



Les phénomènes convectifs en zone tropicale

Christelle Barthe (LACy/Cyclones)

17 septembre 2015

7^{ème} stage OMM sur les cyclones tropicaux dans le sud-ouest de l'océan Indien

Spécificités des régions tropicales



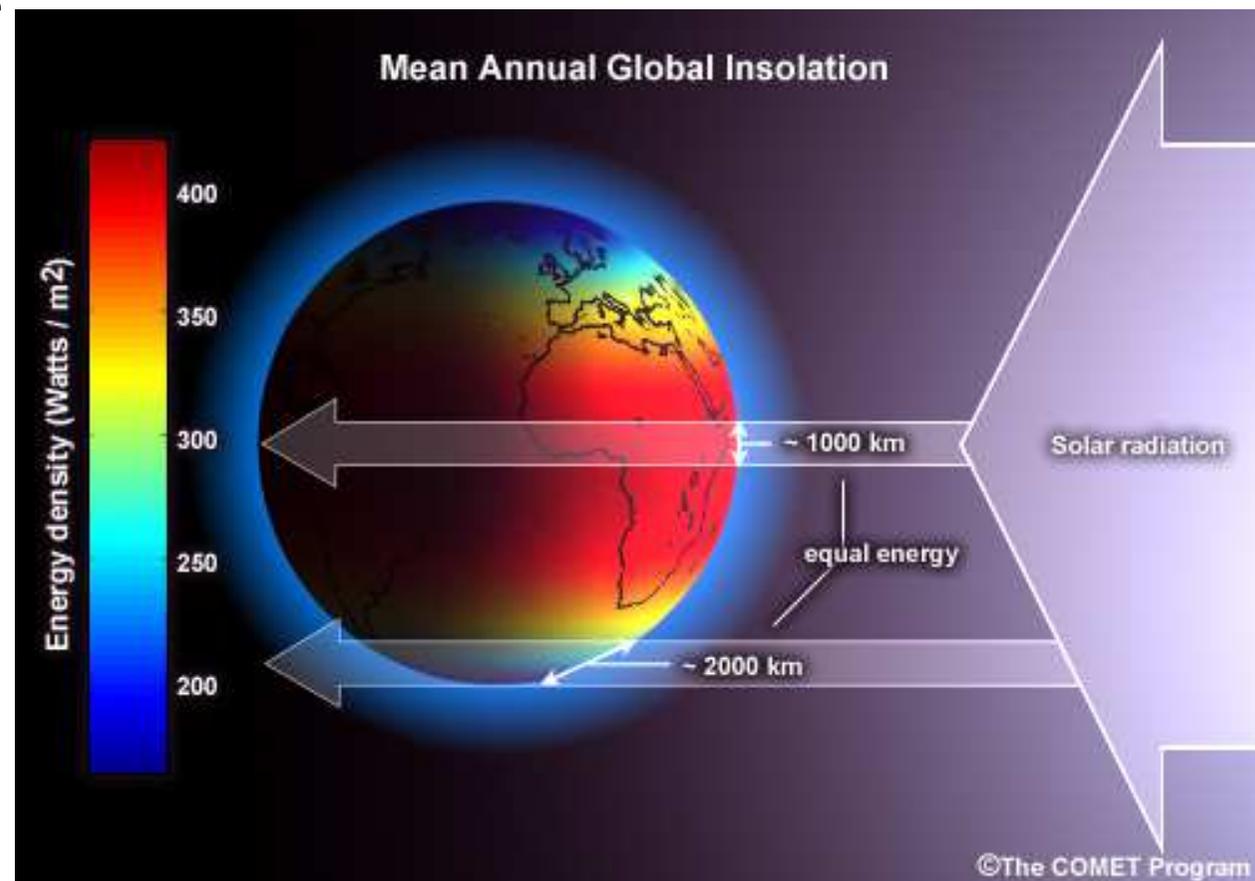
→ liées à la sphéricité de la Terre

- Caractéristiques liées au forçage radiatif

