Les phénomènes convectifs
en zone tropicale

6ème stage de formation sur les cyclones tropicaux

OMM / Météo-France

29 octobre 2013

Christelle BARTHE (LACy/Cyclones)

Les phénomènes convectifs en zone tropicale

1. Définition de la convection
2. Quelques notions de base
3. Les facteurs déclenchants
4. Les phénomènes induits par la convection
5. Les conditions environnementales
6. Les différentes organisations de la convection

Définition

Déséquilibre énergétique vertical de l'atmosphère
(plusieurs causes possibles)

⬇

Convection = Transport vertical d'énergie

⬇

Effet = Stabilisation de l'atmosphère

- Local = convection peu profonde
- Méso-échelle = convection profonde
- Grande-échelle = ZCIT

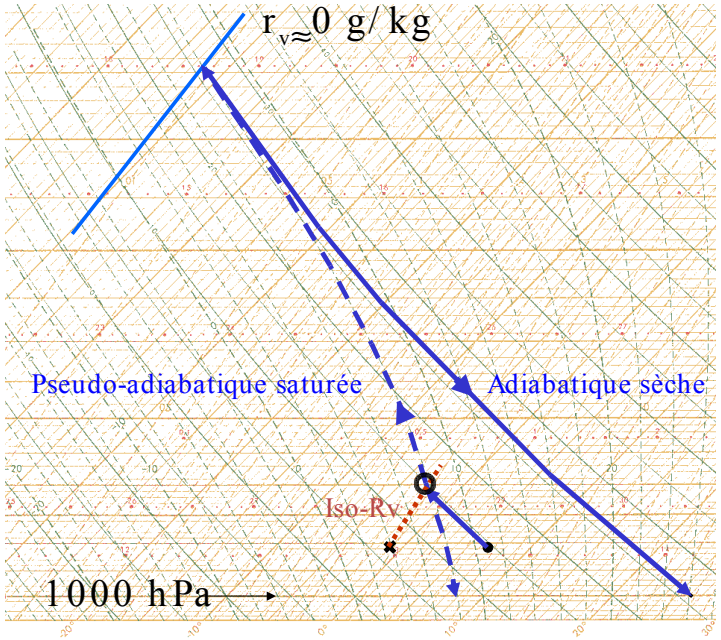
- Cycle de l'eau (précipitations)
- Impact radiatif important
- Phénomènes violents (cyclones, trombes…)

➔ Maillon essentiel de la chaîne de processus participant à la redistribution de l'énergie au sein du système Terre/atmosphère

Notions de base (1) – Rappel

- **Adiabatisme** = pas d'échange ni de chaleur ni de masse, entre la particule et l'environnement
- **Pseudo-adiabatisme irréversible** = pas d'échange de chaleur mais perte de masse irréversible via évacuation de tout condensat, entre la particule et l'environnement

- Emagramme



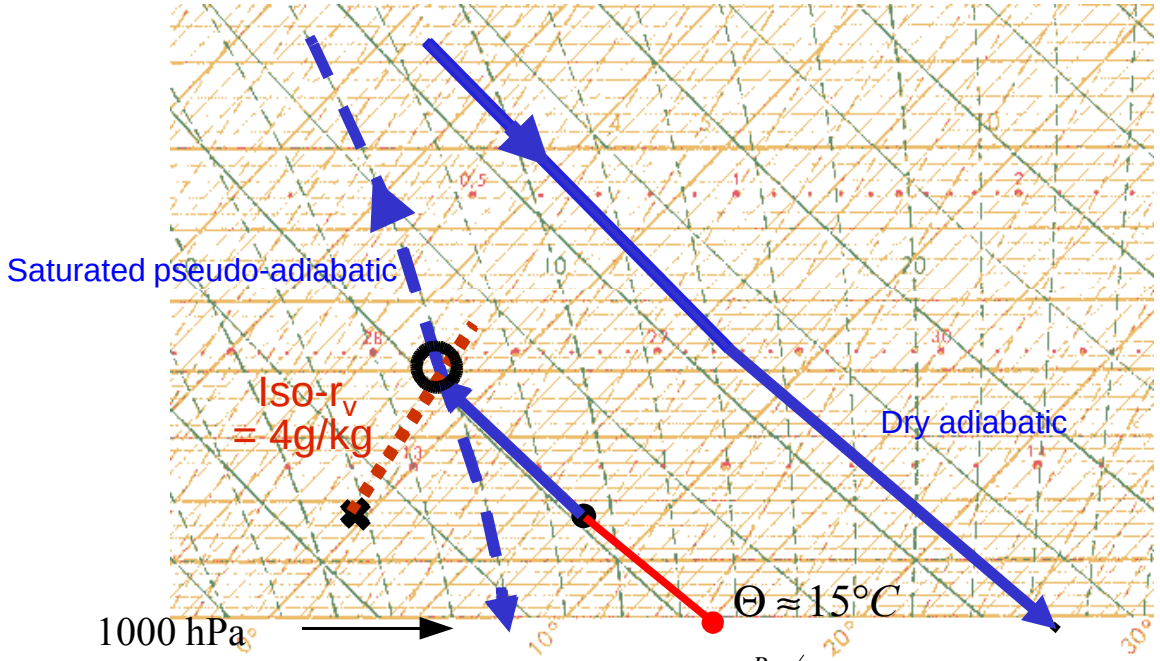
→ Importance de la proportion d'eau

- **Température virtuelle d'air humide** $T_v \sim (1 + 0.608\, r_v)\, T$
  → *température pour un air sec de même masse à même pression*

Notions de base (2) – Les invariants par adiabatisme

- **Température potentielle** $\Theta = T_0 \left(1000 / P_0 \right)^{R_a / C_{pa}}$

→ température d'une particule d'air sec amenée adiabatiquement à 1000 hPa



- **Température potentielle virtuelle** $\Theta_v = T_v \left(\frac{P}{P_0} \right)^{R_a / C_{pa}} = \Theta \left[1 + \left(\frac{R_v}{R_a} - 1 \right) q_v \right]$

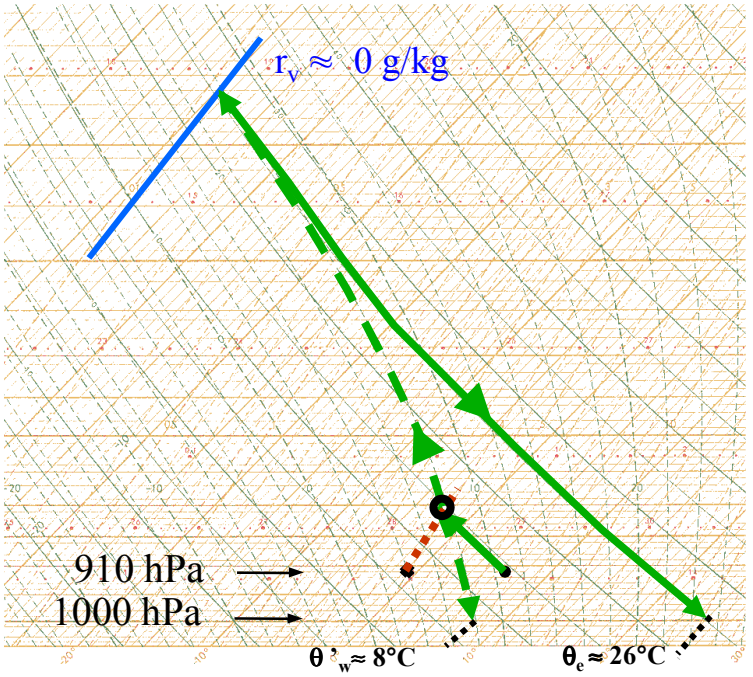
→ température virtuelle d'une particule d'air humide amenée adiabatiquement à 1000 hPa

→ *prise en compte de l'humidité mais aucun processus de condensation*

Notions de base (3) – Les invariants par adiabatisme

- **Température potentielle équivalente** $\Theta_e \approx \Theta \exp(Lq_v / C_p T)$
  → *température d'une particule d'air humide amenée adiabatiquement à 1000 hPa, après saturation adiabatique puis assèchement pseudo-adiabatique*
  → prise en compte de l'humidité et des processus de condensation/évaporation
  → ~ potentiel énergétique de la particule d'air

- **Température pseudo-adiabatique potentielle** Θ'_w
  → *température d'une particule d'air humide amenée pseudo-adiabatiquement à 1000 hPa après saturation adiabatique*
  → très utilisée en prévision
  → information semblable à Θ_e



Θ_e → effet de Foehn idéal

Θ'_w → subsidences sous précipitations

Notions de base (4) – Flottabilité, théorie de la particule

- **Equation du mouvement vertical**
  Accélération = Flottabilité + Fluctuation de pression + Poids de l'eau

- **Flottabilité** = Poussée d'Archimède + Poids de la particule = $g\left(\frac{\Theta_v - \Theta_v^{env}}{\Theta_v^{env}}\right)$

  Flottabilité ↗ si (T - T^{env}) et/ou (r_v - r_v^{env}) ↗

<u>THÉORIE DE LA PARTICULE</u> : Accélération = Flottabilité

$$\frac{d^2w}{dt^2} = -N^2 w = \frac{g}{\Theta_v^{env}} \frac{\partial \Theta_v^{env}}{\partial z} w$$

