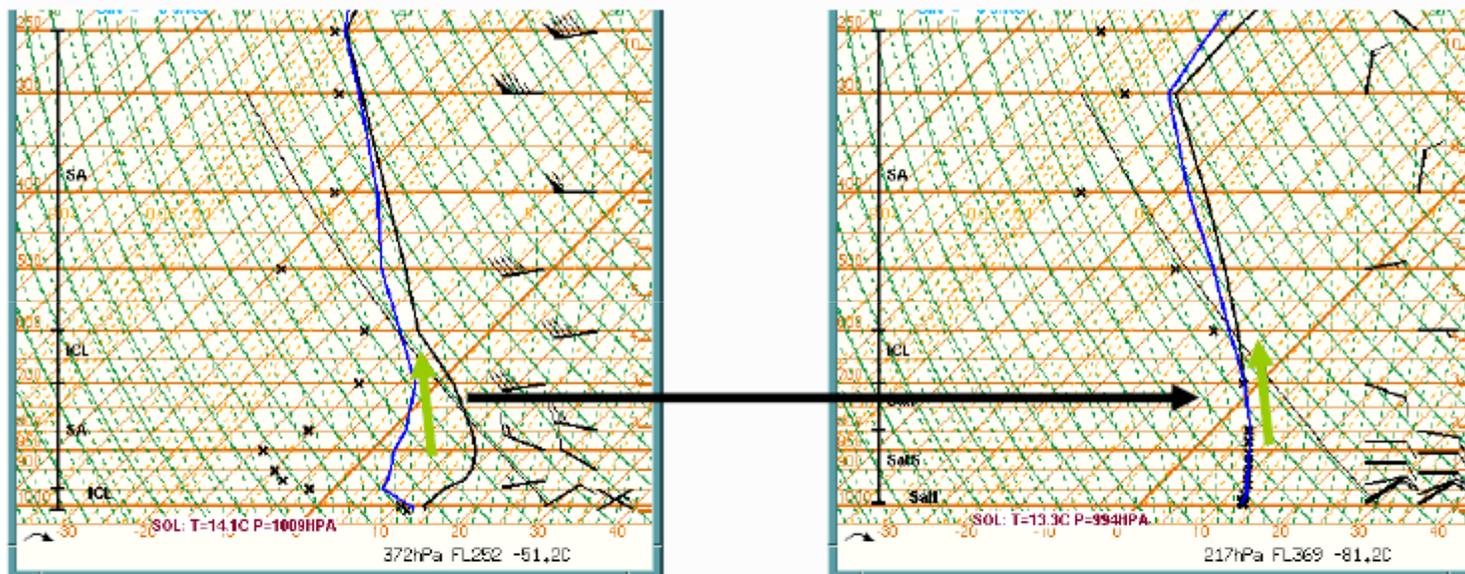
- **MAIS** les basses couches peuvent rester humides sous l'inversion (surtout en hiver ou sur mer)



Evolution des masses d'air.

Evolution dynamique. Mouvements verticaux prépondérants.

Mouvement ascendant



- doux et humide (rapproche les courbes d'état et bleue)
- si précipitations, tend à homogénéiser la masse d'air



Evolution des masses d'air.

Synthèse des mouvements verticaux : masse d'air cinématique type K

- Une masse d'air soumise aux mouvements ascendants synoptiques et aux mouvements subsidents devient respectivement :
 - **Ascendances** \Rightarrow masse d'air de **CORPS** (cinématique de mélange - Km) (st,sc,As,Ci ; dz/ra/sn)
 - **Subsidences** \Rightarrow masse d'air **SUBSIDENTE** (cinématique divergente - Kd) (skc, loc br/fg hiver)

anticyclone
(Kd)

Corps de perturbation
(Km)

Air sec

Forme « Sapin de Noël »



Homogène
Dans un monde idéal, aligné sur une iso- θ'_w
(homogénéisation liée aux précipitations)

Masses d'air douces
AÉROCLUB ACAT - RENÉ BARBARO



Evolution des masses d'air.

Evolution thermique et dynamique des masses d'air.

Convection en air chaud.

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

- Thermique : maximum d'air chaud en basses couches
- Dynamique :
 - Air chaud souvent advecté par la circulation synoptique
 - Ascendances rendront la masse d'air plus humide.

Masse d'air typique des orages estivaux ou des situations fortement précipitantes en Méditerranée.

On parle de **Cinématique convergent Kc** (cu , Ac cas, CB ; shra, tsra/ragr)



Evolution des masses d'air.



Différence entre convection profonde en air froid et convection 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 !



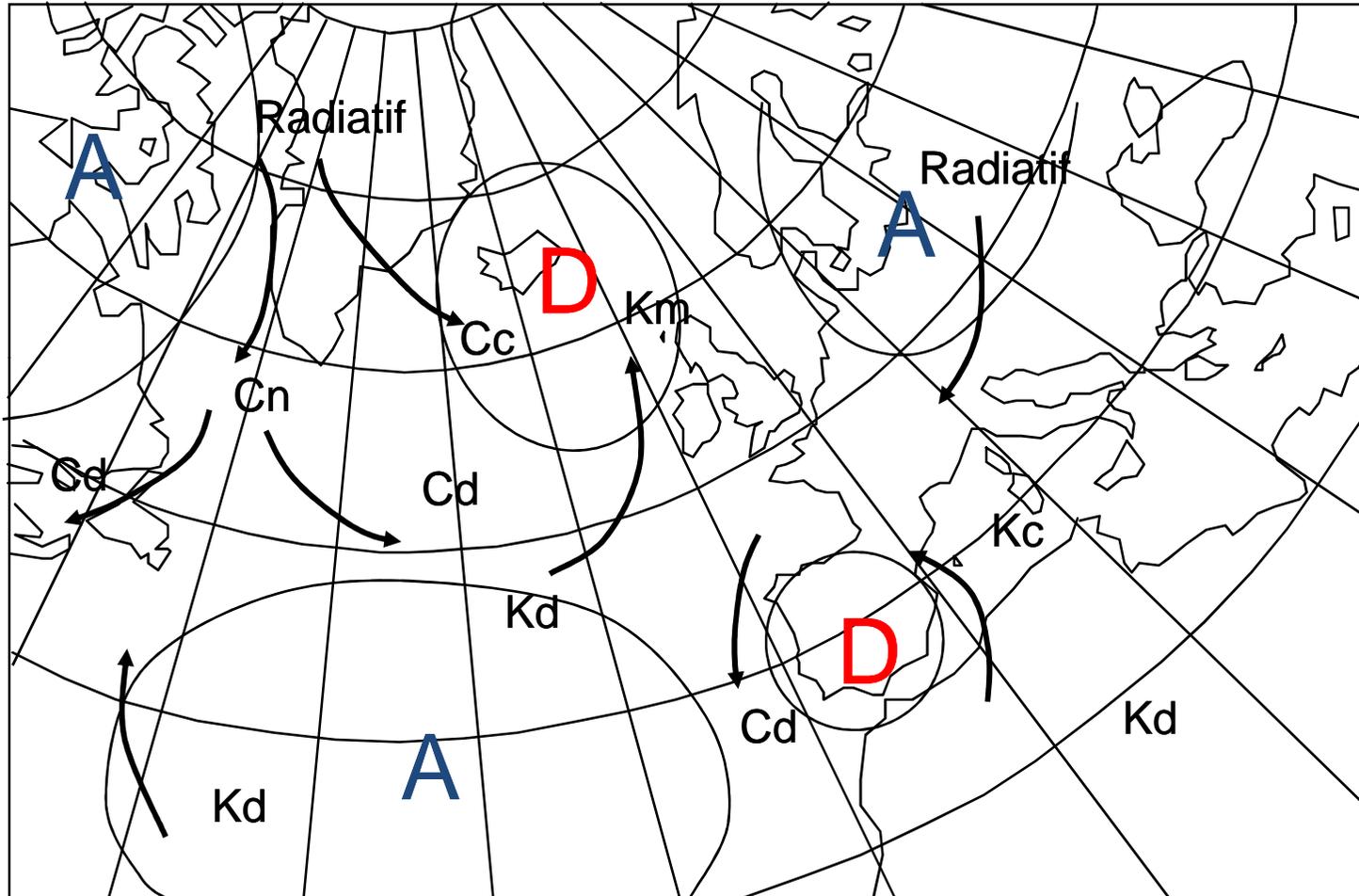
- Air plus froid
- Tropopause plus basse
- Flux à tendance nord
- Souvent plus humide
- Situé dans des zones de minimum relatif en T500 hPa (refroidissement en altitude)
- CAPE souvent plus faible

- Air chaud
- Tropopause plus haute
- Flux à tendance sud
- Souvent plus sec dans les basses couches
- Situé dans des zones de maximum relatif en $\theta'w$ 850 hPa (réchauffement à la base)
- CAPE plus forte



Evolution des masses d'air.

Masses d'air dans la circulation atmosphérique





Evolution des masses d'air.

Masses d'air dans la circulation atmosphérique.

Une autre représentation possible basée sur l'origine et l'évolution.

A : air très froid
En hiver, devenant instable en progressant au-dessus des mers en donnant SN et blizzards. Très basses températures

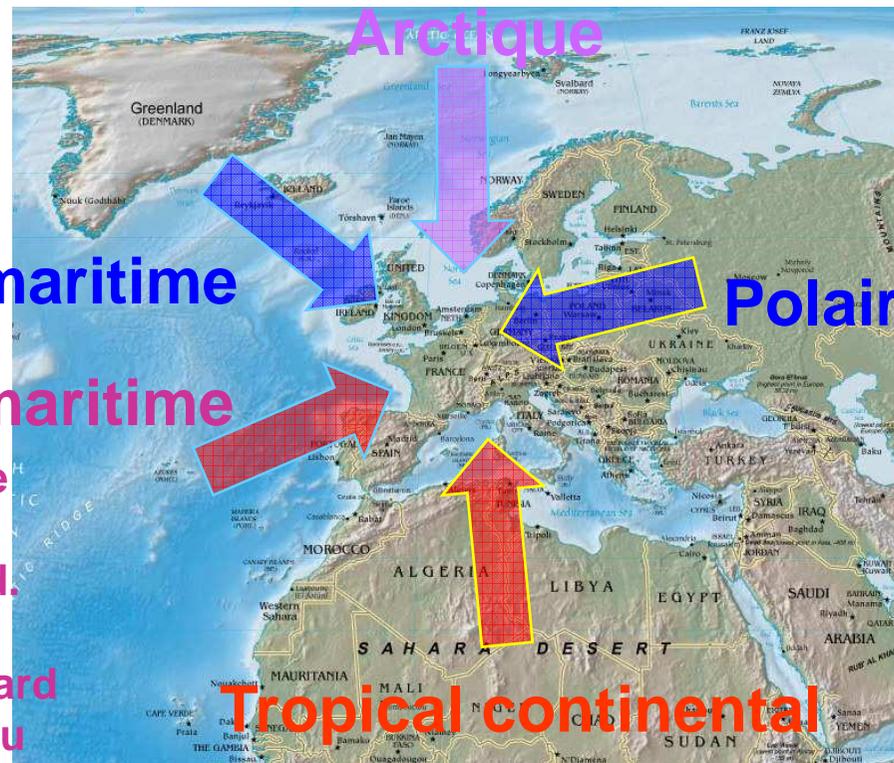
Pm : air froid et humide
Instable dans sa progression vers le Sud.
Traîne, Cu, Cb, SH.

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"



Polaire continental

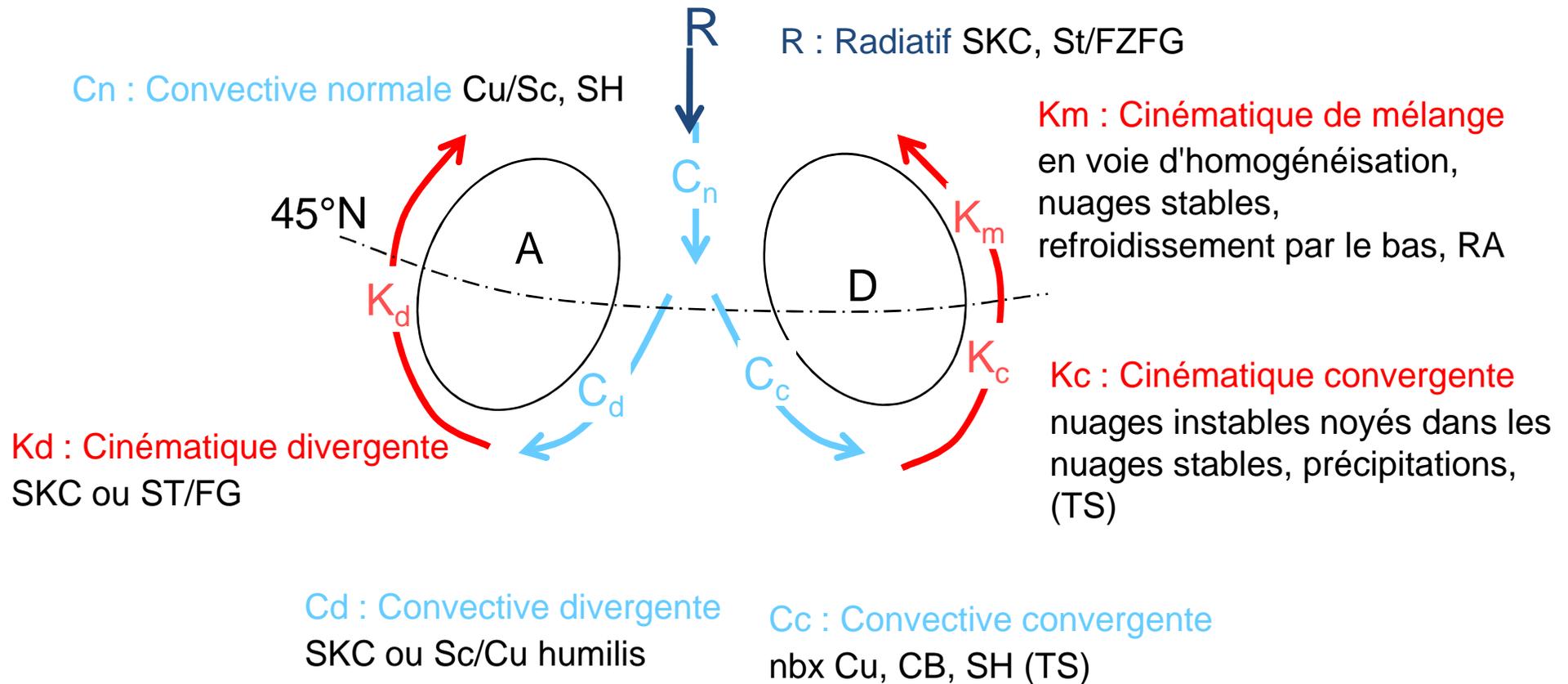
Pc : air froid
En hiver, air très sec sans nuage pouvant s'humidifier en mer et devenir instable (Cu, SH).