1. Différentiel énergétique du système Terre-Atmosphère entre les tropiques et le reste du globe



Circulations méridiennes
d'échelle planétaire
Cellules de Hadley



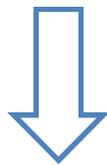
Spécificités des régions tropicales



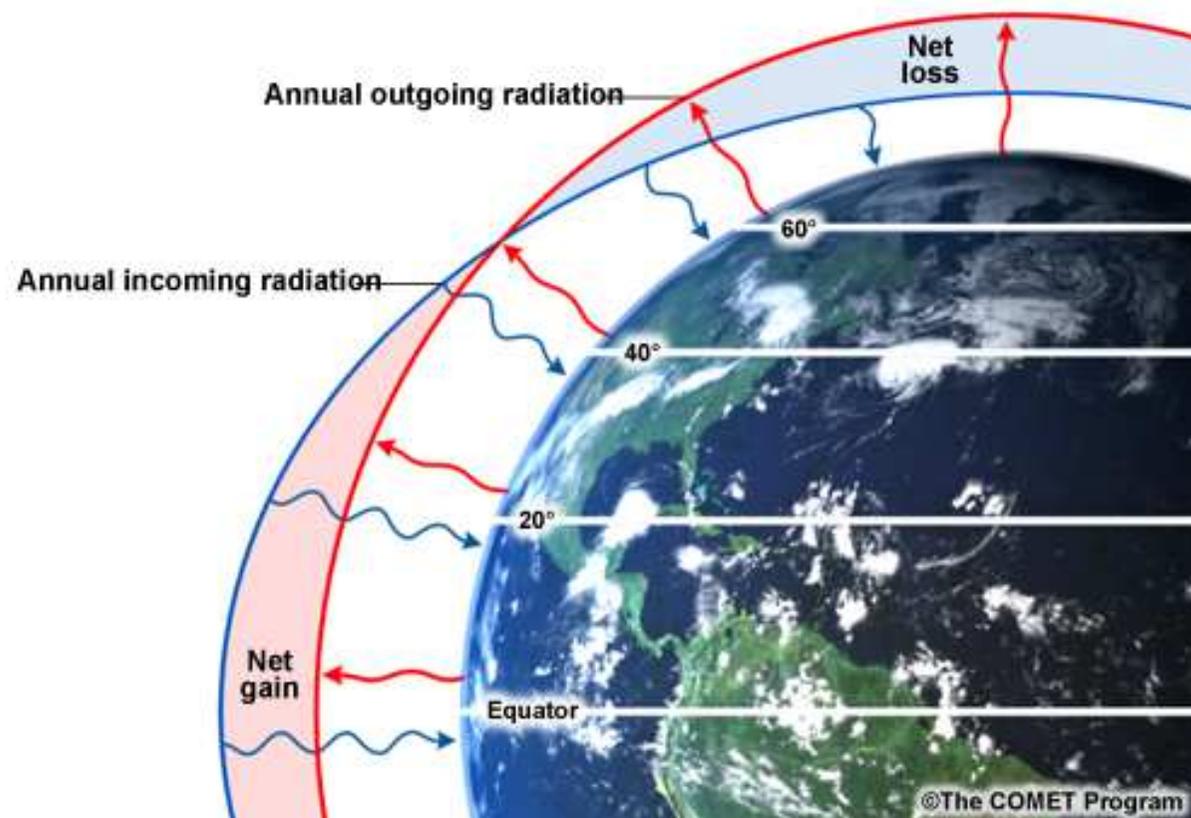
→ liées à la sphéricité de la Terre