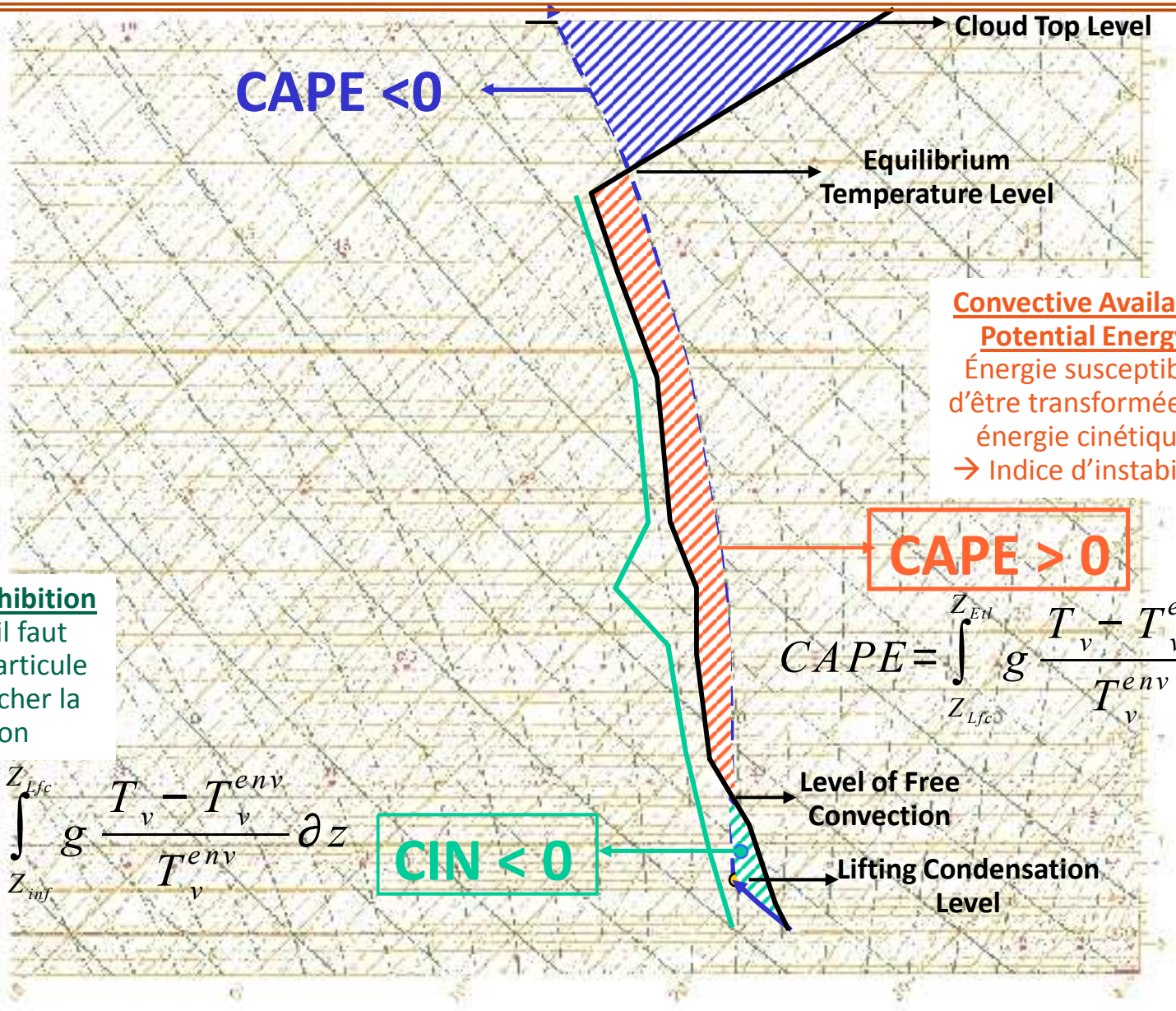
➔ 2 régimes : Cas stable si $N^2 > 0$ → oscillation de gravité
Cas instable si $N^2 < 0$ → convection sèche ou humide

Convective Available Potential Energy $CAPE = \int_{z_{LFC}}^{z_{CTL}} g \frac{T_v - T_v^{env}}{T_v^{env}} dz$

Convective Inhibition $CIN = \int_{z_{\inf}}^{z_{LFC}} g \frac{T_v - T_v^{env}}{T_v^{env}} dz$

Limitation de cette théorie : *CAPE* = 1250 J/kg → w_{max}(théorique) = 50 m/s

Notions de base (5) – Flottabilité, théorie de la particule



Les phénomènes convectifs en zone tropicale

1. Définition de la convection
2. Quelques notions de base
3. Les facteurs déclenchants
4. Les phénomènes induits par la convection
5. Les conditions environnementales
6. Les différentes organisations de la convection

Facteurs déclenchants

→ Déstabilisation de l'atmosphère

- **Soulèvement compensant la CIN**
  - ✓ Forçage orographique
  - ✓ Courant de densité
  - ✓ Ligne de convergence
- **Modification du profil thermique**
  - ✓ Chauffage radiatif en basses couches
  - ✓ Advection chaude en basses couches
  - ✓ Advection froide en altitude
- **Humidification**
  - ✓ Advection en basse et moyenne troposphère

Θ'_w ↗ → instabilité ↗

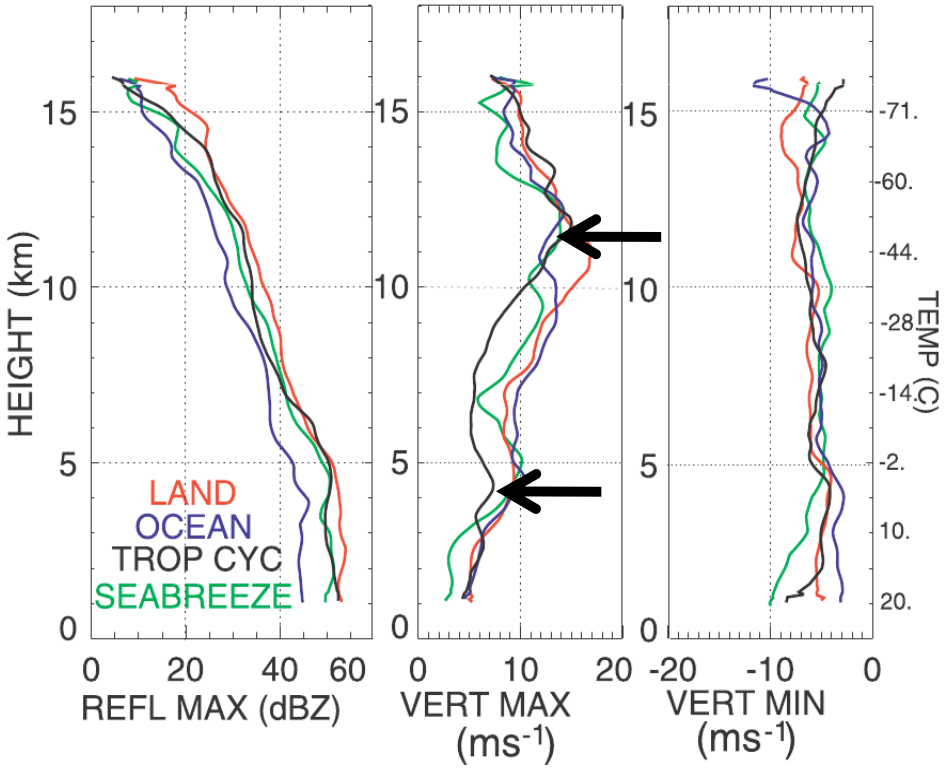
- **Phénomènes ondulatoires**
  - ✓ Ondes de gravité
  - ✓ Ondes d'Est
  - ✓ Oscillation de Madden-Julian

Phénomènes induits (1) : les ascendances

- Ascendance = réponse à l'instabilité
- Déplacement vertical de la particule qui a atteint son niveau de convection libre
- Dépend de la flottabilité et donc de la CAPE
- Vitesse maximale théorique / théorie de la particule : $w_{\max}^{théorique} = \sqrt{2 \times CAPE}$

Différences moyennes latitudes / tropiques
- ML : profil de flottabilité maximum en basses couches
- TROP : profil de flottabilité uniforme sur la troposphère, humidité des basses couches

➔Type et intensité de la convection :
- ❑ Ascendances, subsidences
- ❑ CAPE, DCAPE
- ❑ Charge en eau condensée
- ❑ Cisaillement vertical de vent



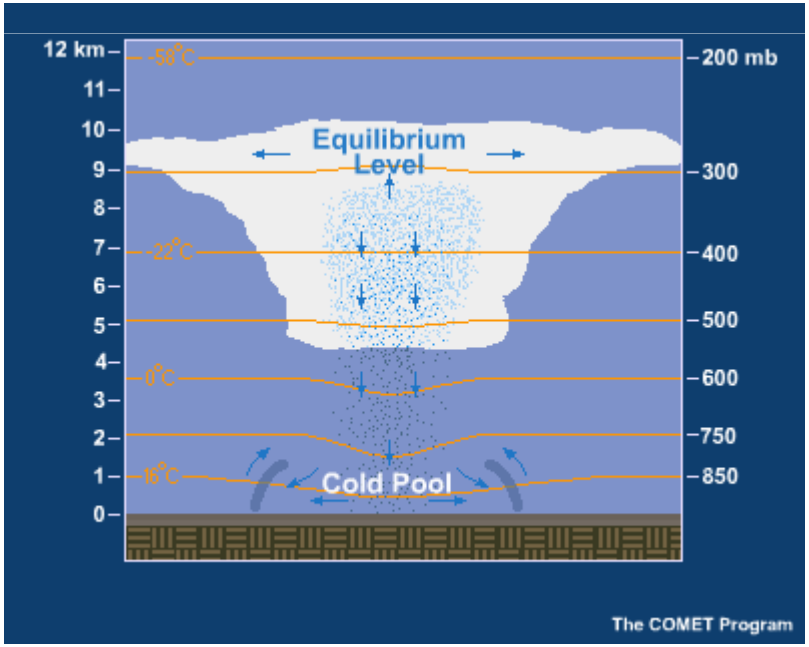
Heymsfield et al. (2010)