Tropical continental

Tc : air chaud et sec
En été, stable sans nuage.
Humidification sur la mer (BR, St, Sc).
Transport de sable possible.

Champs de pression des régions tempérées et mouvements verticaux :

- Dépression \Rightarrow convergence (c) \Rightarrow ascendance
- Anticyclone \Rightarrow divergence (d) \Rightarrow subsidence





Plan du cours

- 1) L'atmosphère terrestre
- 2) Température
- 3) Pression atmosphérique
- 4) Humidité et Stabilité
- 5) Circulation Générale - Mouvement
- 6) Masses d'air
- 7) Perturbations synoptiques des zones tempérées



Qu'est ce qu'une perturbation?

Dans l'atmosphère idéale, il existerait une relation plutôt stable entre le champ de température, froid au nord et chaud au sud, et le champ de pression qui en découle (rappelez-vous le lien entre température et pression).

Dans cette atmosphère idéale et aux latitudes tempérées (30/70°), le vent serait toujours d'ouest à vitesse quasi-constante aussi bien en surface qu'en altitude.

Or il arrive que ce bel équilibre se rompe sous l'effet de phénomènes de grande échelle (quasi-planétaire) et dont l'étude n'est pas l'objet ici.

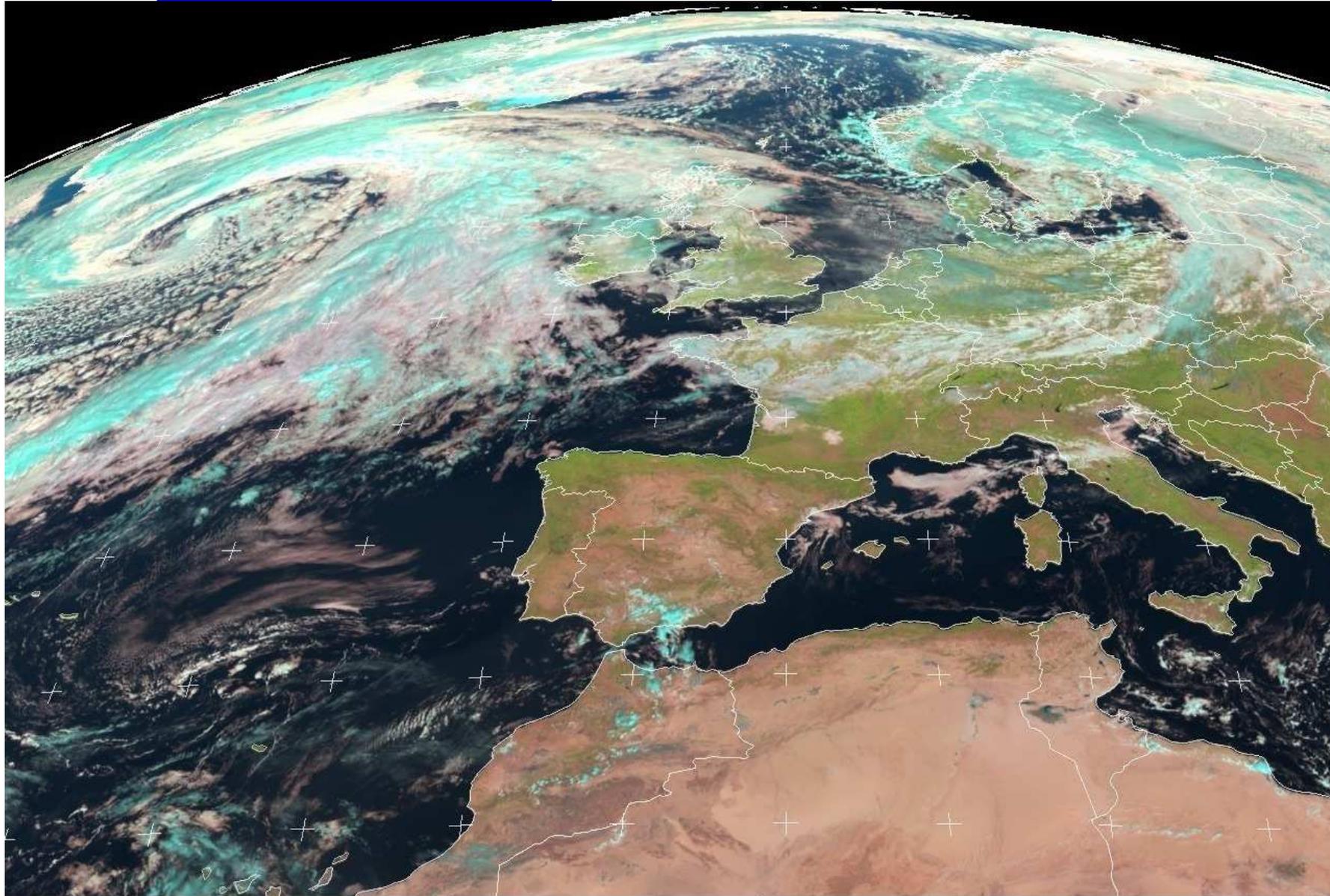
Ces déséquilibres vont amener à la formation des dépressions dont l'influence sur le champ de vent vont amener une nouvelle configuration du champ de température.

On va donc voir essentiellement le résultat, naissance et vie des perturbations.

On verra aussi ce que sont les fronts et les phénomènes météorologiques associés et importants pour l'aéronautique.



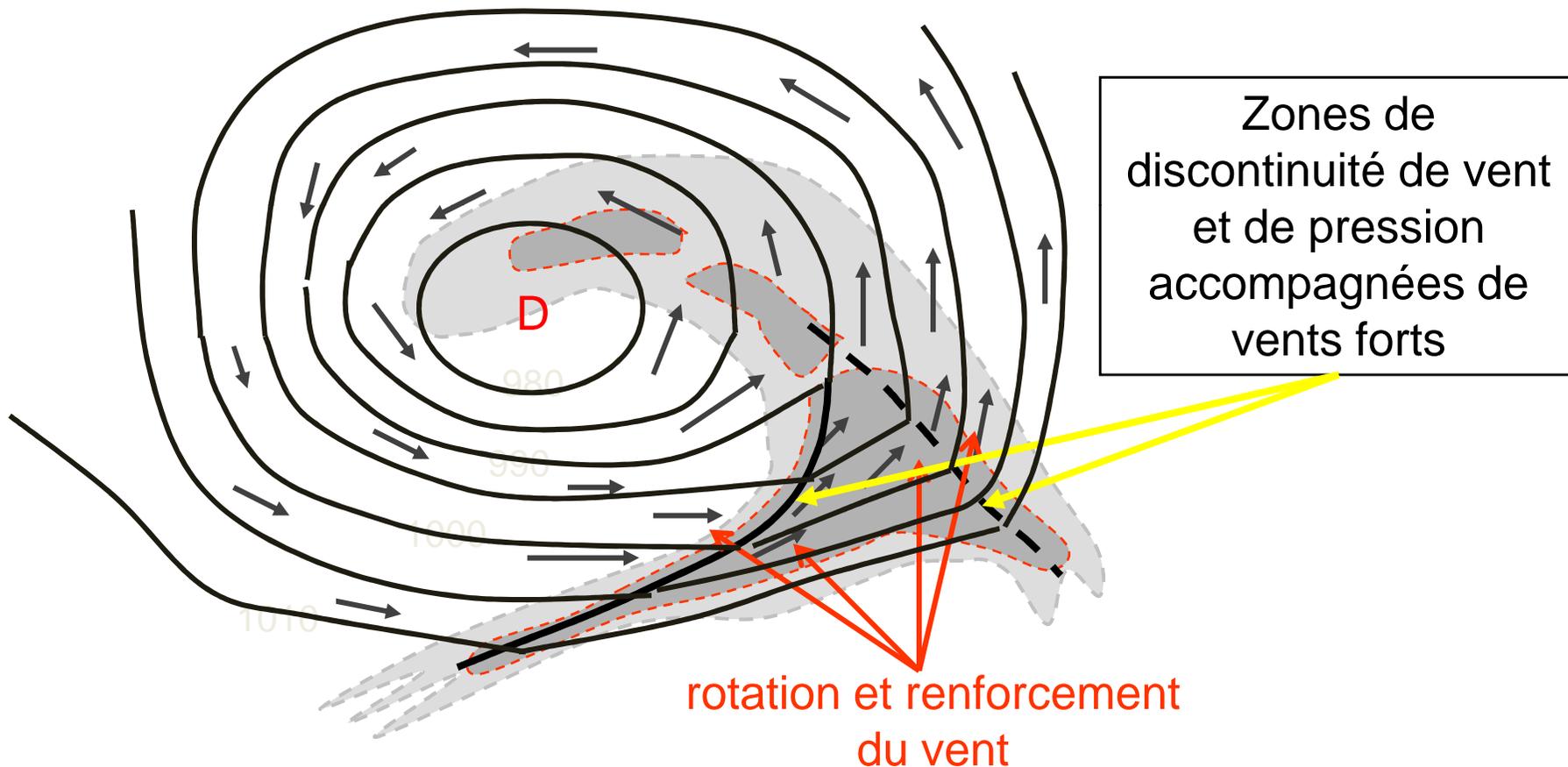
Perturbations





Morphologie des dépressions : vue de dessus

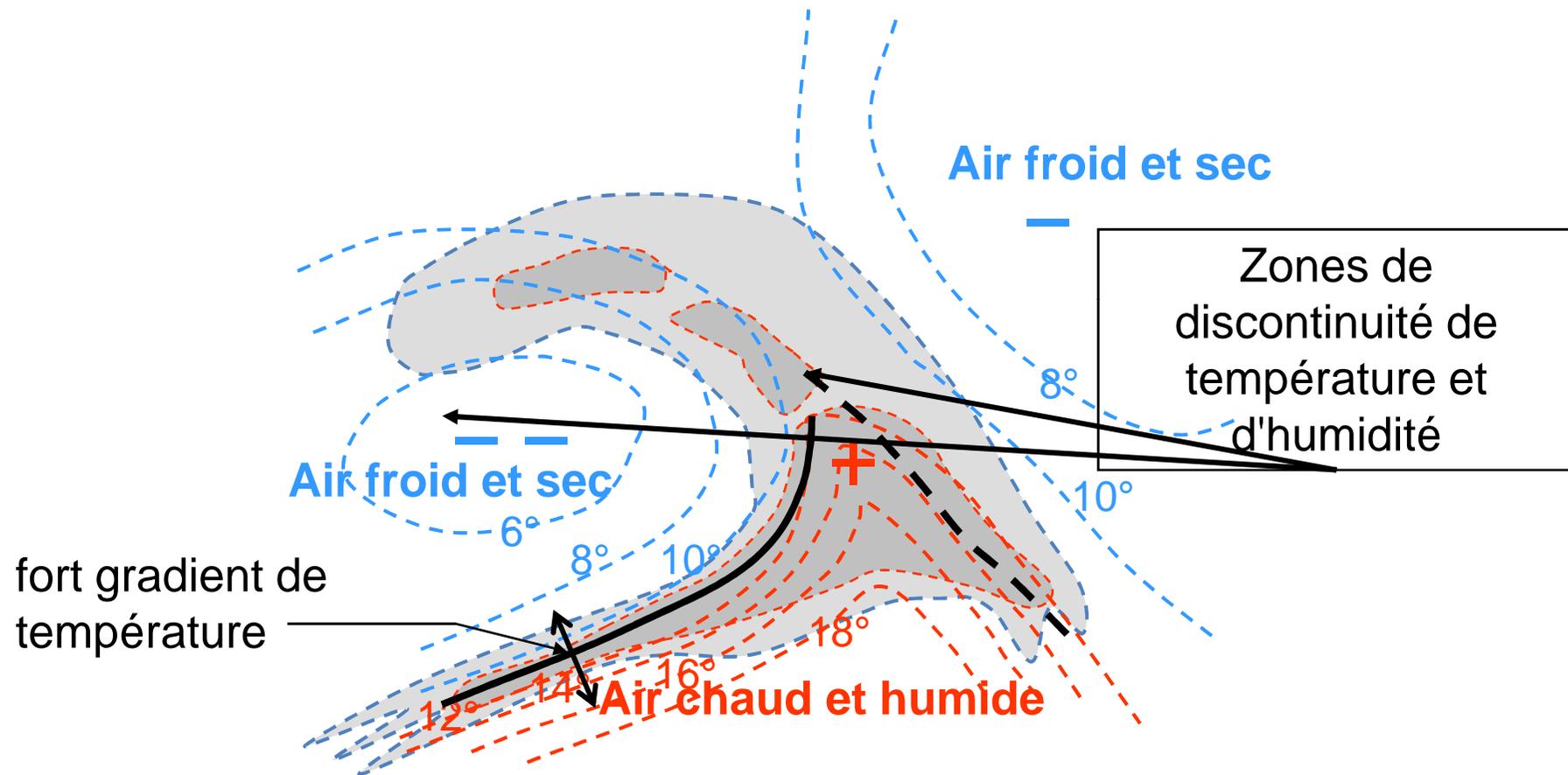
Distribution en surface de la pression et du vent