- **Caractéristiques liées au forçage radiatif**

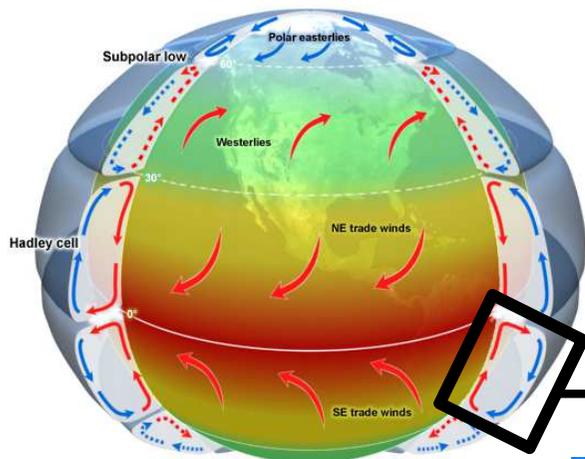
2. En zone équatoriale, fort déséquilibre radiatif entre la surface et le sommet de l'atmosphère



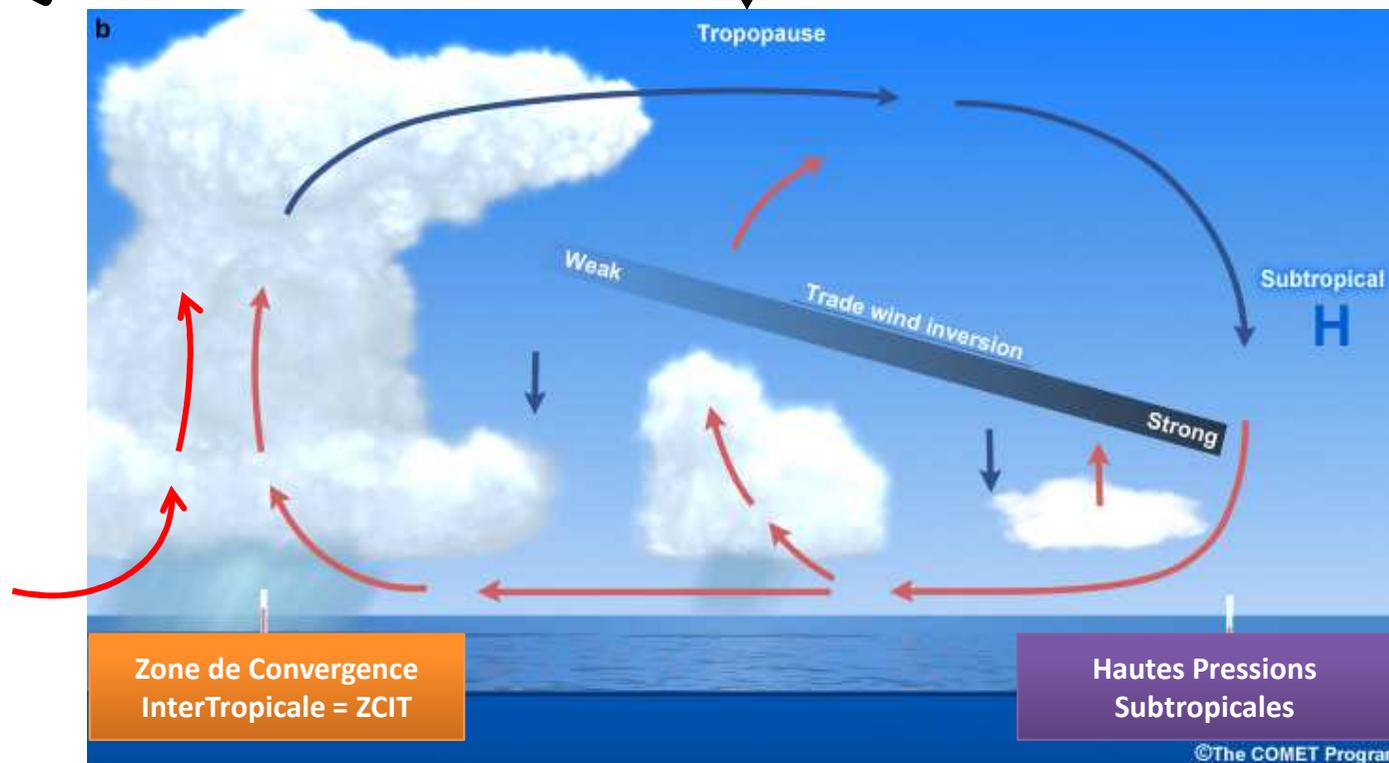
Redistribution de l'excédent d'énergie par des **mouvements verticaux de grande échelle** (ZCIT)