Phénomènes induits (2) : les subsidences

- **Subsidences convectives = réponse aux ascendances**
  - ✓ Nécessaires pour l'organisation de la convection
  - ✓ Génèrent les courants de densité

  - ✓ Subsidences à grande échelle : quelques cm s^{-1}
  - ✓ Localement, à l'échelle de la convection : w ~ quelques m s^{-1}

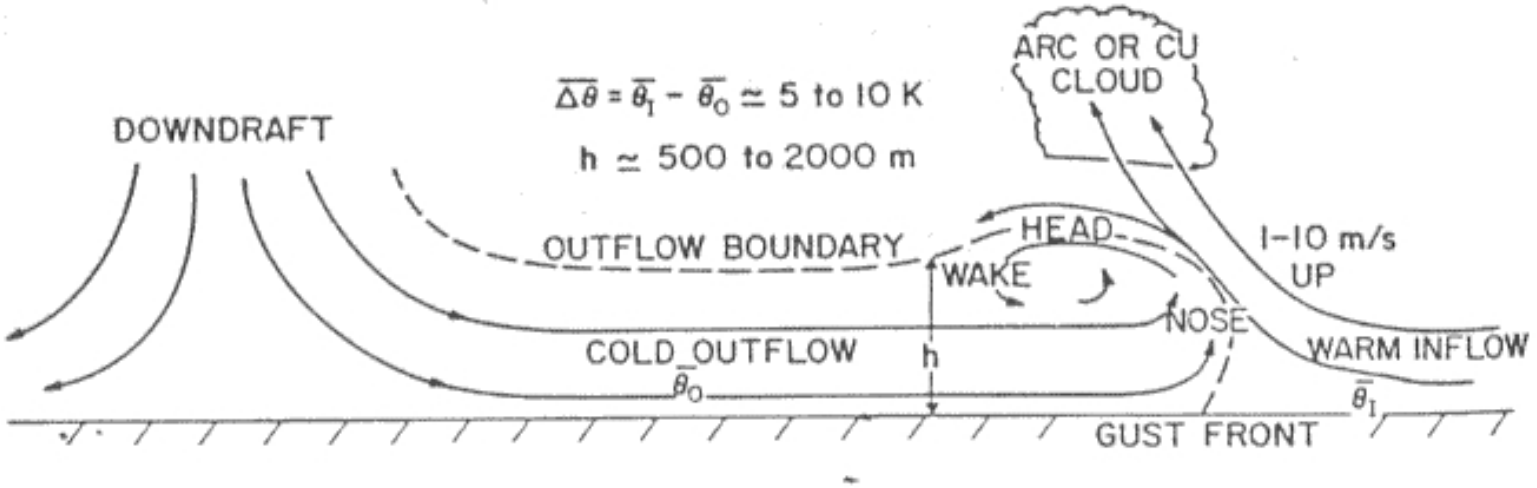
→ Origine : flottabilité négative des particules
- poids des précipitations (liquides ou solides)
- refroidissement résultant de l'évaporation/fusion/sublimation des particules



Phénomènes induits (3) : courants de densité, fronts de rafale

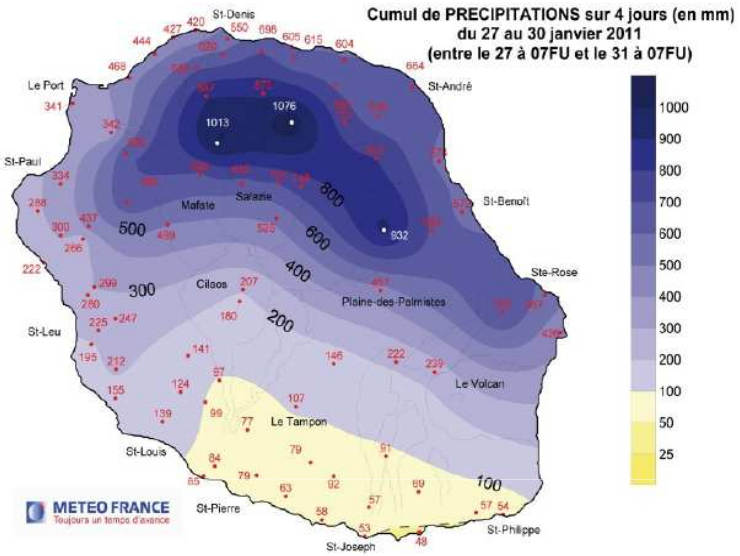
Courant de densité = conséquence de la subsidence au sol
= poche d'air dense s'étalant au sol

- ✓ Brusques changements en surface (rotation et intensification du vent, précipitations, température ↘, pression ↗ …)
- ✓ Favorise le déclenchement de la convection
- ✓ Vitesse de propagation $C^* = \sqrt{-2g\left(\frac{\Theta'_v}{\Theta_{v0}} - q_l - q_s\right)h}$

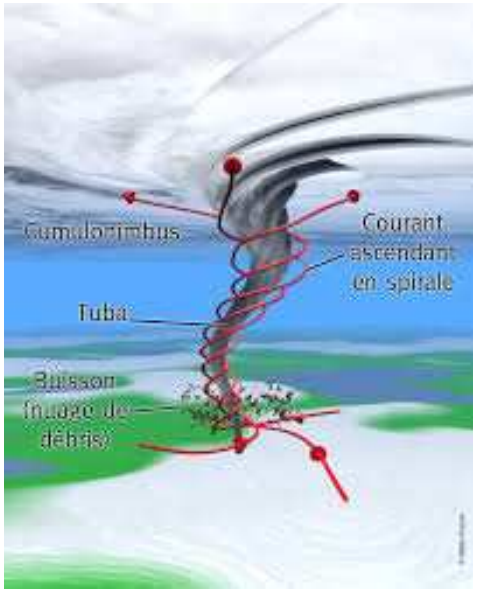


Phénomènes induits (4) : précipitations, tornades

- **Les précipitations**
  - ✓ partie stratiforme : extension et durée
  - ✓ partie convective : forte intensité



- **Les tornades** = colonne d'air ascendant à forte composante tourbillonnaire
  - ✓ sous orage : fort cisaillement par proximité d'ascendances et subsidences
  - ✓ déplacement du front de rafale vers le centre de l'orage
  - ✓ atterrissage d'un cyclone

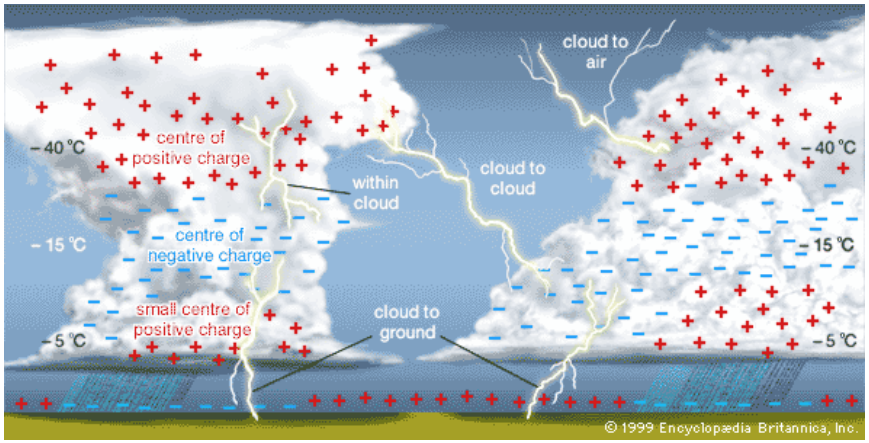


Phénomènes induits (5) : éclairs

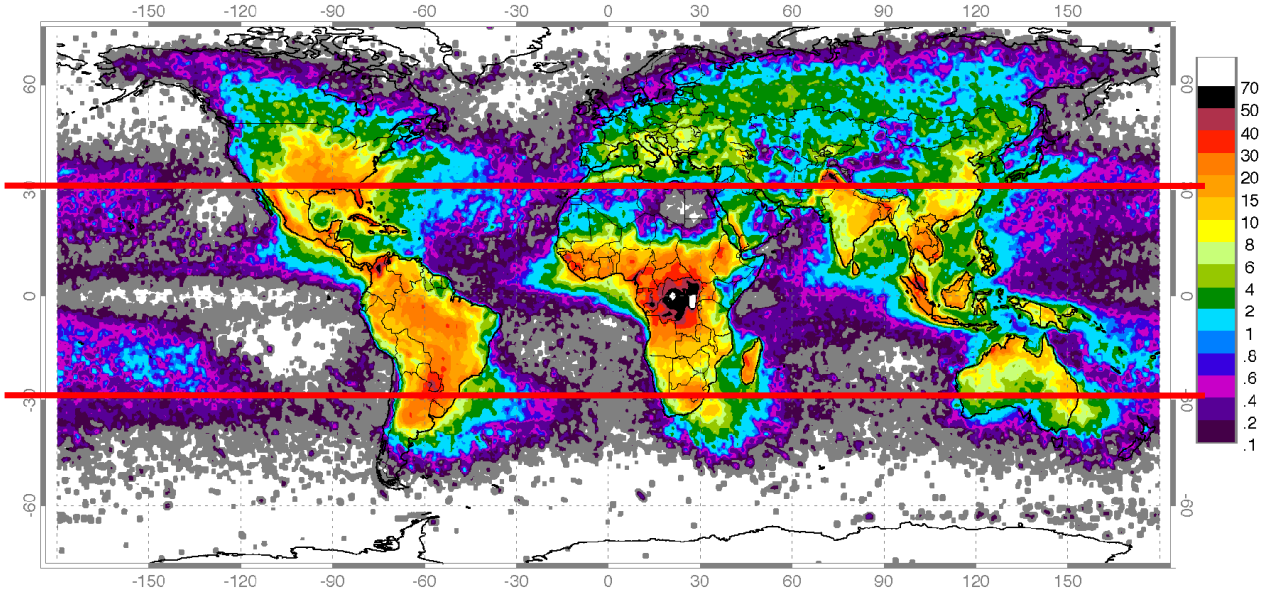
Les éclairs = phénomène de décharge électrostatique