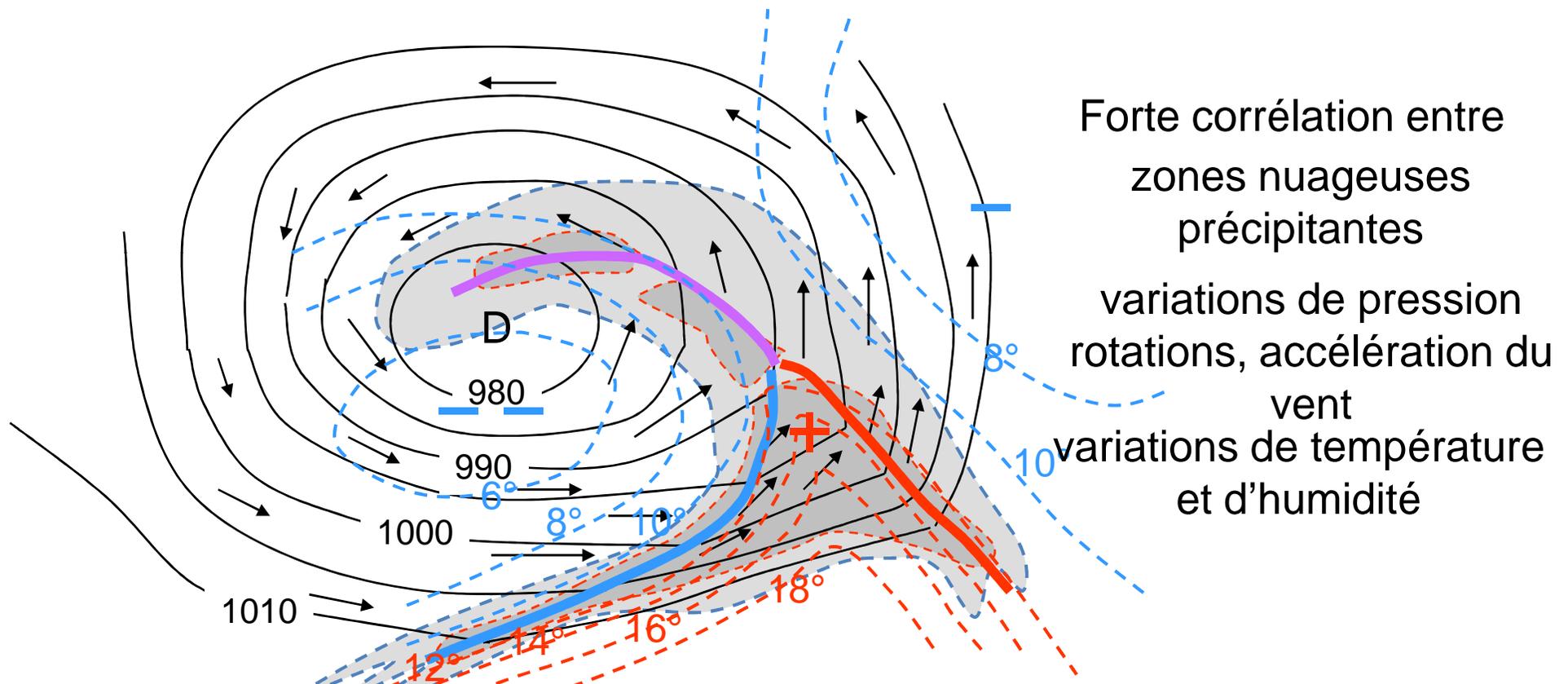
Morphologie des dépressions : vue de dessus

Distribution en surface de la température et de l'humidité (t_d)



Morphologie des dépressions : les fronts

Résumé des caractéristiques d'une dépression



Forte corrélation entre zones nuageuses précipitantes

variations de pression rotations, accélération du vent

variations de température et d'humidité

tout un ensemble de caractéristiques se trouvent concentrées dans des bandes étroites spiralant vers le minimum de pression

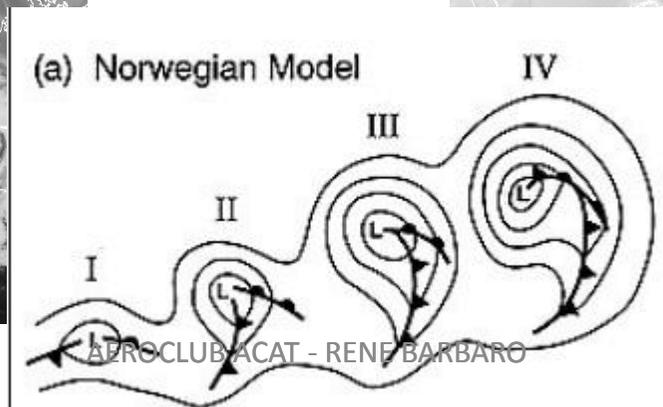
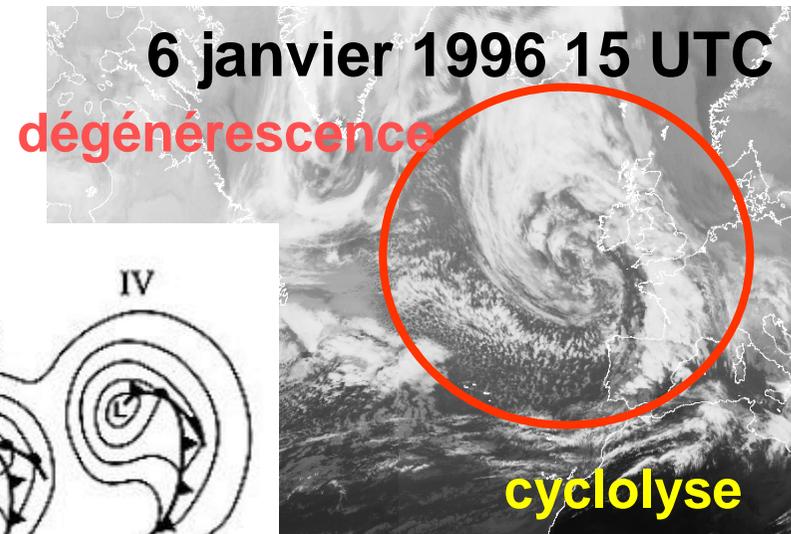
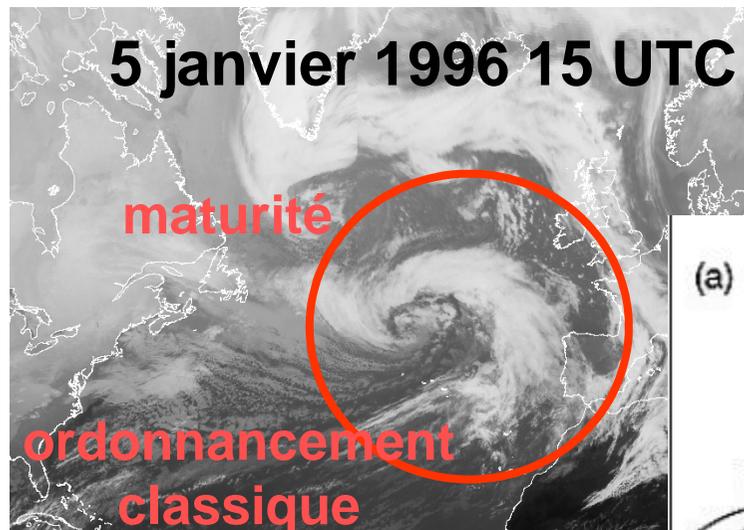
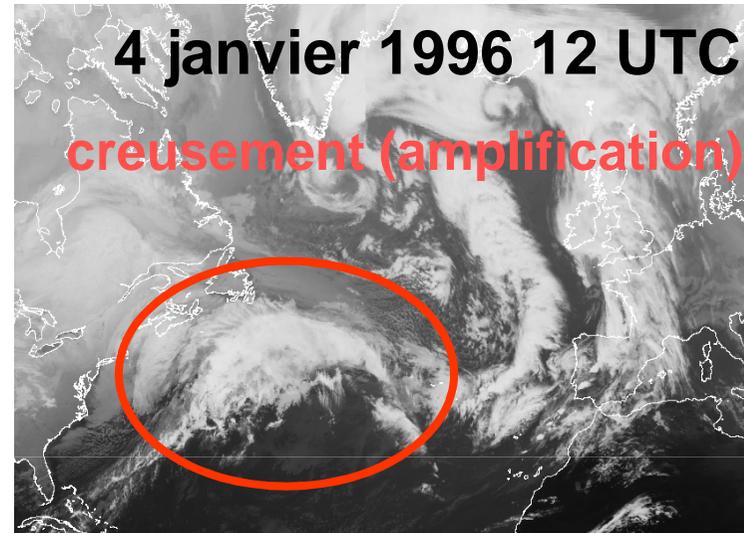
une ligne, un simple trait peut suffire à synthétiser cet ensemble ⇒ **le front**



Morphologie des dépressions

Perturbations

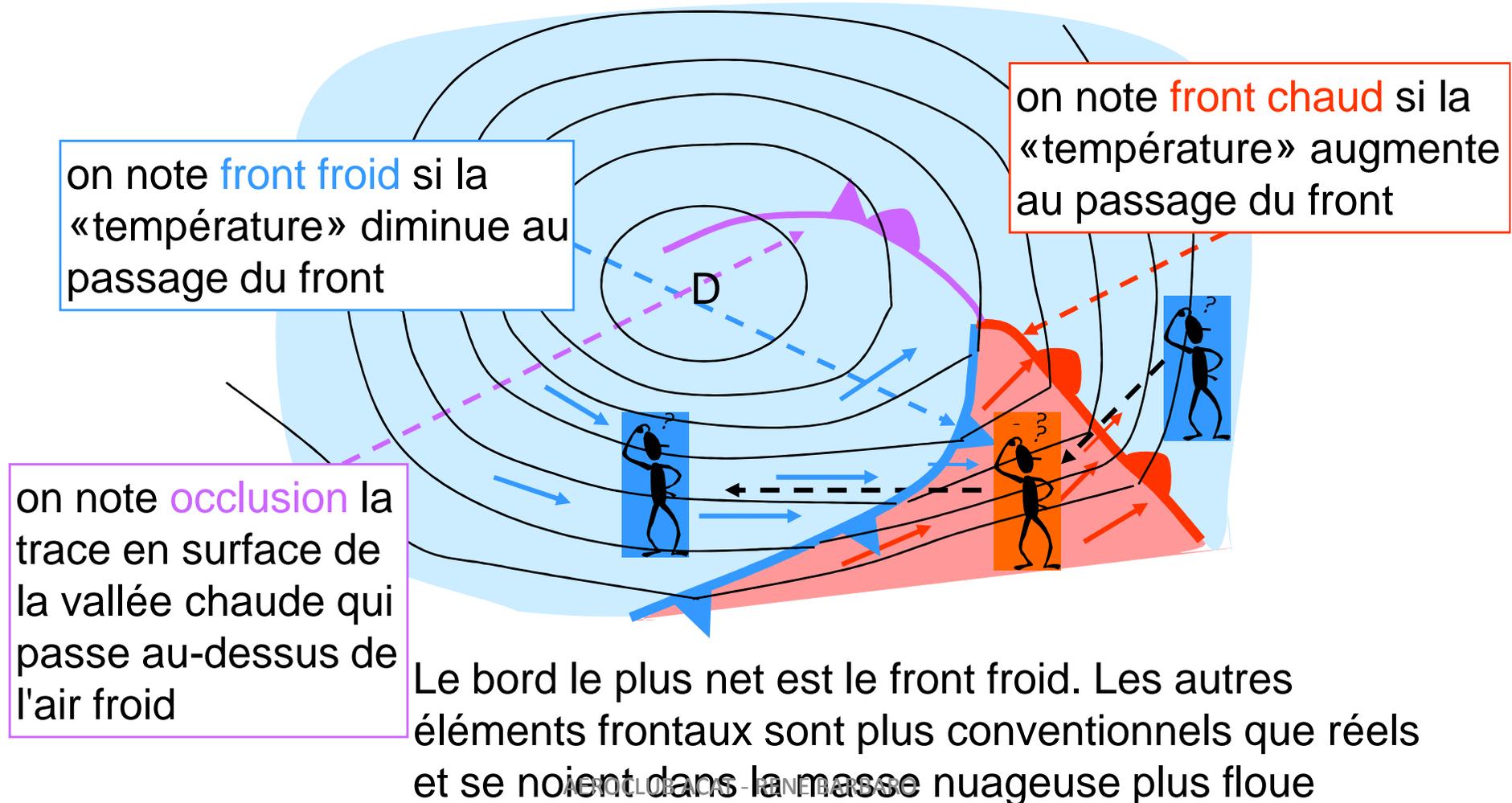
Naissance et vie d'une dépression





Symbolisme & identification

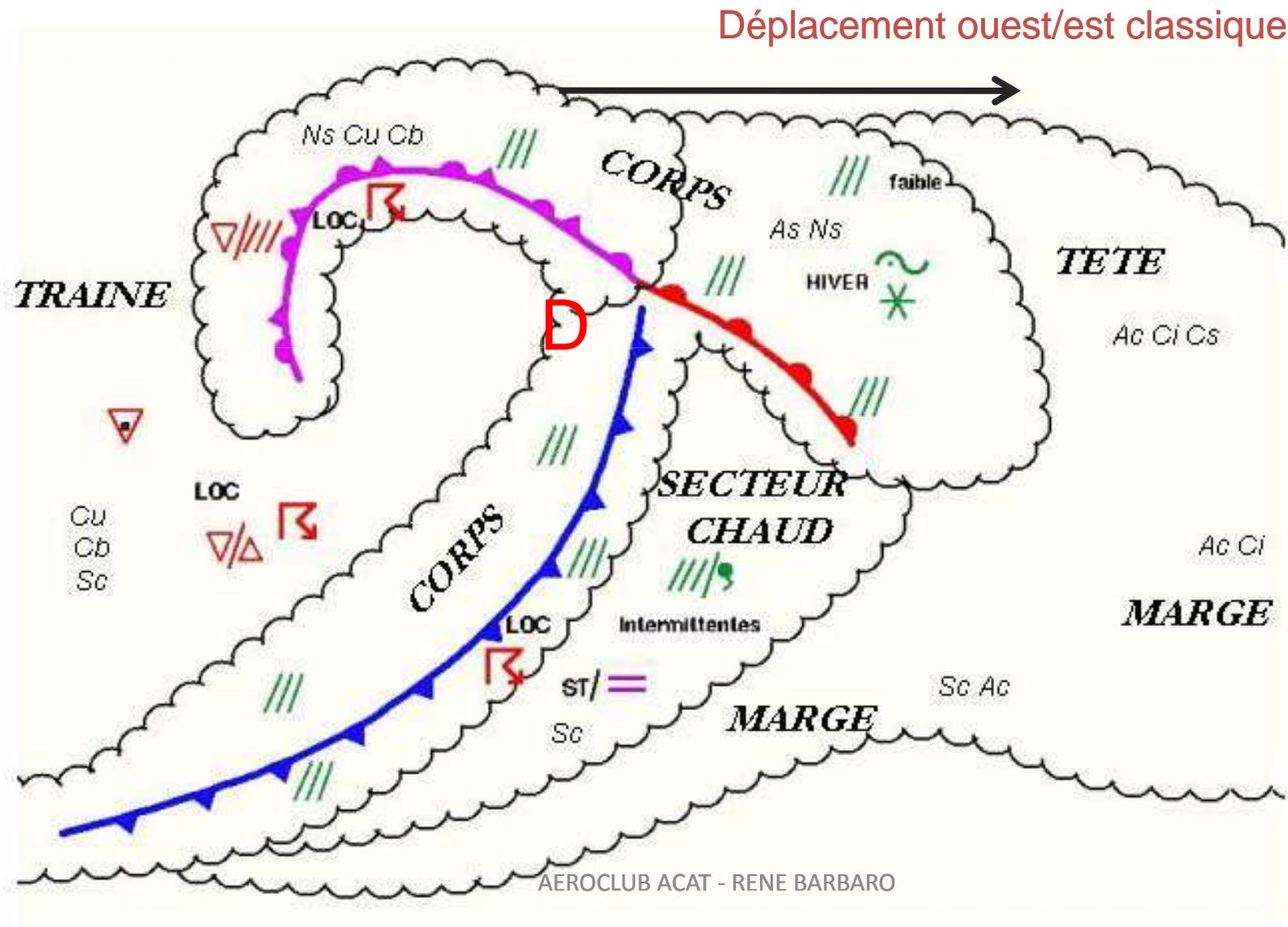
- Les fronts sont des zones de discontinuité de température et de vent en surface s'accompagnant de précipitations et de vents