Spécificités des régions tropicales



Cellules de Hadley



Spécificités des régions tropicales

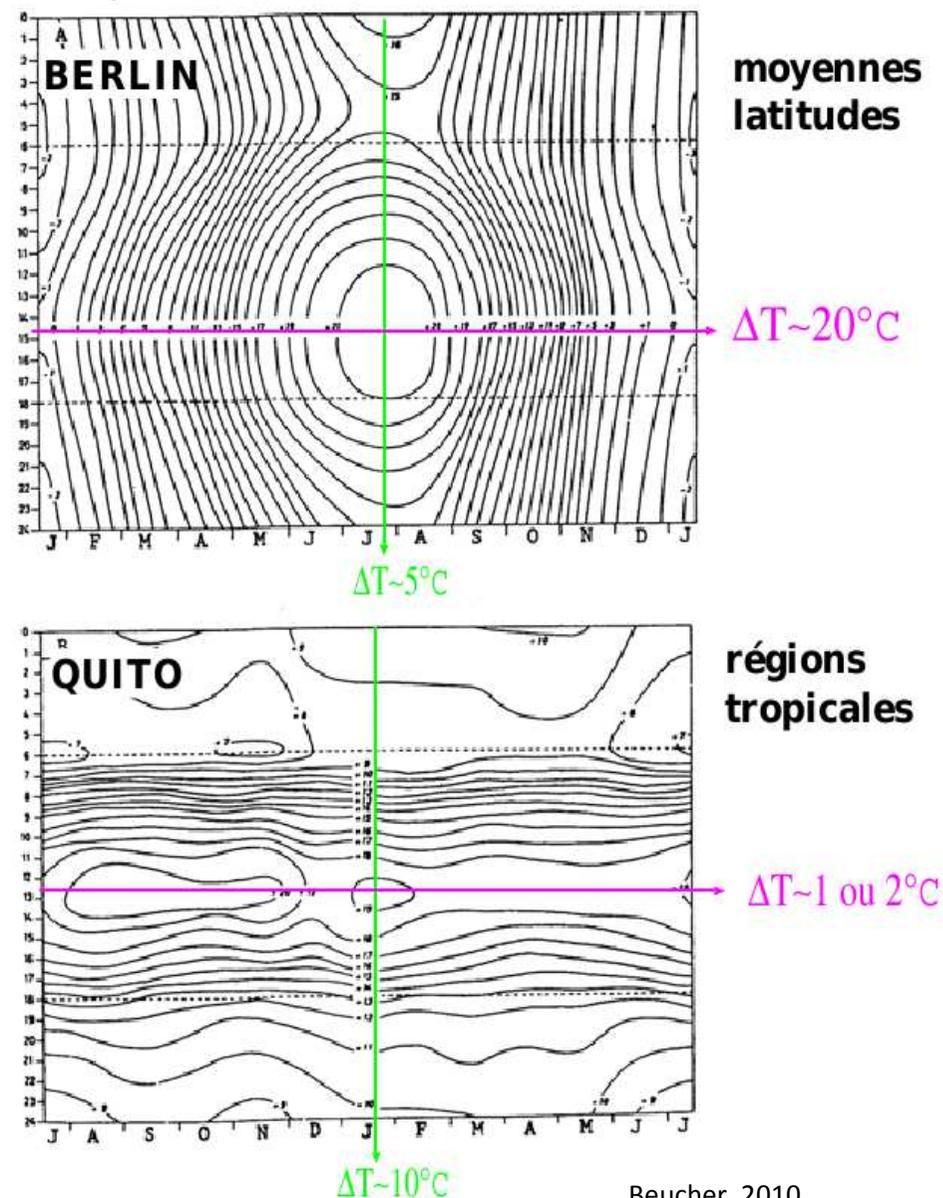


→ liées à la sphéricité de la Terre

- Caractéristiques liées au forçage radiatif

3. Sous les tropiques, amplitude du **cycle diurne** 10 fois supérieure à celle du **cycle annuel**

→ 1^{ère} source de variabilité de l'atmosphère tropicale



Beucher, 2010



→ *liées à la sphéricité de la Terre*

- **Faiblesse de la force de Coriolis aux basses latitudes**

- Gradients horizontaux de température et de géopotential 10 fois plus faibles sous les tropiques / latitudes moyennes ⇒
atmosphère tropicale quasi barotrope