→ séparation de charge +/- consécutive aux collisions entre particules de glace

➔ importance de la phase glace et de l'intensité des ascendances



Eclairs nuage-sol (foudre) ou intra-nuage



http://thunder.msfc.nasa.gov/images/HRFC_AnnualFlashRate_0.5.png

Eclairs = indicateur de l'intensité de la convection

➔Utilité pour la prévision immédiate :

- Précurseur des tornades ?
- CG+ et grêle ?
- Signature dans les cyclones tropicaux ?

→ <u>encore du domaine de la recherche</u>

Les phénomènes convectifs en zone tropicale

1. Définition de la convection
2. Quelques notions de base
3. Les facteurs déclenchants
4. Les phénomènes induits par la convection
5. Les conditions environnementales
6. Les différentes organisations de la convection

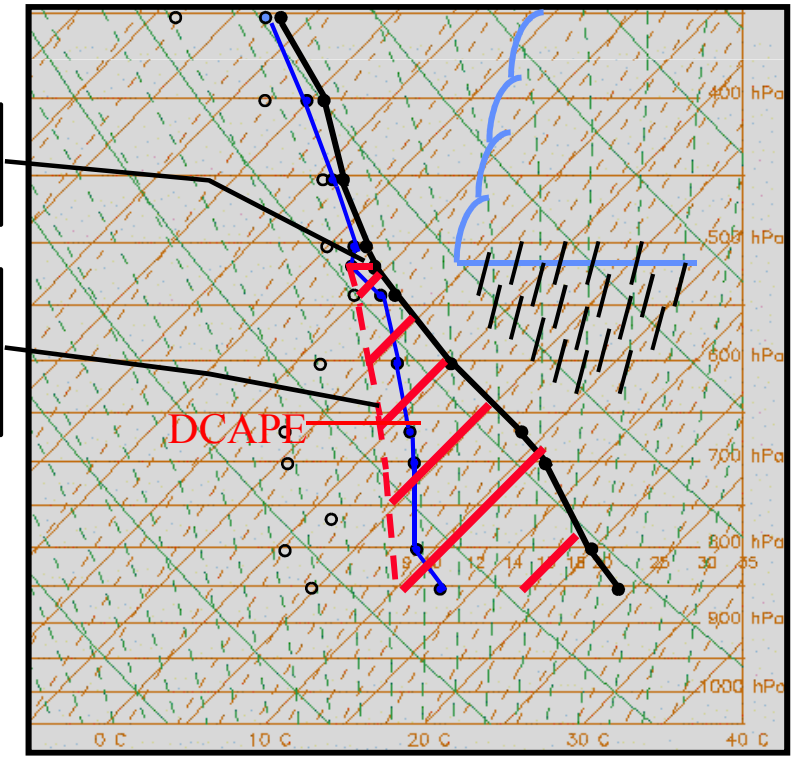
Environnement (1) : stabilité thermique

- **Convective Available Potentiel Energy** : CAPE
  → Quantifier la puissance des ascendances

- **Downdraft Convective Available Potential Energy** : DCAPE (instabilité avec flottabilité négative)
  → Quantifier la capacité de l'atmosphère à générer des subsidences

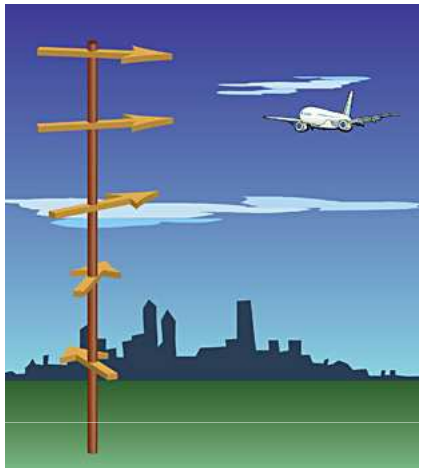
1. Evaporation des précipitations à pression constante → Particule saturée

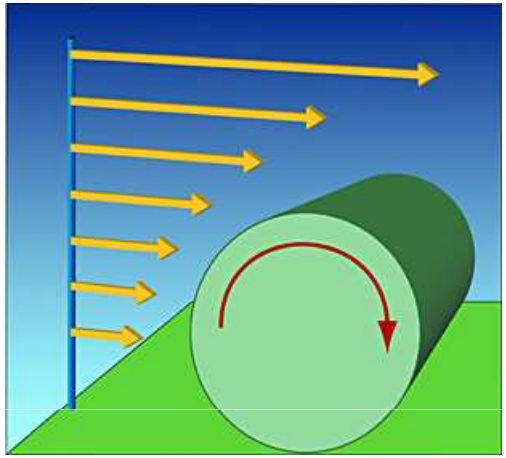
2. Descente pseudo-adiabatique jusqu'à 1000 hPa avec évaporation pour rester à saturation



Environnement (2) : cisaillement vertical de vent

Cisaillement vertical de vent = variation du vent (en direction ou en module) avec l'altitude



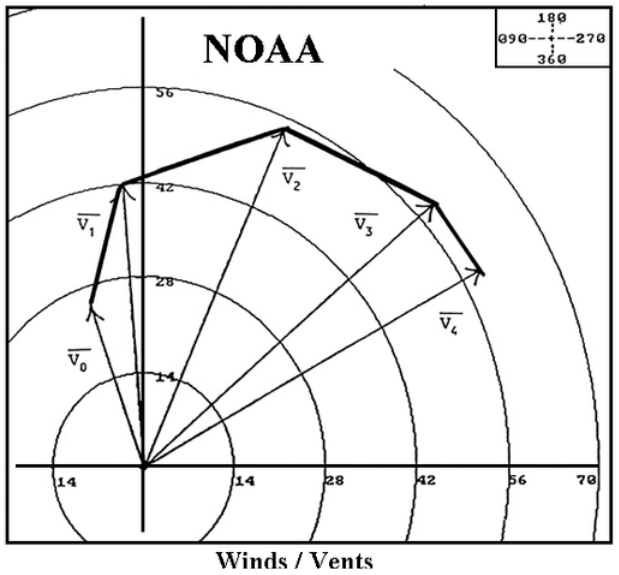


Représentation sur un **hodographe**

→Vecteur vent
- → Origine : centre du repère
- → Orientation : direction du vent
- → Longueur : proportionnelle au module du vent

→ Hodographe = courbe reliant la pointe des vecteurs vent par altitude croissante

→ Cisaillement vertical de vent = différence entre les vecteurs vent à 2 altitudes



Winds / Vents

Environnement (3) : cisaillement vertical de vent

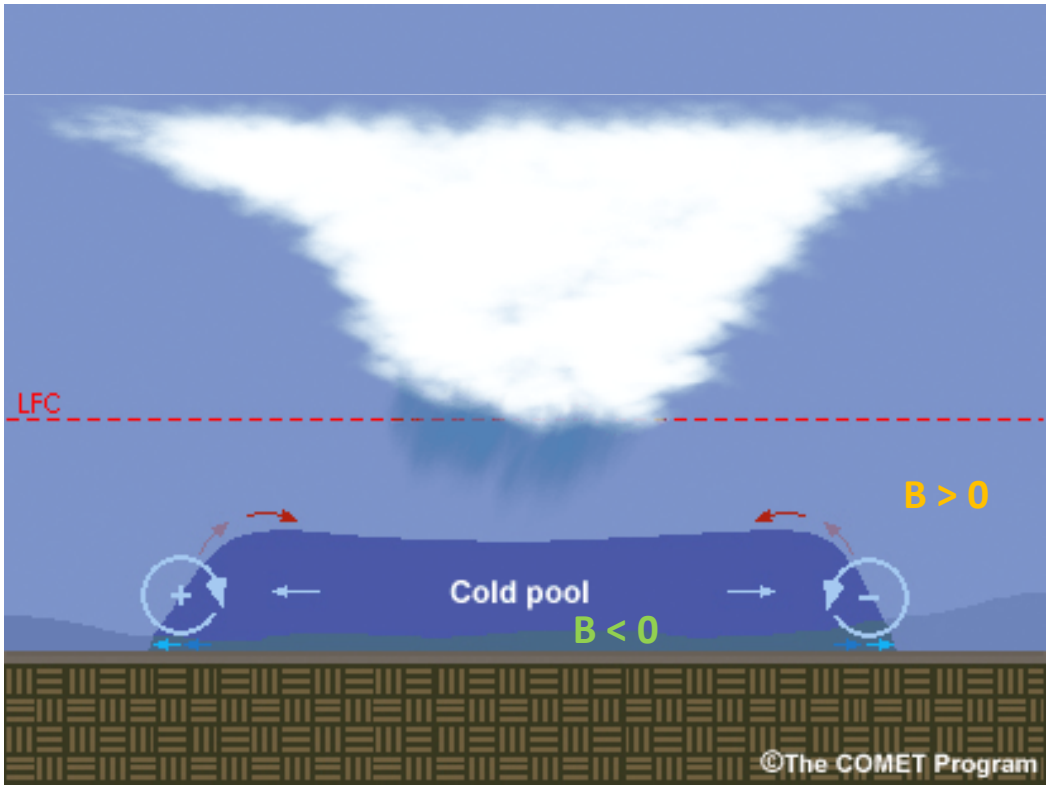
Interaction du courant de densité avec le cisaillement vertical de vent