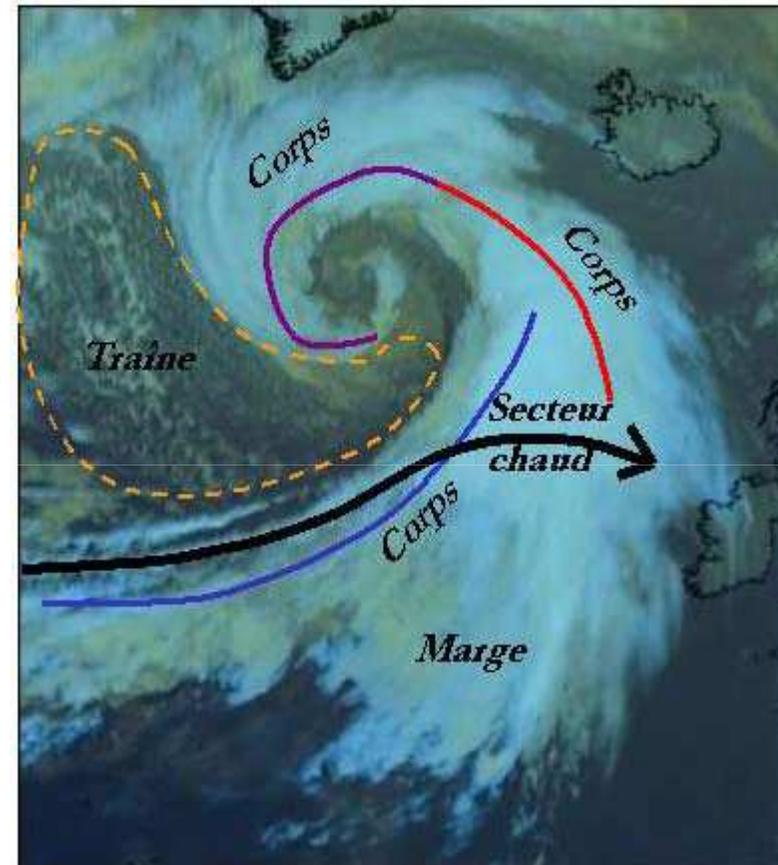
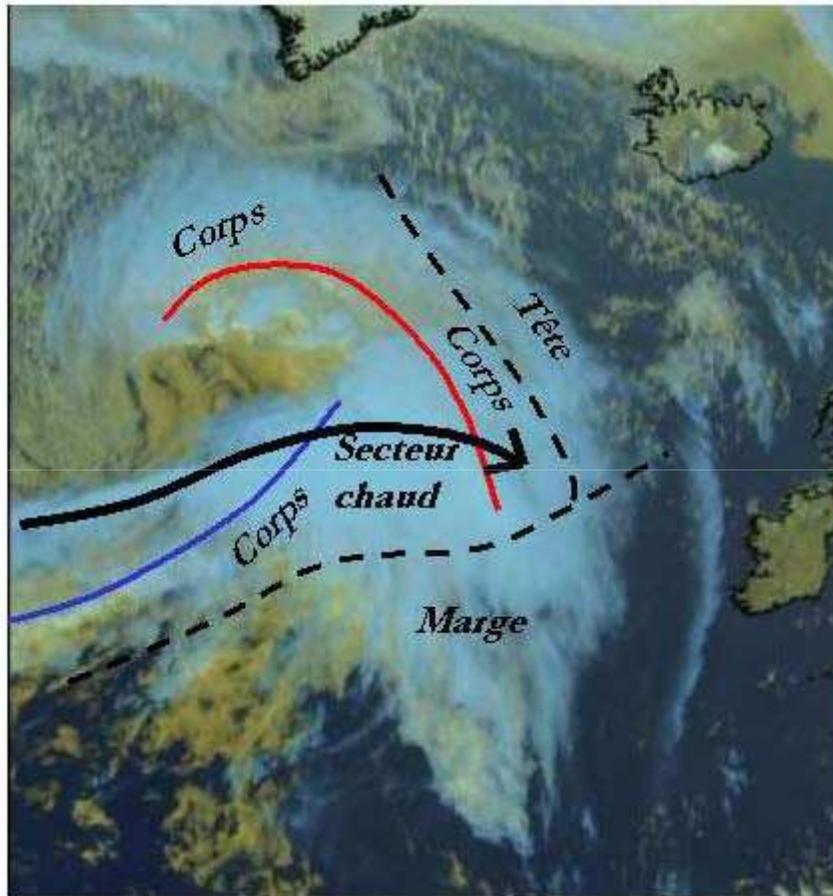




Perturbations

Les différents secteurs nuageux et temps sensible associé dans une perturbation synoptique arrivant en phase de maturité.

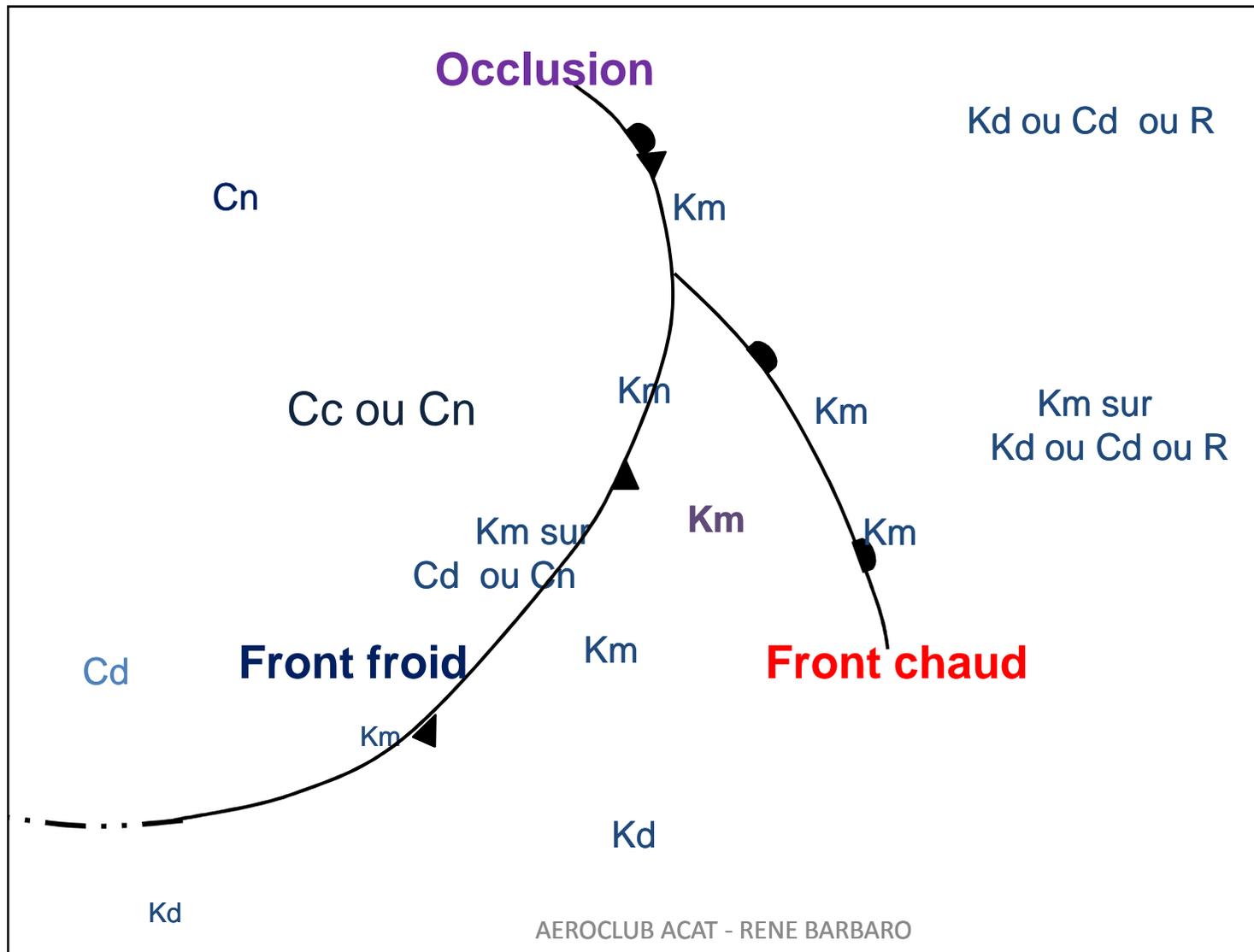




Un cas réel de perturbation synoptique barocline : images composition colorée Meteosat 9 du 8 octobre 2008. À gauche, image de 12 h UTC. À droite, image de 22 h UTC. Les différents secteurs nuageux sont mentionnés, ainsi que la position des fronts (rouge : front chaud, bleu : front froid, violet : occlusion) et du jet d'altitude (flèche en trait noir épais). Les nuages bas apparaissent en ocre jaune, les nuages élevés en blanc.



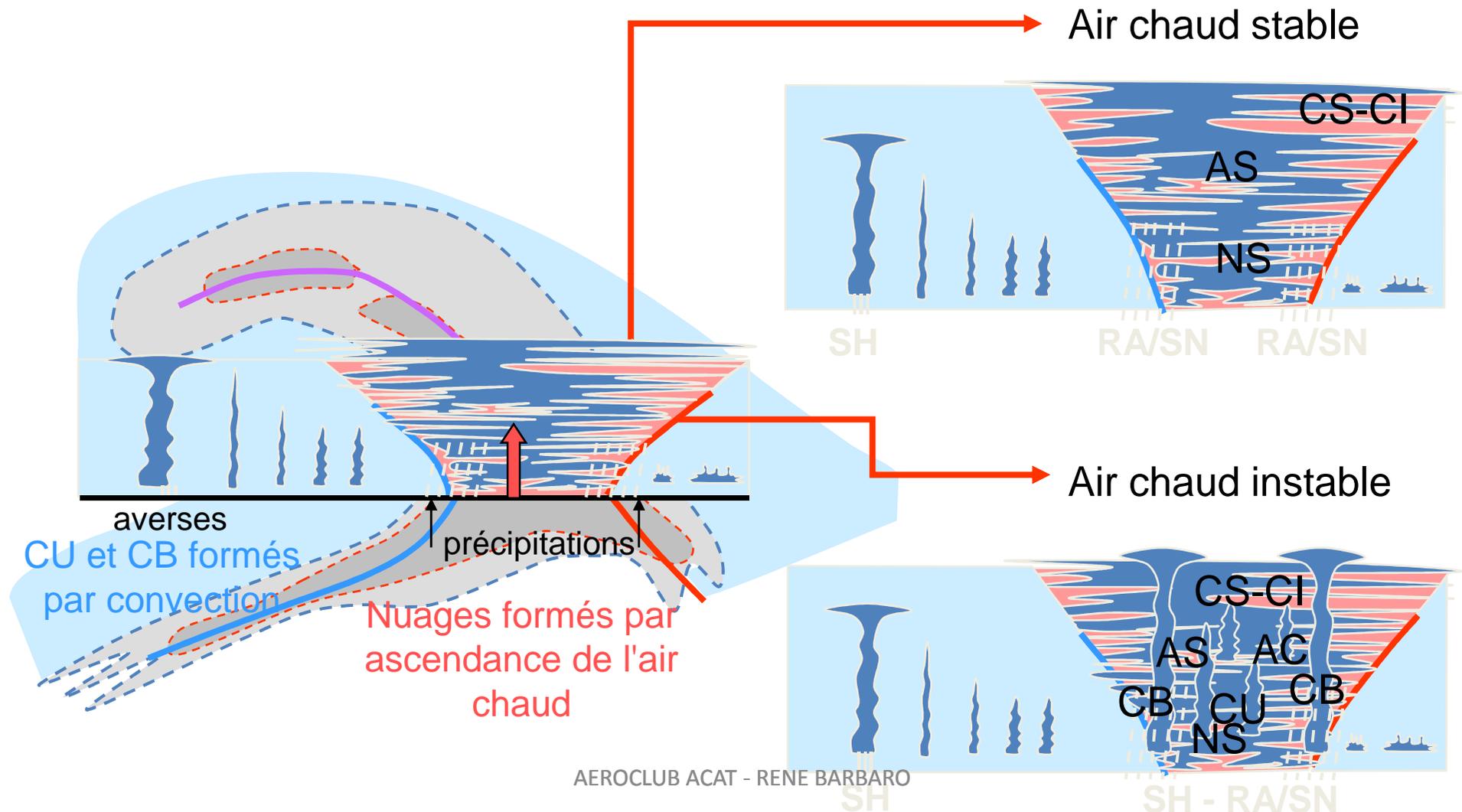
Les différentes masses d'air présentes dans une perturbation synoptique arrivant en phase de maturité (air chaud stable).





Frontologie

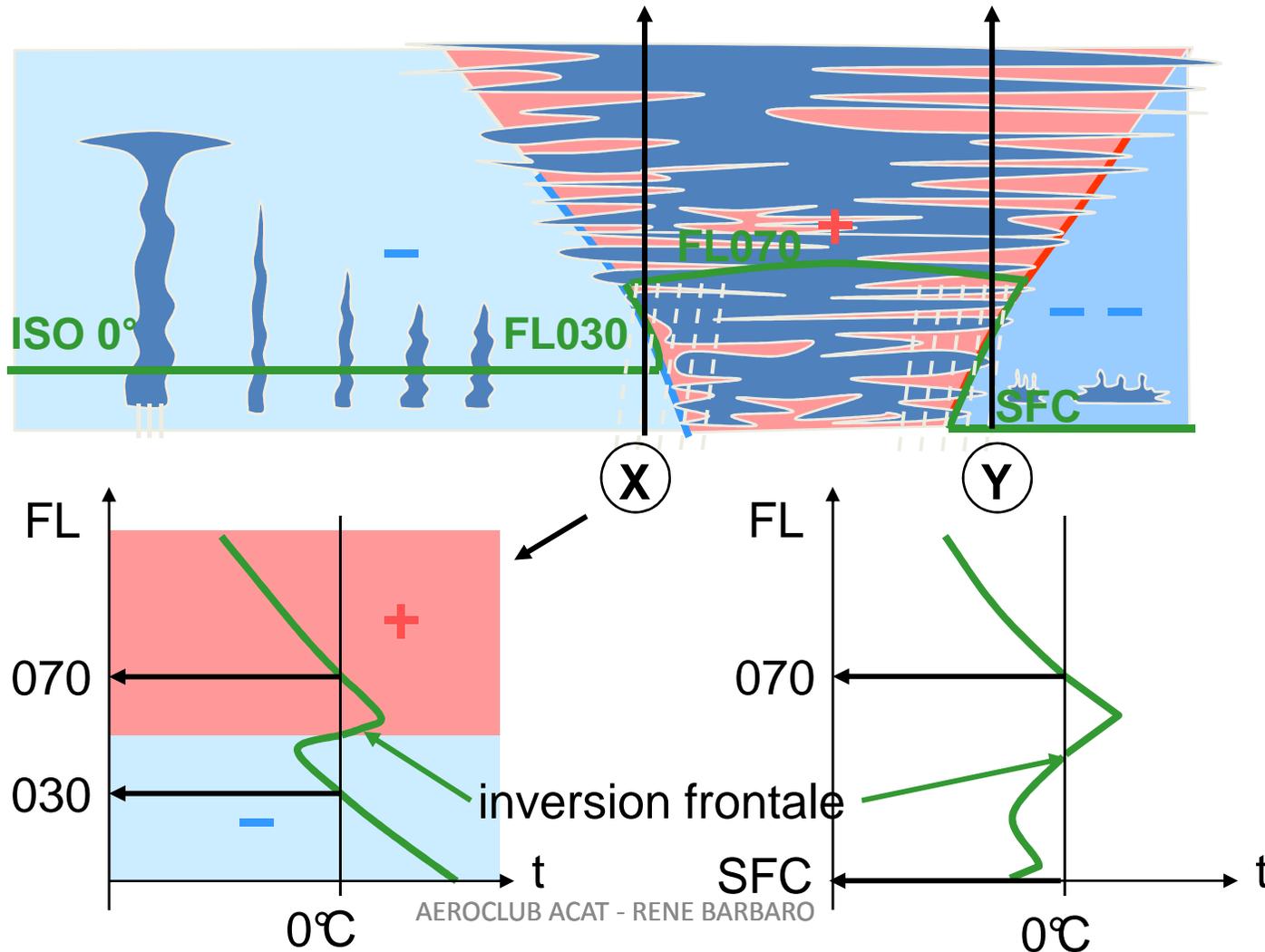
Coupes verticales





Structure thermique des fronts

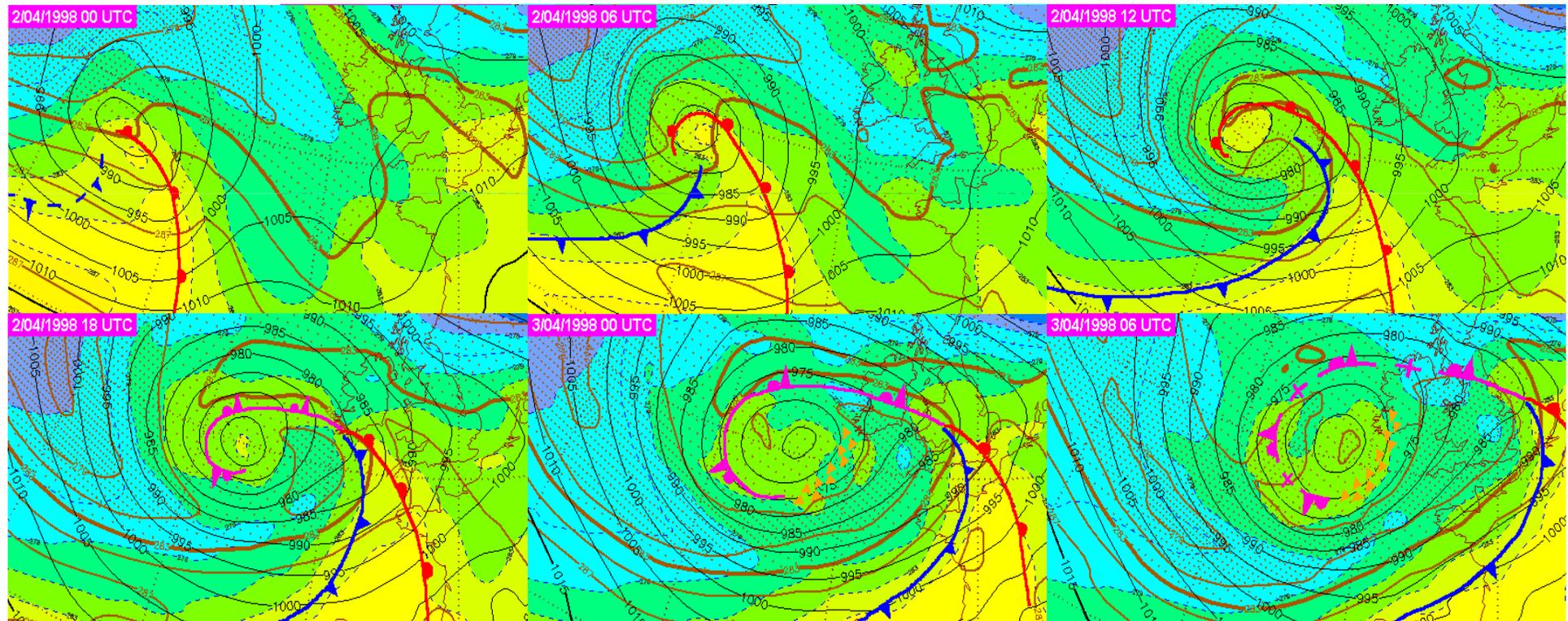
L'isotherme 0°C





Evolution dans le temps d'une perturbation

Évolution de la température et de la pression en 36 heures

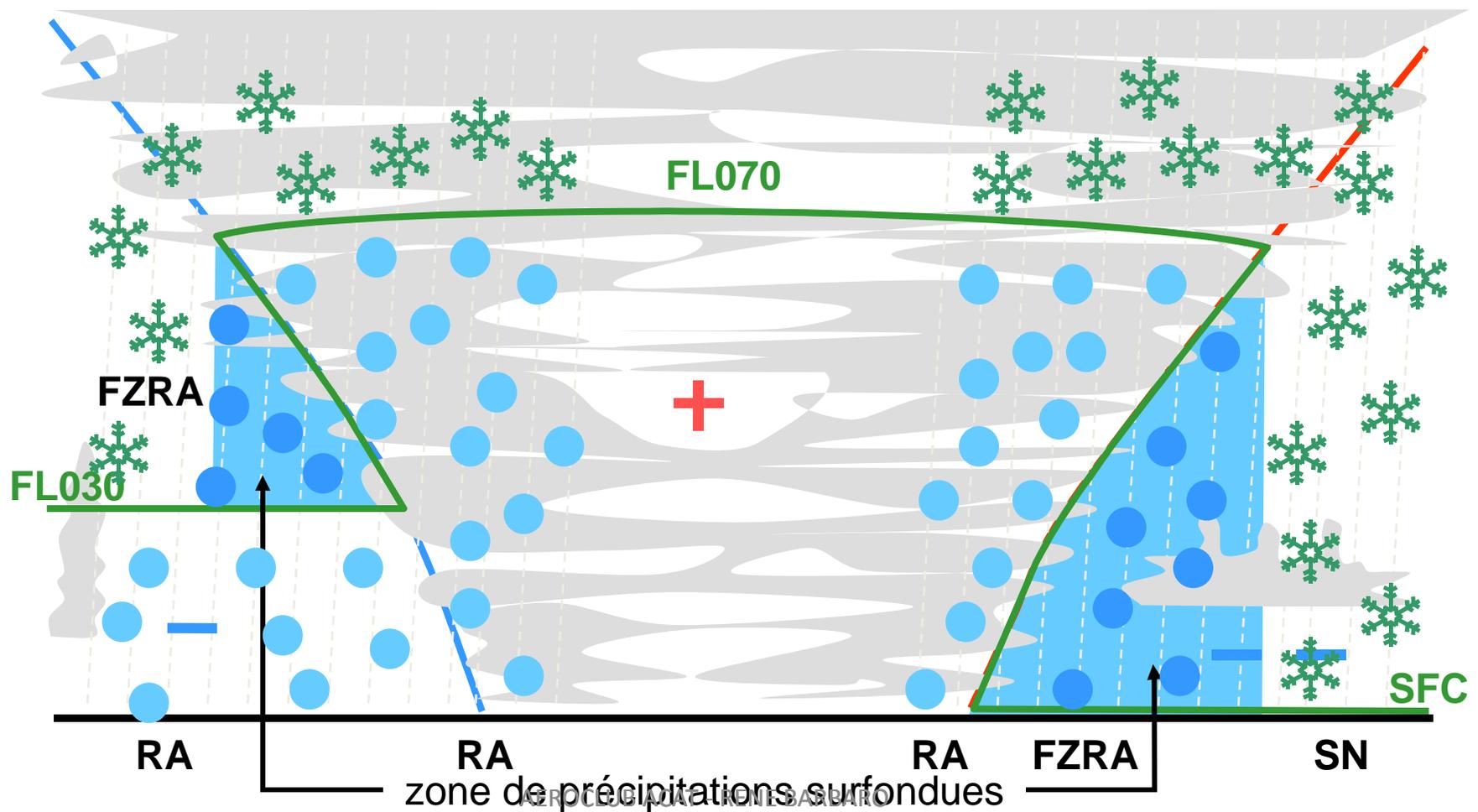


— pression niveau mer — isohypses 700 hPa
..... épaisseurs (températures moyennes) 1000-700 hPa



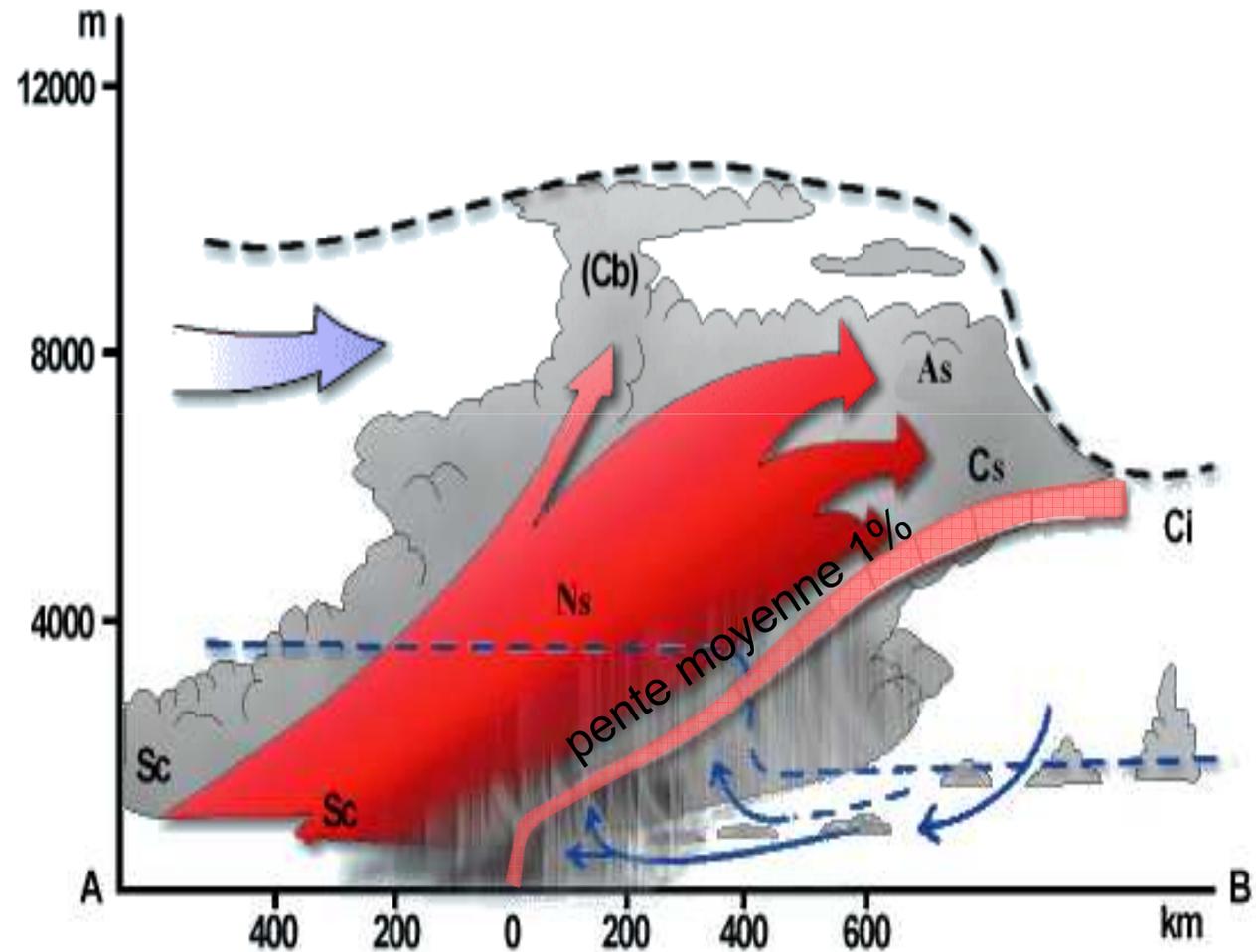
Fronts: Détail des précipitations

Les précipitations surfondues : givrage potentiel des structures.