➔Etalement des courants froids sous le nuage

➔Gradient de flottabilité négatif en amont du nuage et positif en aval

➔Génération de tourbillon horizontal positif en amont du nuage et négatif en aval

➔Mouvements ascendants au niveau du front de rafale

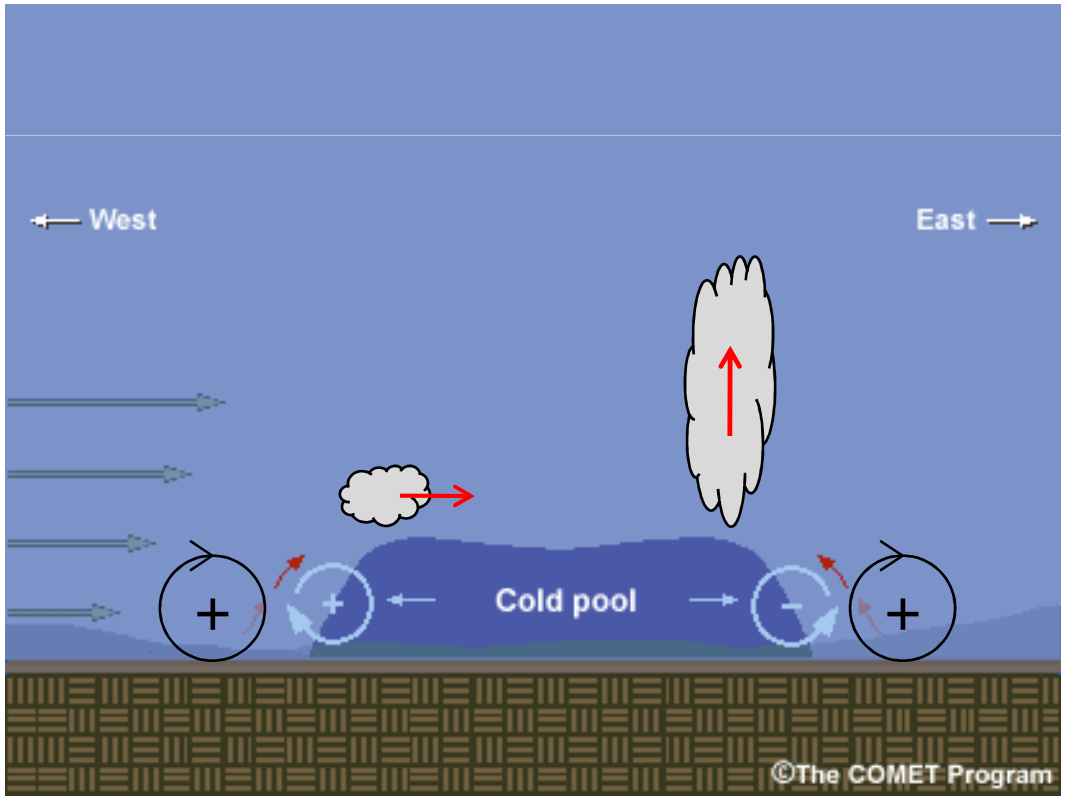


Environnement (4) : cisaillement vertical de vent

Interaction du courant de densité avec le cisaillement vertical de vent

Amont du nuage : tourbillon horizontal associé au courant de densité et celui associé à l'environnement même signe
➔ compensation
➔forçage vertical ↘

Aval du nuage : tourbillon horizontal associé au courant de densité et celui associé à l'environnement signes opposés
➔ ascendance redressée au front de rafale
➔ vitesses verticales ↗

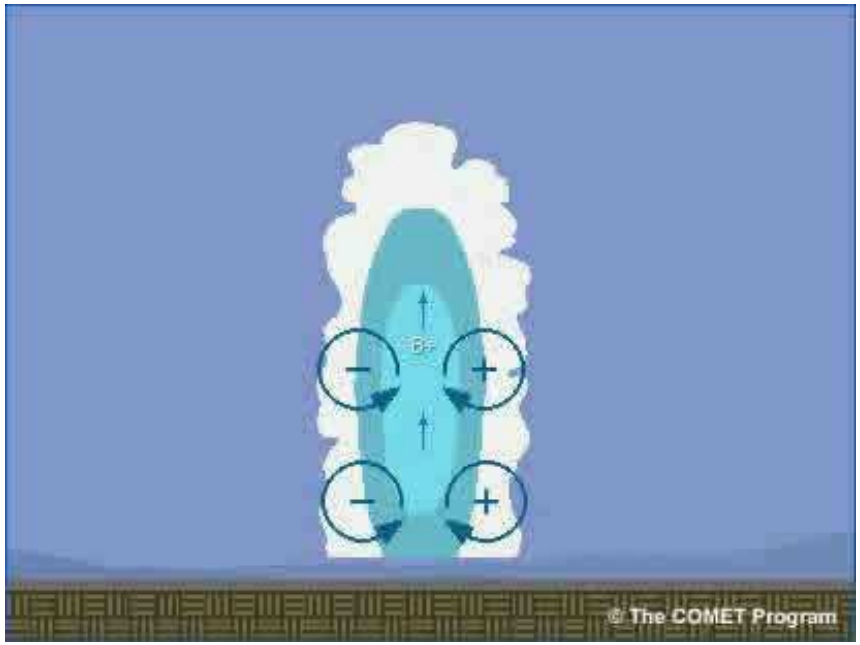


Environnement (4) : cisaillement vertical de vent

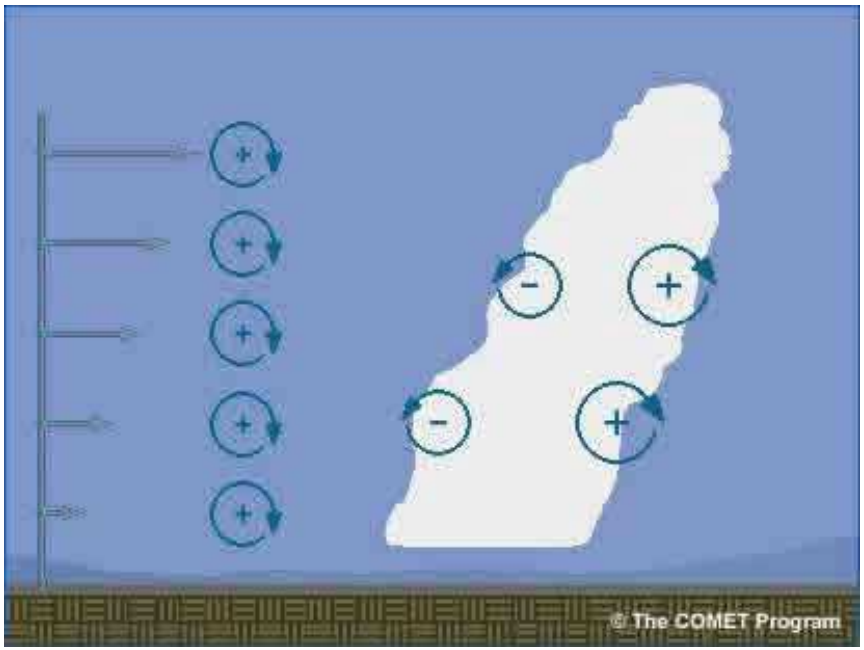
Interaction du cisaillement vertical de vent avec le courant ascendant

→ *Si le cisaillement est suffisamment profond et les ascendances suffisamment fortes, d'autres mécanismes peuvent contribuer à l'organisation de la convection.*

Formation de l'updraft → tourbillon horizontal généré / gradient de flottabilité
Sans cisaillement vertical de vent : équilibre
➔ l'ascendance est verticale



Avec cisaillement vertical de vent ➔ + tourbillon horizontal associé au cisaillement
➔ l'ascendance s'incline dans la direction du cisaillement