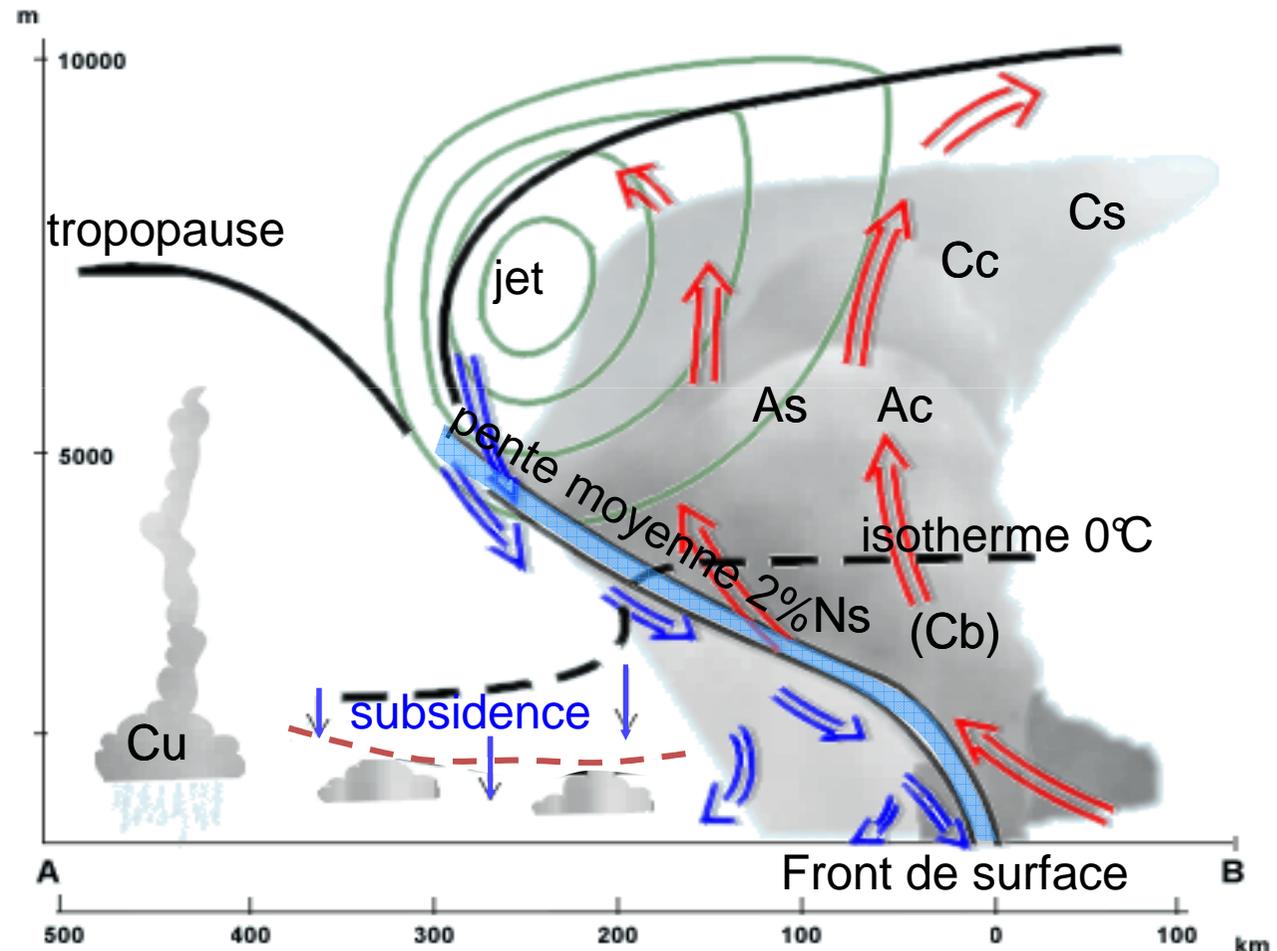
Détails de circulation du front chaud

- les nuages formés par le courant chaud ascendant se développent à l'arrière, au-dessus du front de surface et largement vers l'avant compte tenu d'une pente moyenne moins forte que celle du front froid;
- l'extension vers l'avant des nuages entraîne des zones de précipitations en moyenne plus étendues;
- les zones de précipitations surfondues liées au front chaud sont en conséquence plus étendues sur l'horizontale que celles liées au front froid.



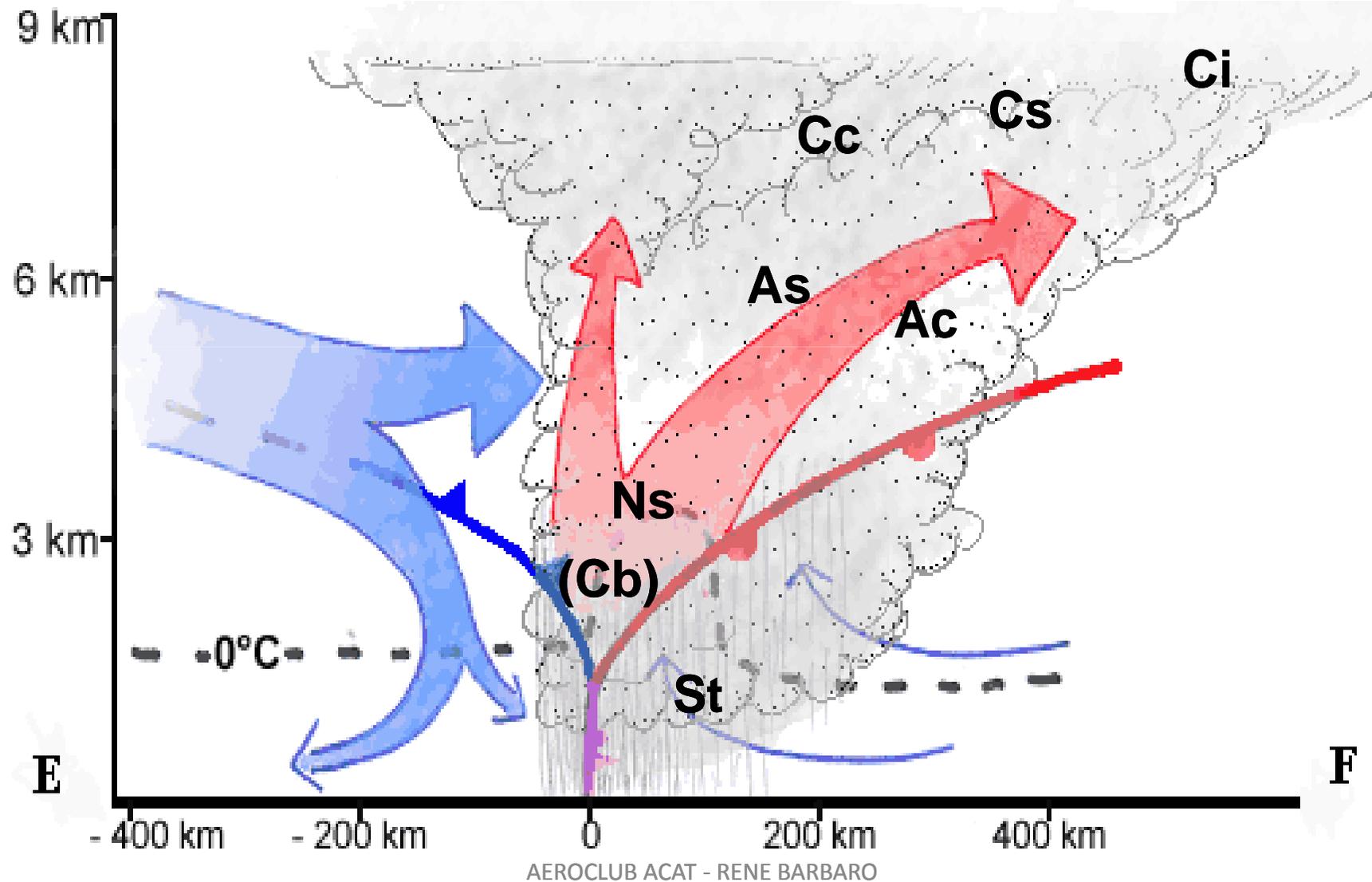
Détails de circulation du front froid

- les nuages formés par le courant chaud ascendant se développent essentiellement au-dessus du front de surface et vers l'arrière;
- la convergence entre l'air froid descendant et l'air chaud ascendant est maximale dans les basses couches;
- à l'arrière des nuages et des pluies liés au front, le mouvement descendant (subsidence) empêche ou limite le développement des nuages de convection dans l'air froid;
- les averses ne peuvent vraiment se développer que plus en arrière.



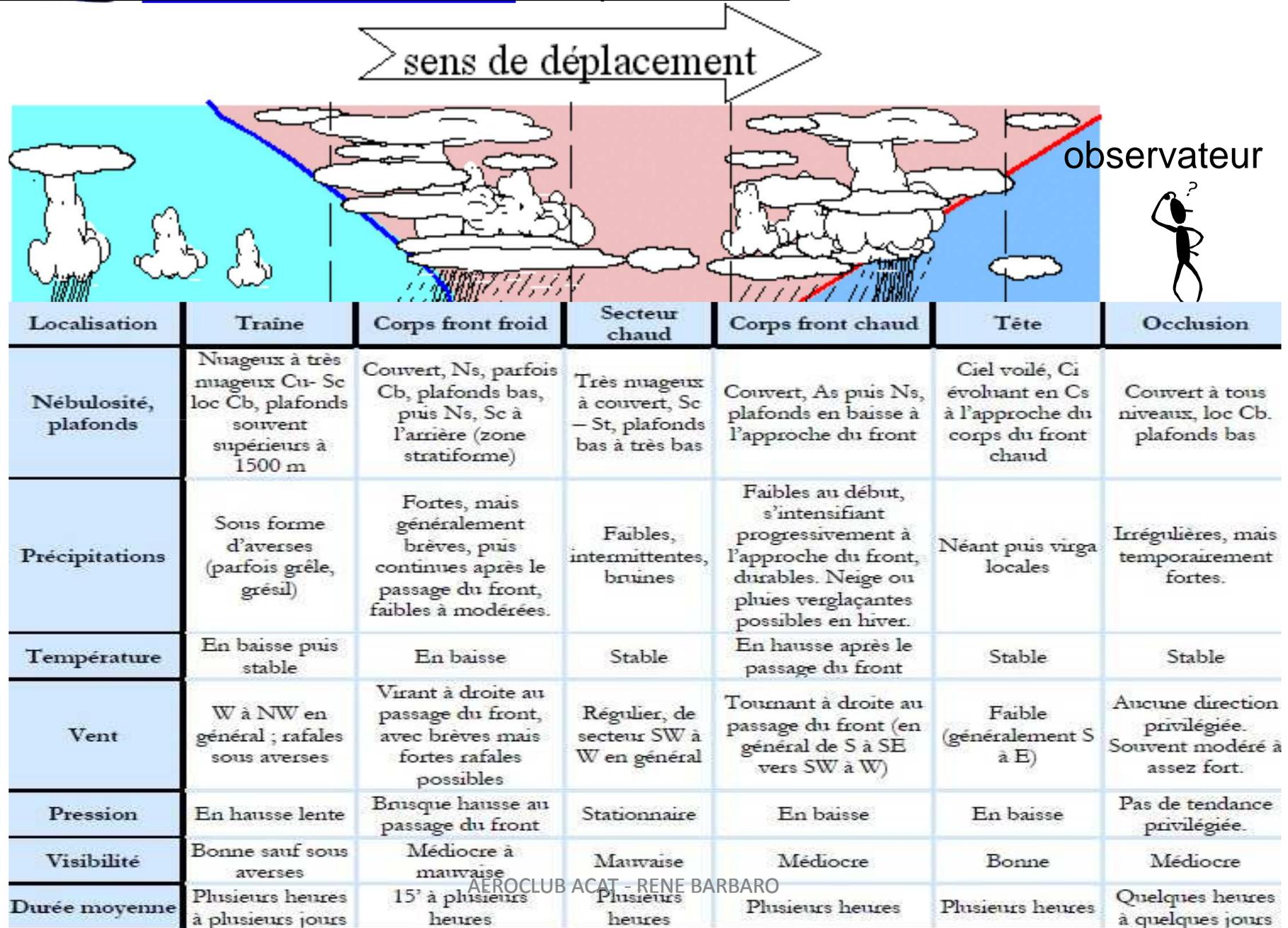


Détails de circulation de l'occlusion



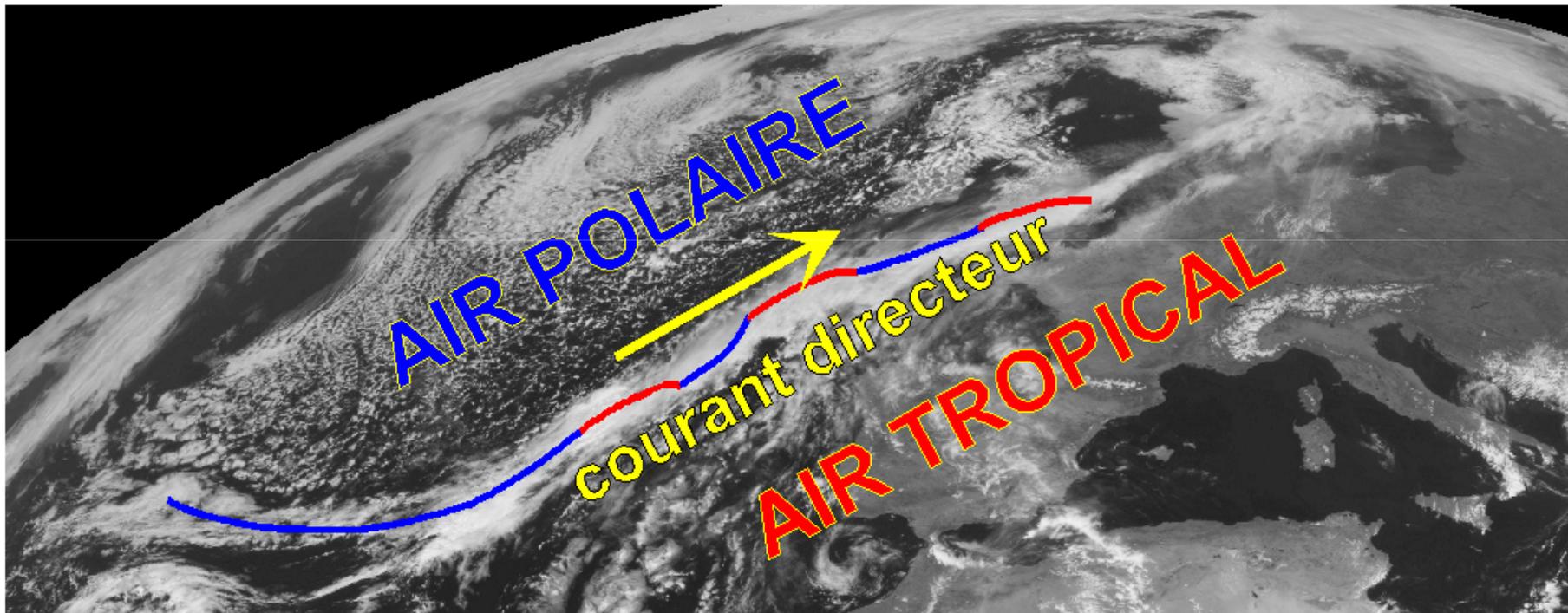


Résumé des variations des différents paramètres





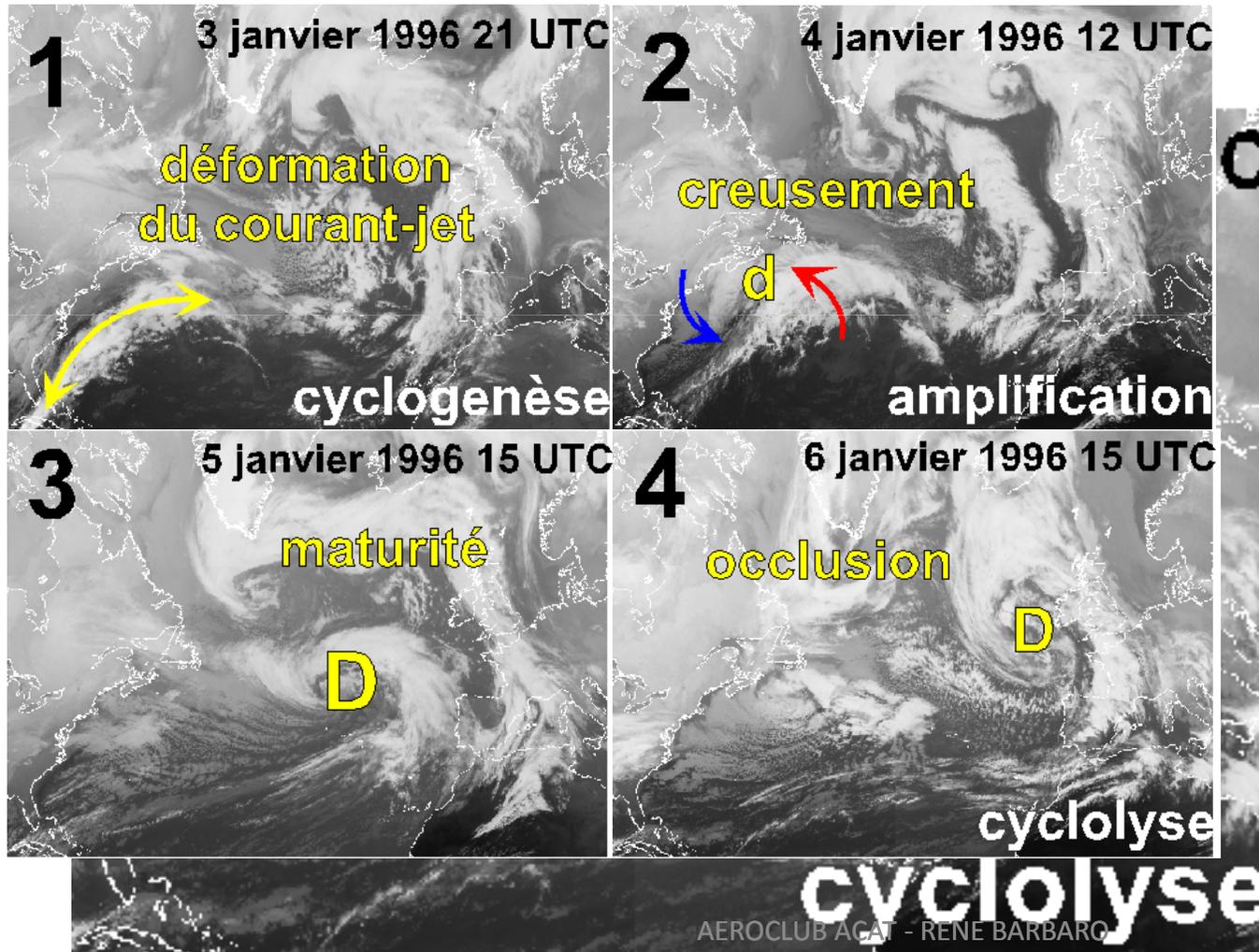
Front ondulant ou stationnaire





Evolution dans le temps d'une perturbation

Vue satellite

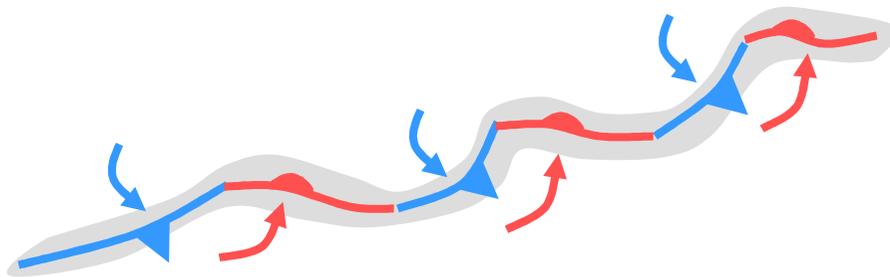


Evolution horizontale d'une perturbation classique : elle se forme au large de l'Amérique du Nord et traverse l'Atlantique en trois jours, passant successivement par les phases d'amplification, de maturité et de dégénérescence