Environnement (5) : cisaillement vertical de vent

Interaction du cisaillement vertical de vent avec les mouvements verticaux

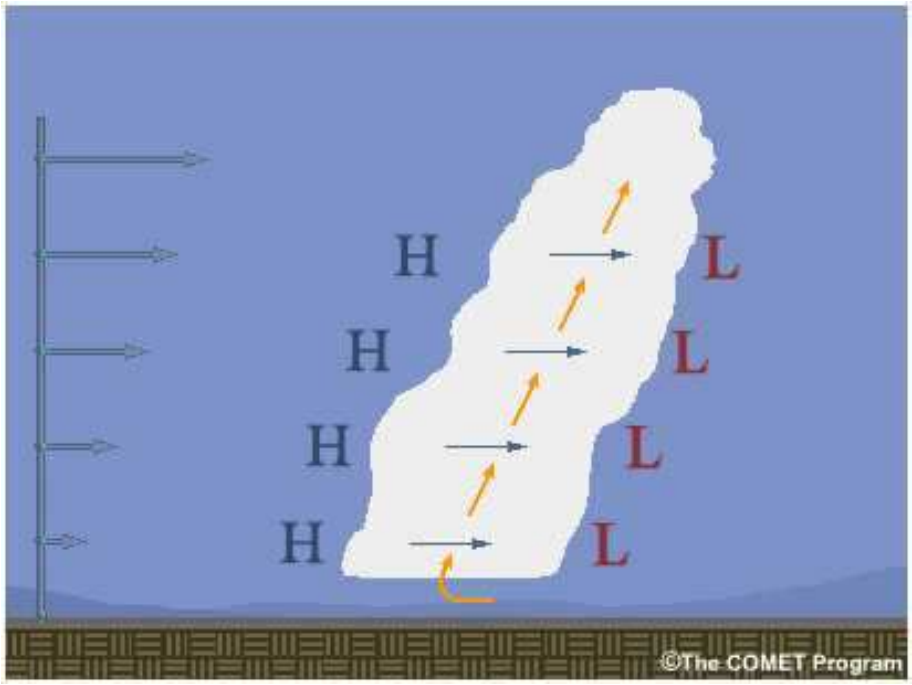
→ Le courant ascendant joue le rôle d'un <u>obstacle au flux</u> lorsqu'il y a cisaillement

→ Des zones de surpression en amont du cisaillement et de dépression en aval du cisaillement sont induites

➔ **Ascendances** (subsidences) **favorisées en aval** (amont)

➔ Force de pression horizontale + accélération verticale / dipôle de pression dynamique

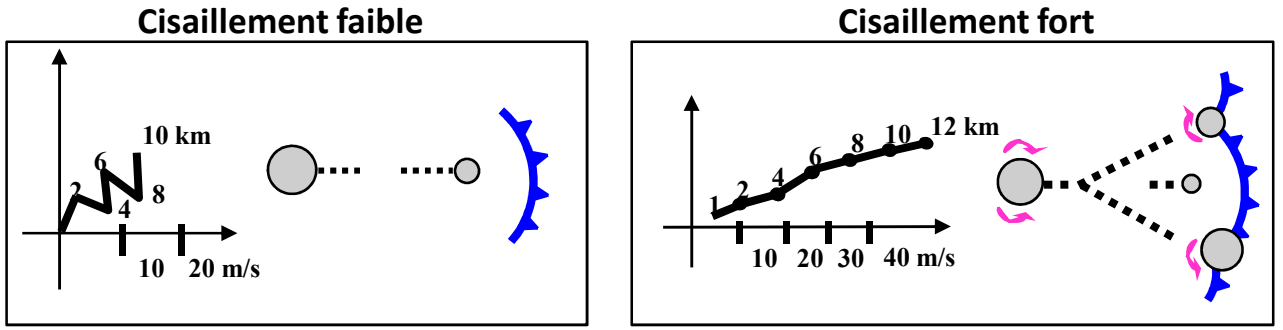
➔ ***Tilting*** **de l'ascendance**



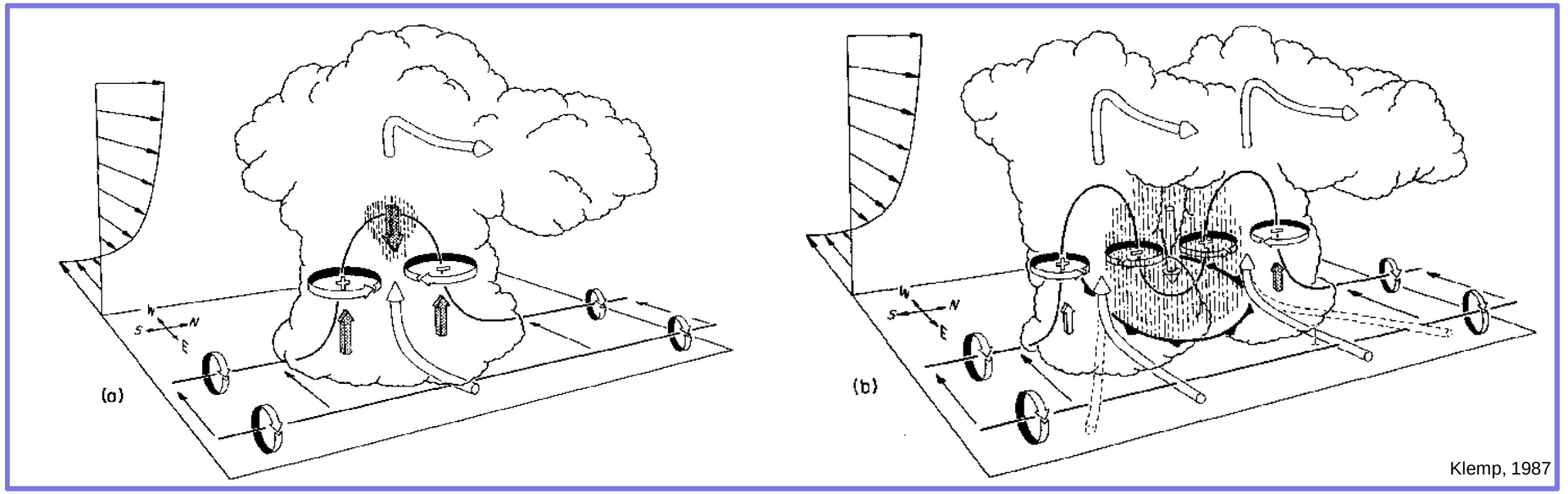
Environnement (6) : cisaillement vertical de vent

Division de cellules convectives

Cisaillement unidirectionnel

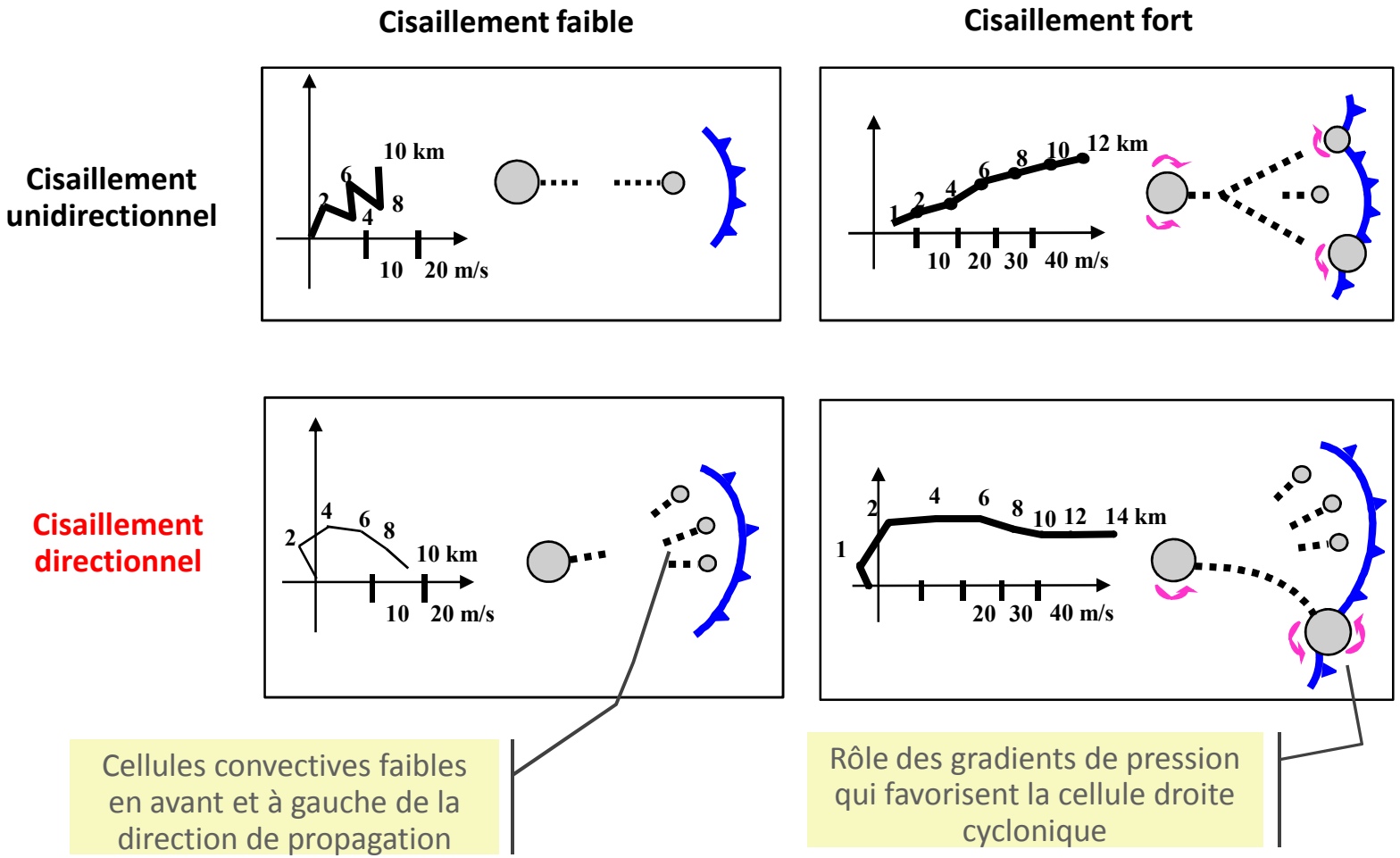


1. Courant ascendant + cisaillement vertical de vent ➔ formation de 2 tourbillons (direct et indirect)
2. Charge en eau freine l'ascendance et l'inhibe ➔ séparation en 2 parties de rotation inverse