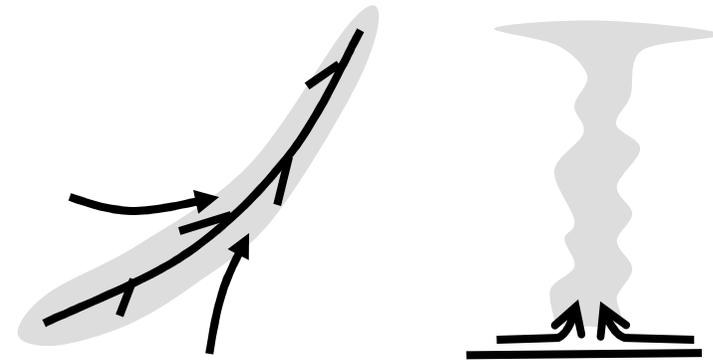


Vocabulaire complémentaire conventionnel

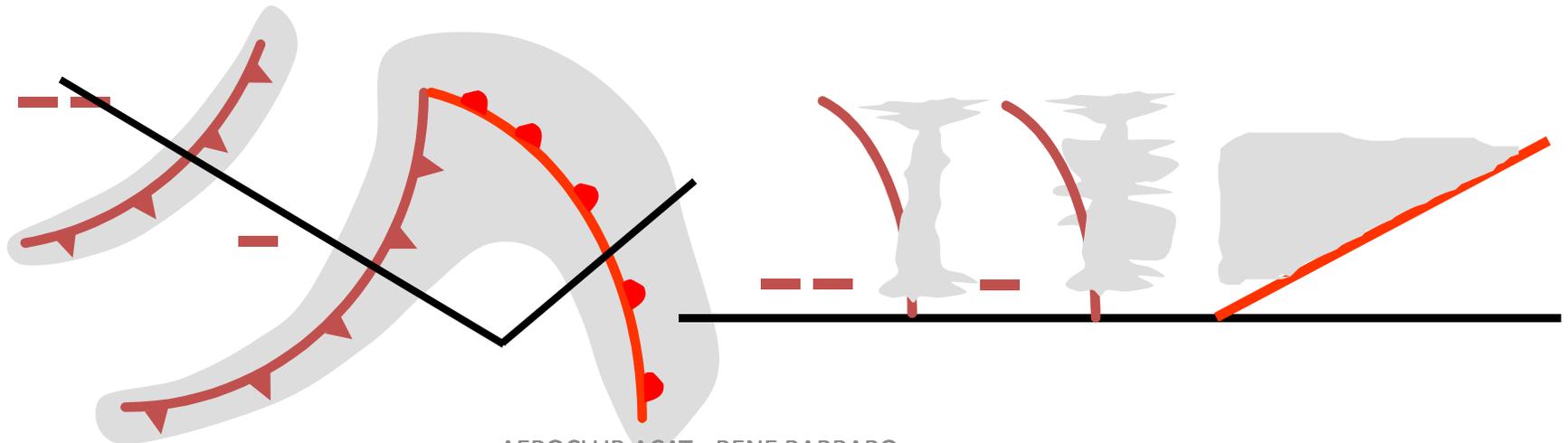
Front ondulant ou stationnaire



Ligne de convergence

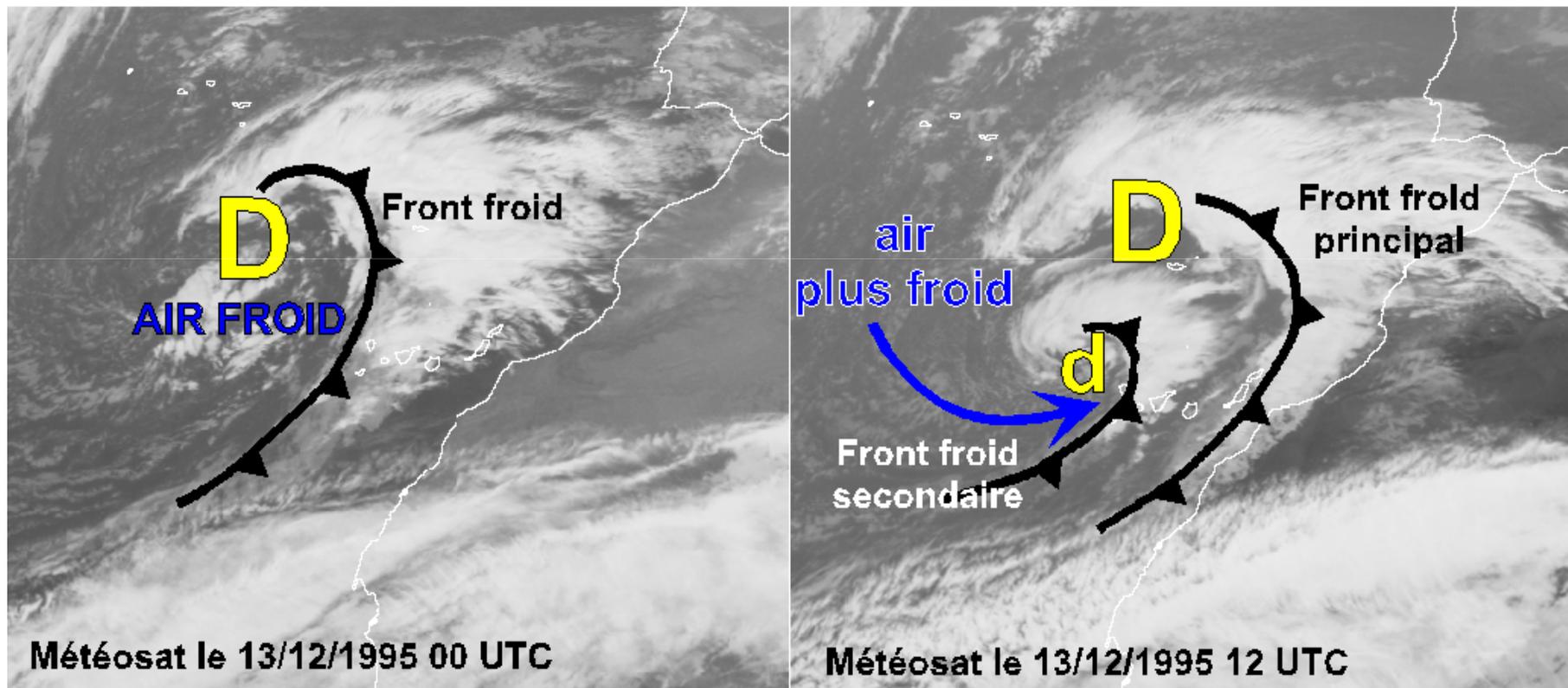


Front secondaire



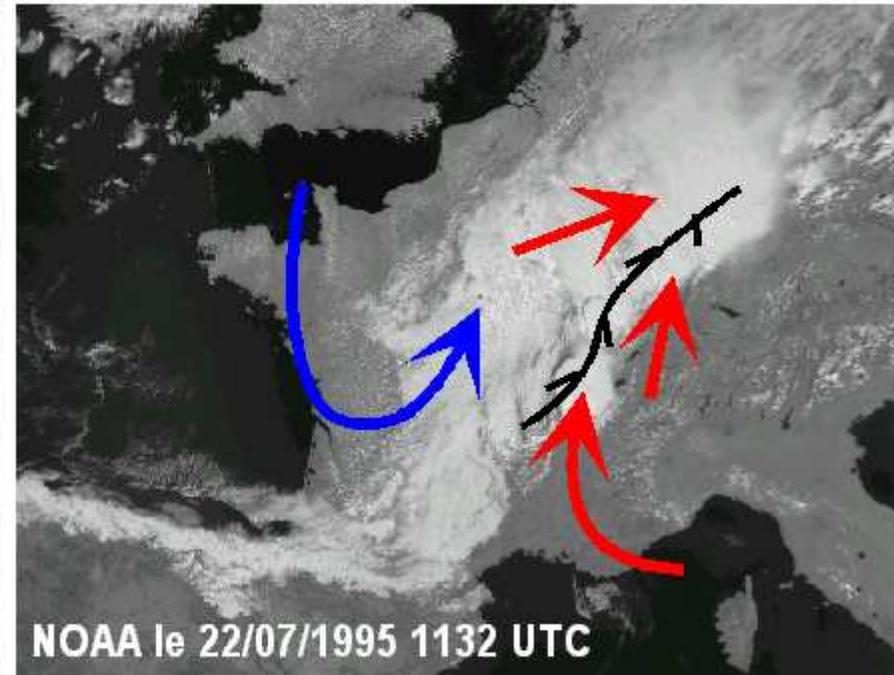
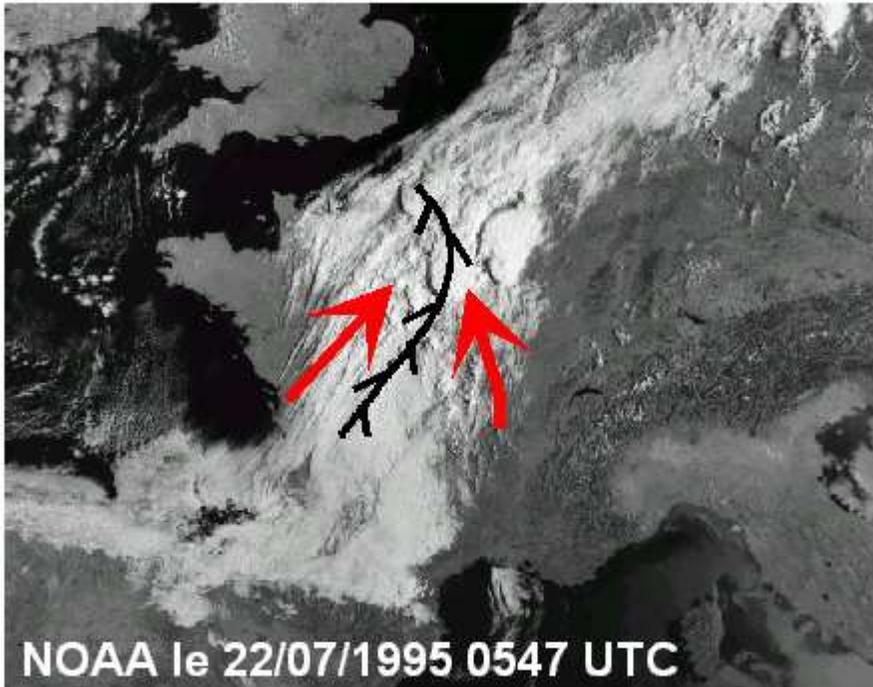


Front secondaire





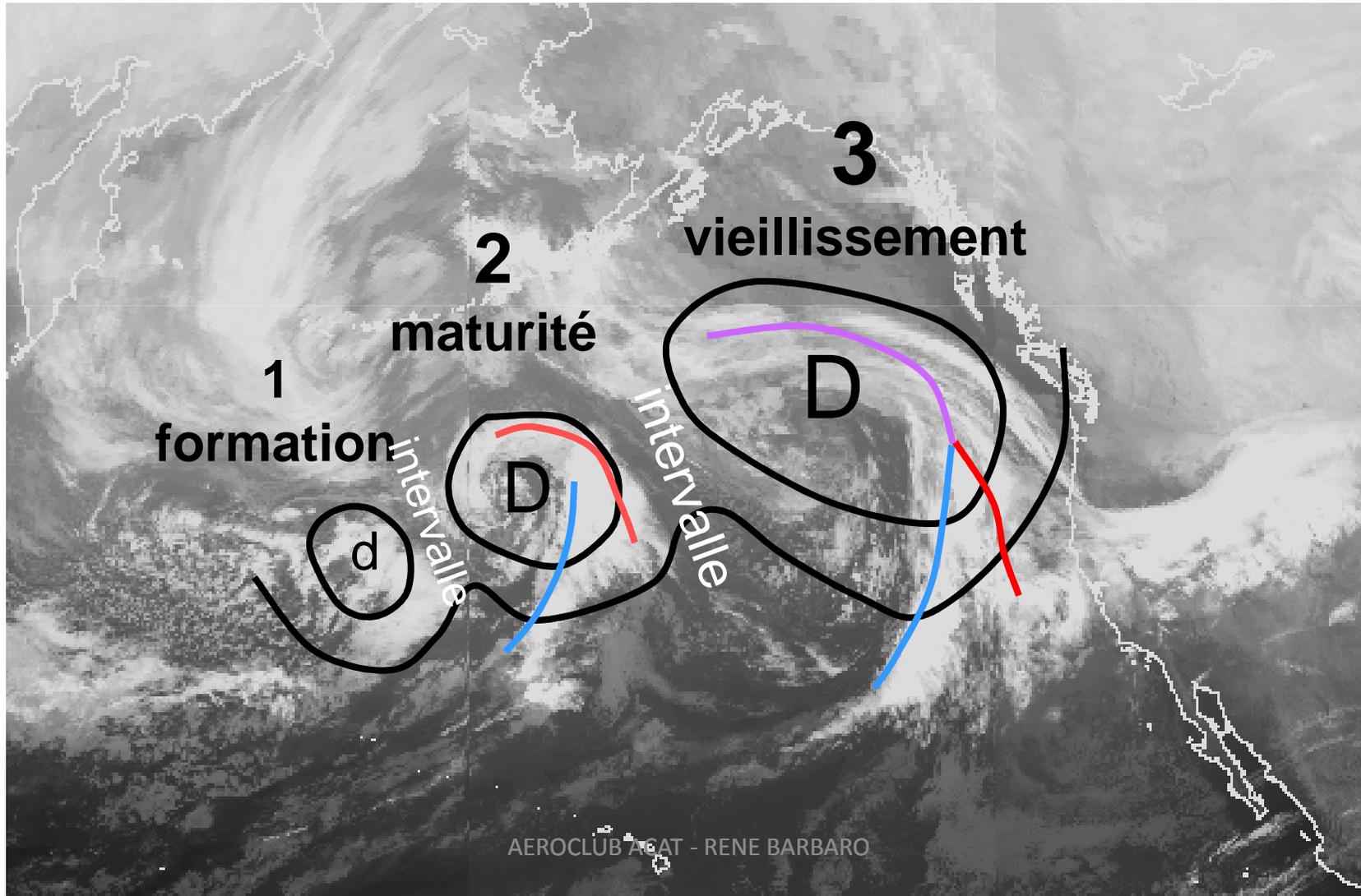
Ligne de convergence





Au même instant : 3 perturbations à des stades d'évolution différents

Famille de perturbations





LES PSEUDO-FRONTS

- zones de gradient de température **sans forçage du au vent.**
 - limite thermique, de masse d'air
 - ⑤ Influences géographiques (air chaud de médit, d'Afrique, air froid continental en hiver...)
 - zone de liaison entre 2 fronts
 - ce qui succède à un front en frontolyse
- Symboles :



Pseudo-front
chaud

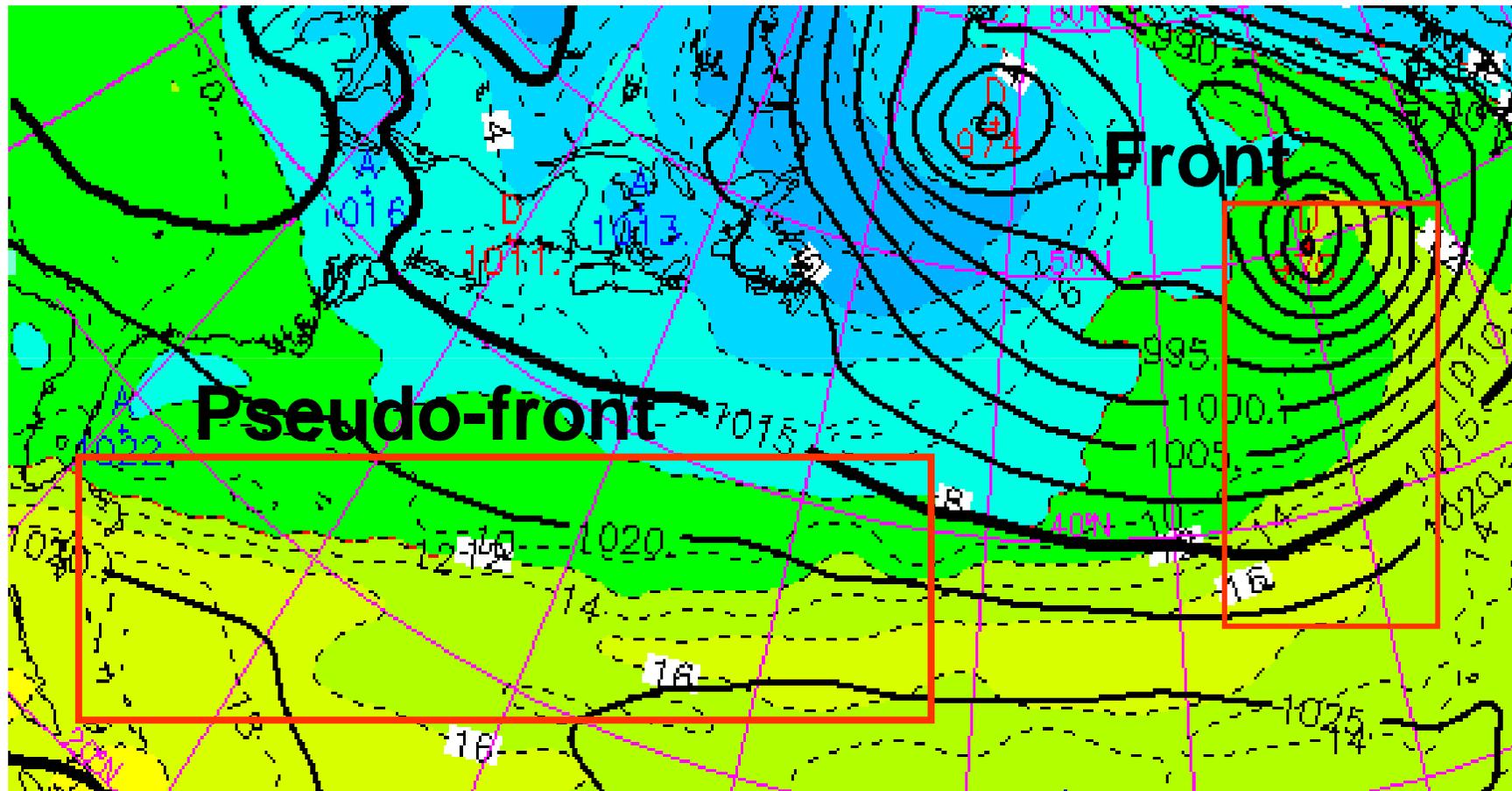


Pseudo-front froid



LES PSEUDO-FRONTS

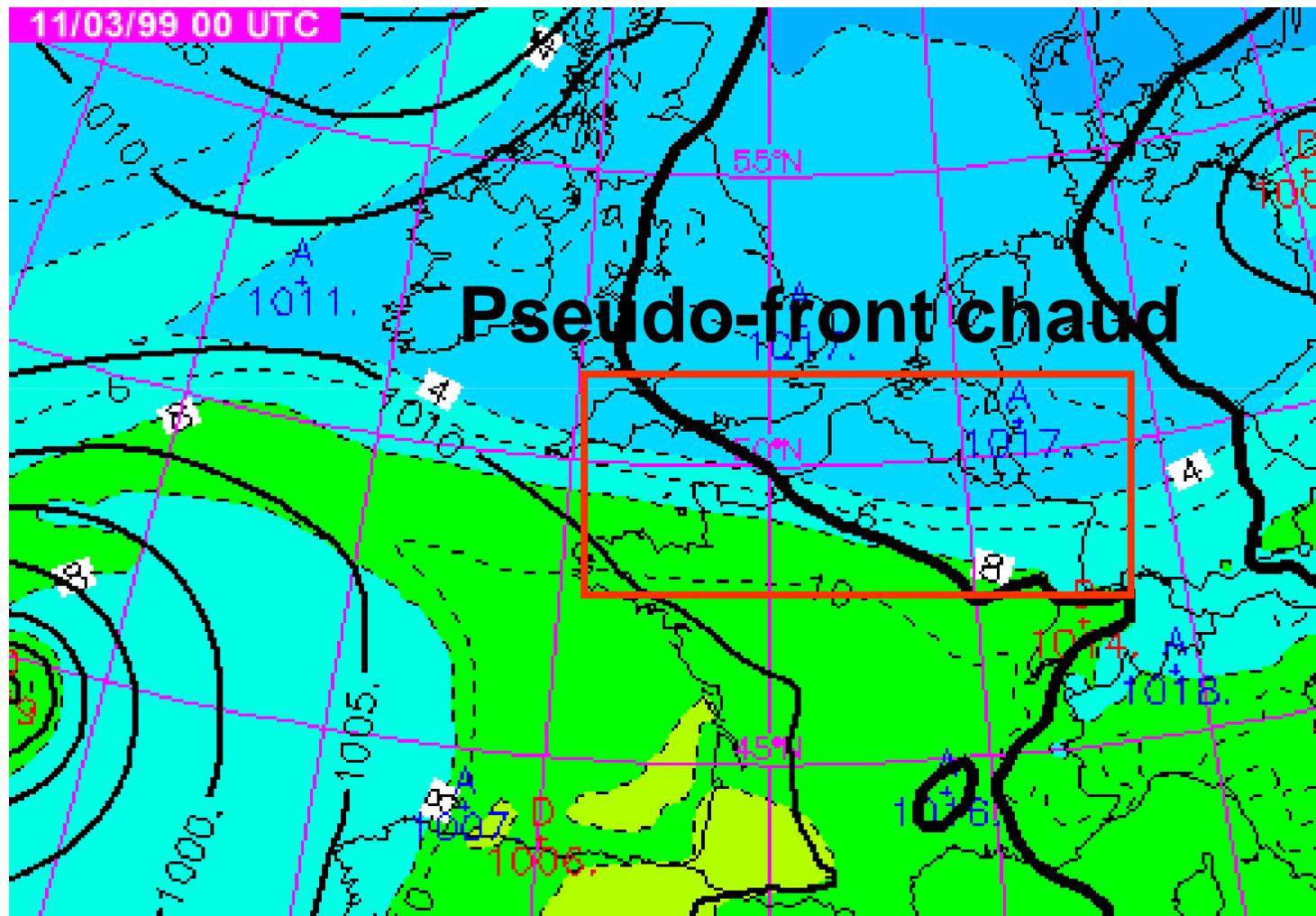
- Isobares et θ'_w _850 hPa





LES PSEUDO-FRONTS

- Isobares et θ'_w _850 hPa





Aéro-club du C'E AIRBUS-France Toulouse
René Barbaro