Environnement (6) : cisaillement vertical de vent

Division de cellules convectives

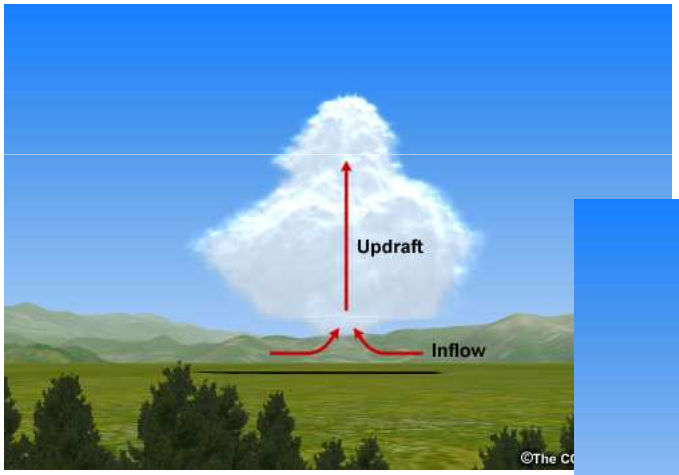


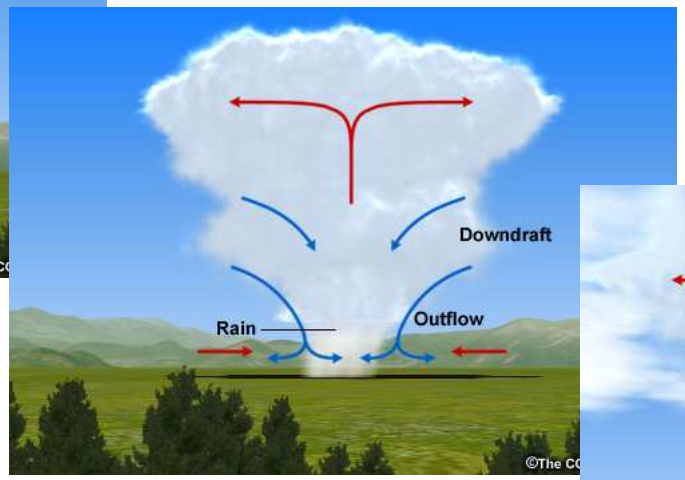
Les phénomènes convectifs en zone tropicale

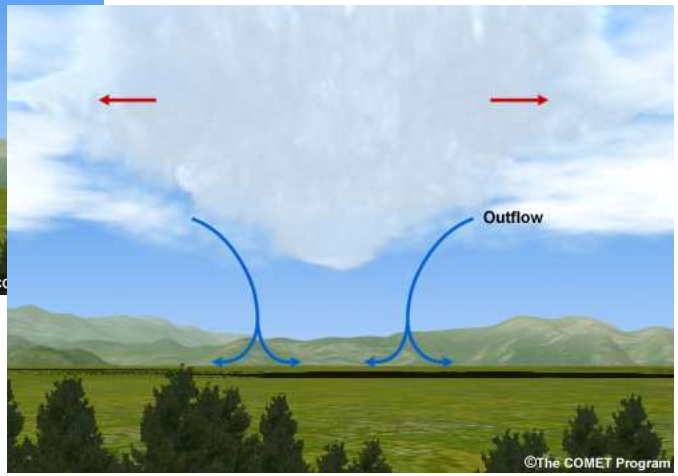
1. Définition de la convection
2. Quelques notions de base
3. Les facteurs déclenchants
4. Les phénomènes induits par la convection
5. Les conditions environnementales
6. Les différentes organisations de la convection

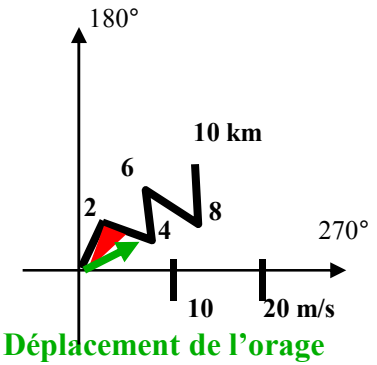
Organisation (1) : convection isolée – cellule ordinaire

- ✓ SYSTÈME CONVECTIF ÉLÉMENTAIRE : 1 ascendance + subsidences compensatoires
- ✓ Faible cisaillement de vent
- ✓ Cb isolé à cycle de vie court (30 – 50 min)
- ✓ Pas de phénomènes très violents (averse puis pluies faibles sous enclume)
- ✓ Propagation à la vitesse moyenne de l'environnement



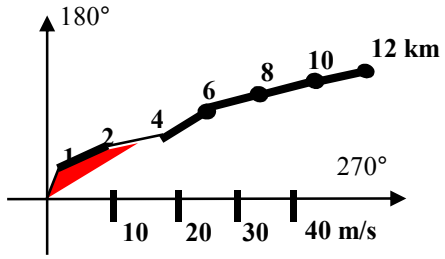


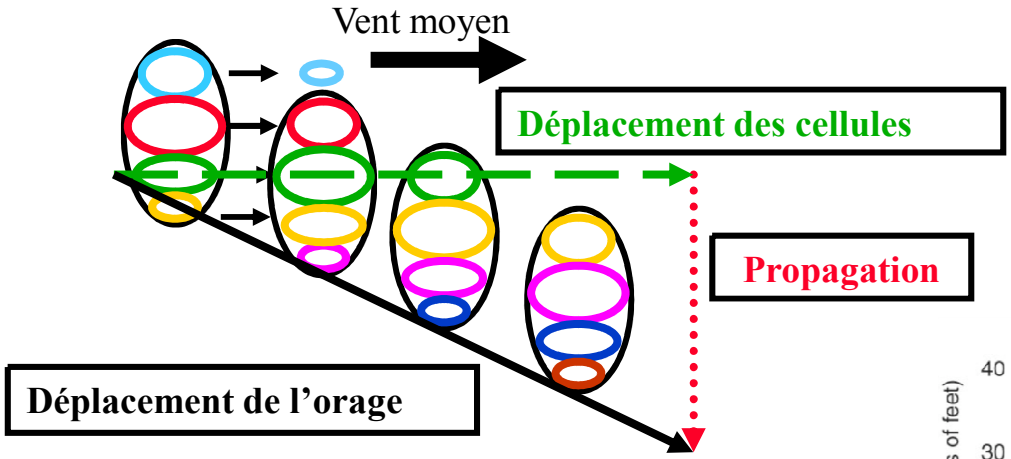


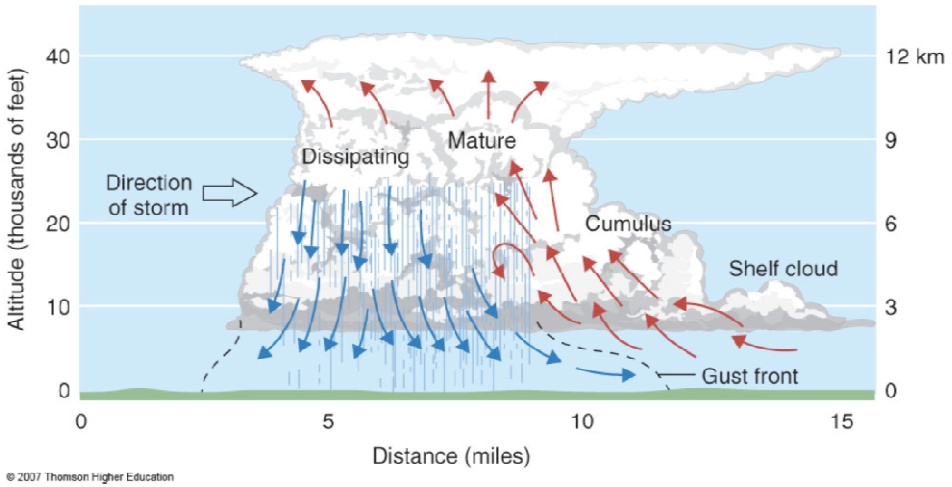


Organisation (2) : convection isolée – multicellule

- ✓ Fort cisaillement de vent unidirectionnel
- ✓ Groupe de cellules à différents stades de développement
- ✓ Propagation = déplacement de cellules + genèse de nouvelles cellules
- ✓ Echelle horizontale : 20 à 30 km
- ✓ Grêle, rafales de vent et fortes pluies si stationnaire
- ✓ Durée de vie : 3 à 4 heures





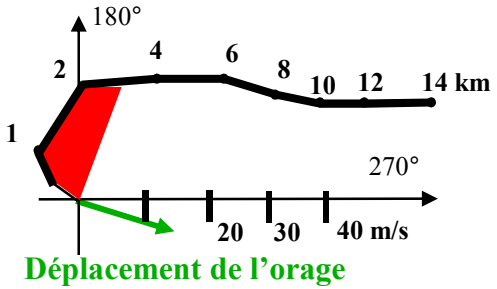


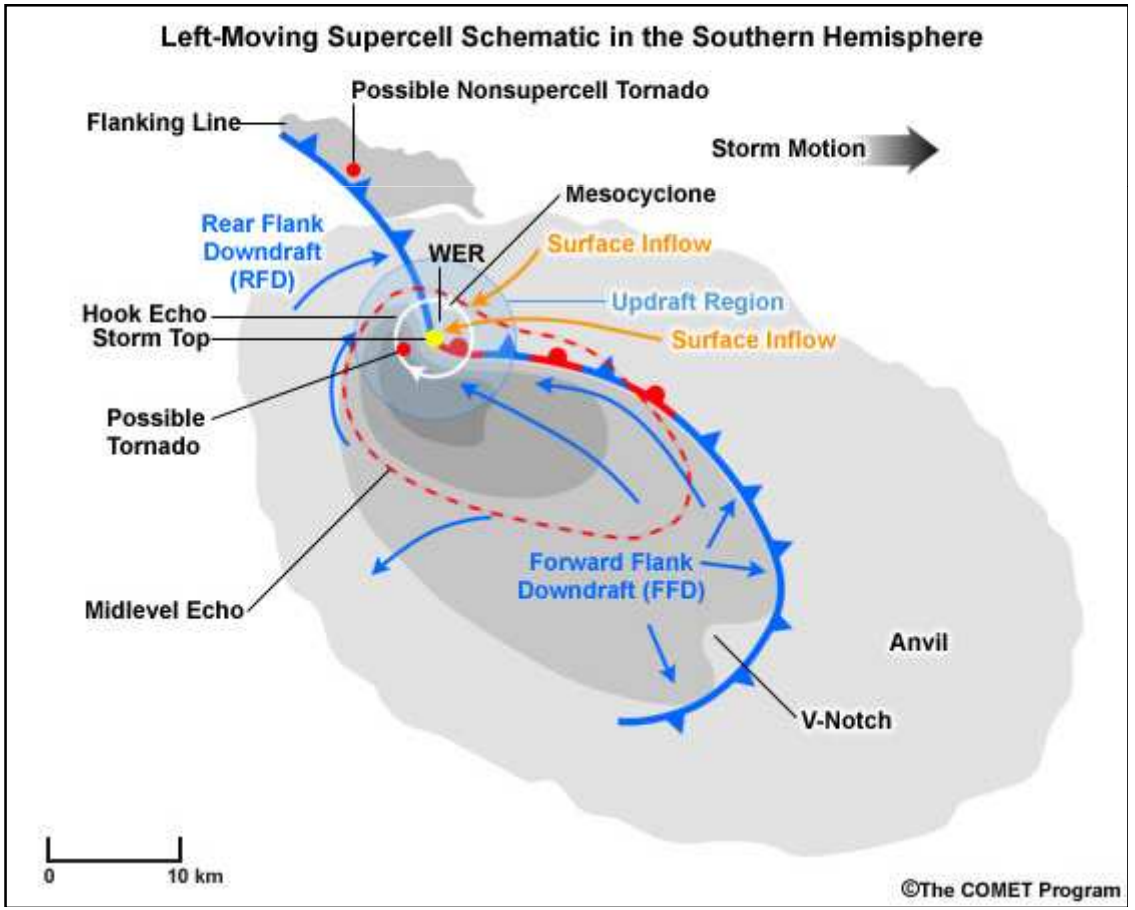
Organisation (3) : convection isolée – supercellule

- ✓ Fort cisaillement directionnel et forte CAPE
- ✓ Organisation 3D du flux
- ✓ Structure tourbillonnaire → inclinaison de l'orage → ascendance surplombe subsidence

  ➔ empêche l'orage de supprimer sa source d'énergie
- ✓ Echo radar en crochet
- ✓ Propagation rapide
- ✓ Rare mais très violent

  (tornades, grêle)
- ✓ Echelle horizontale : 50 à 100 km
- ✓ Durée de vie : plusieurs heures





Organisation (4) : systèmes convectifs de mésoéchelle

Définition

- Cellules orageuses organisées en vaste système convectif

Caractéristiques

- Organisation interne (200 à 400 km) : partie convective, partie stratiforme, courant de densité et courant entrant
- Cycle de vie propre (6 à 12 heures)
- Influence sur la grande-échelle
- Importance dans le cycle de l'eau et la redistribution de l'énergie
- Environnement instable et cisaillé

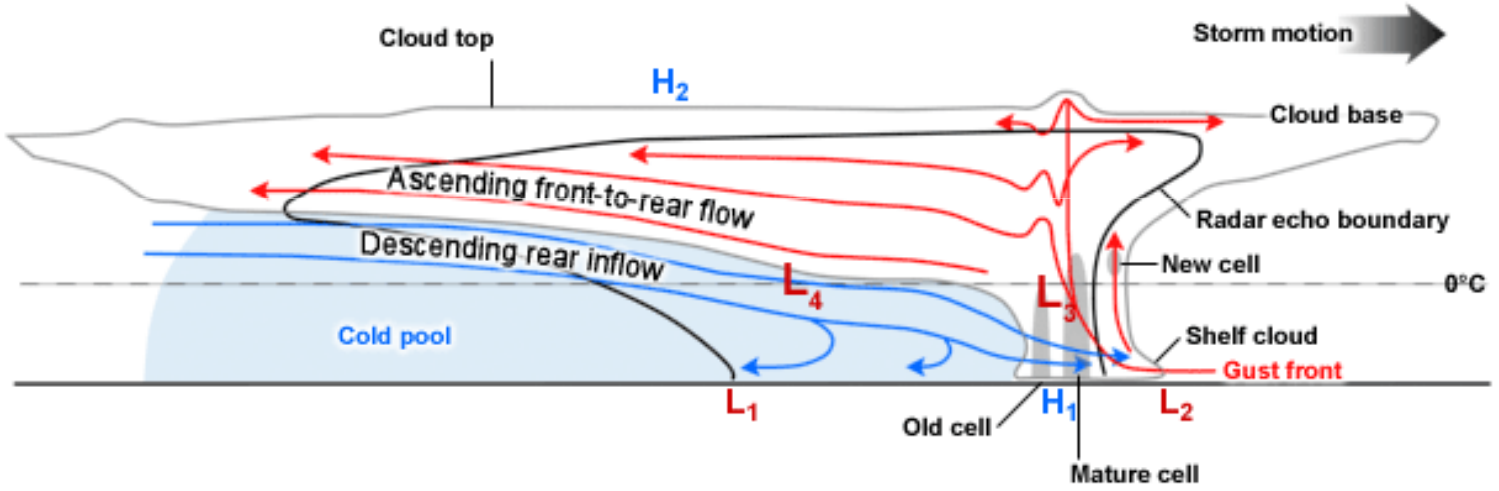
Différents types

- Ligne de grains
- Complexe convectif de méso-échelle
- Système en V

Organisation (4) : systèmes convectifs de mésoéchelle

- Archétype de la ligne de grains

Système auto-entretenu : convection → précipitation → poche d'air froid → courant de densité → convection



Houze et al. 1989

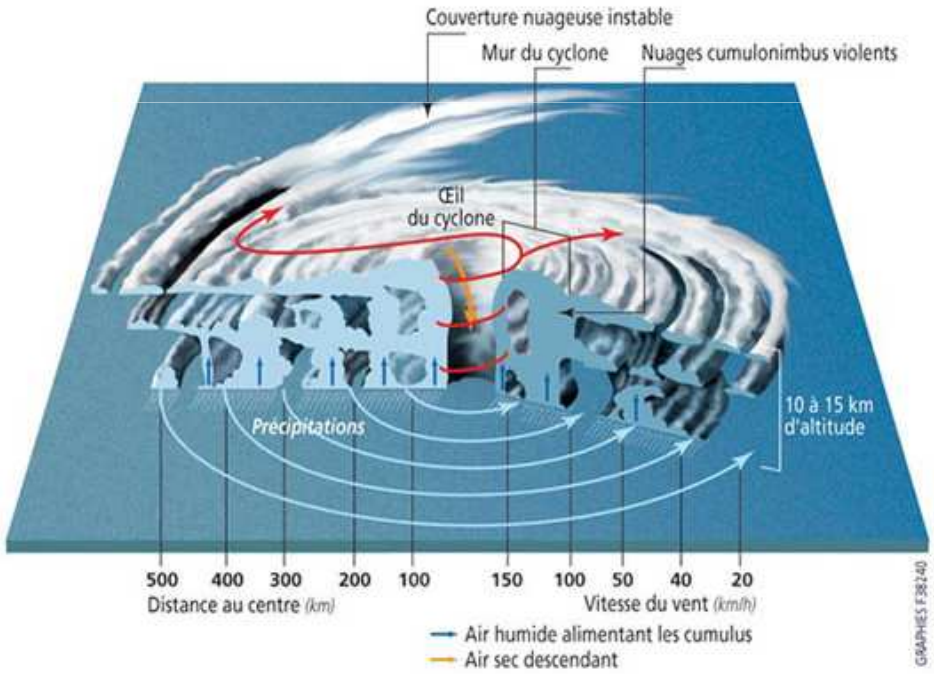
- Spécificités sous les Tropiques
  - ✓ Moins de cisaillement
  - ✓ Courant de densité moins important
  - ✓ Cellules convectives de plus grande taille
  - ✓ Déplacement Est → Ouest

Organisation (5) : cyclones tropicaux

Définition

- Perturbation dépressionnaire d'échelle synoptique non accompagnée d'un système frontal présentant une **convection organisée** et une circulation cyclonique plus intense en surface qu'en altitude

Caractéristiques

- ✓ Genèse = MCS + vorticité en basses couches
- ✓ Durée de vie = plusieurs jours
- ✓ CAPE n'est pas un paramètre essentiel

→ moteur = flux océan-atmosphère