- $< 10^\circ$ de latitude : équilibre géostrophique de moins en moins vérifié ⇒ forte composante divergente du flux

⇒ gradients de pression et contrastes en température faibles

⇒ masses d'air relativement homogènes et perturbations initiées par des différences modestes dans les gradients de vent ou de chaleur

La convection tropicale



Fortes valeurs du rayonnement solaire + fortes variations diurnes

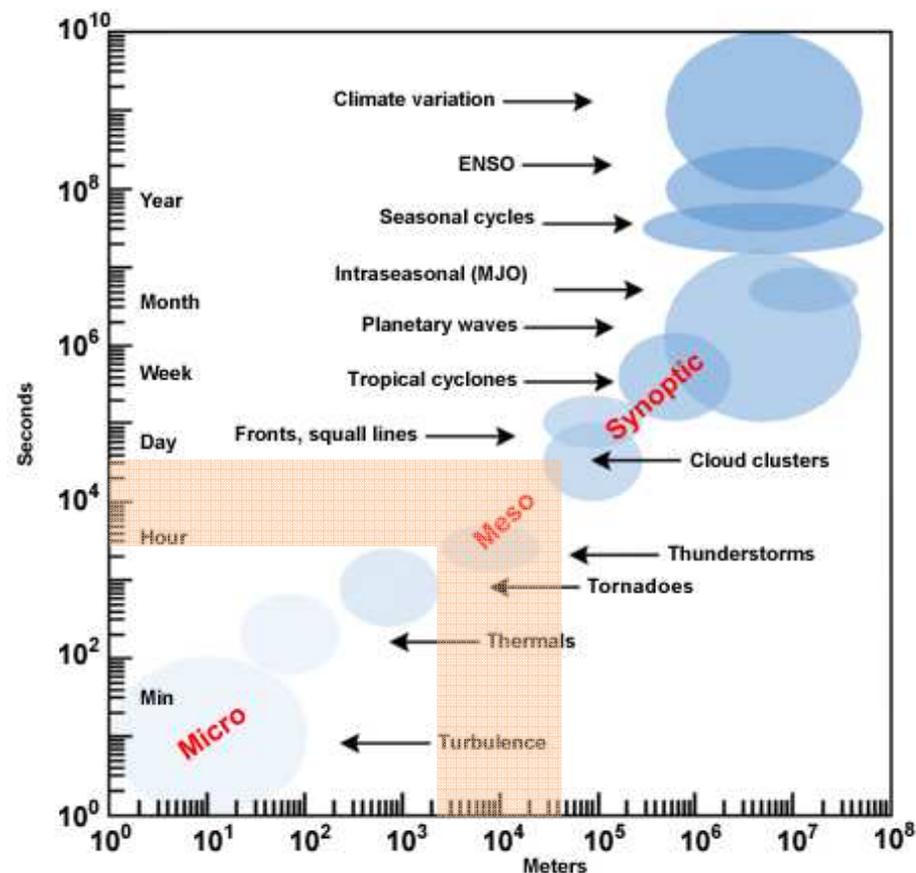


Contrastes spatiaux en T et chaleur



Circulations locales d'échelle diurne

Climat régional et temps aux tropiques dominés par processus d'échelle temporelle de l'ordre de la journée et circulations locales de méso-échelle

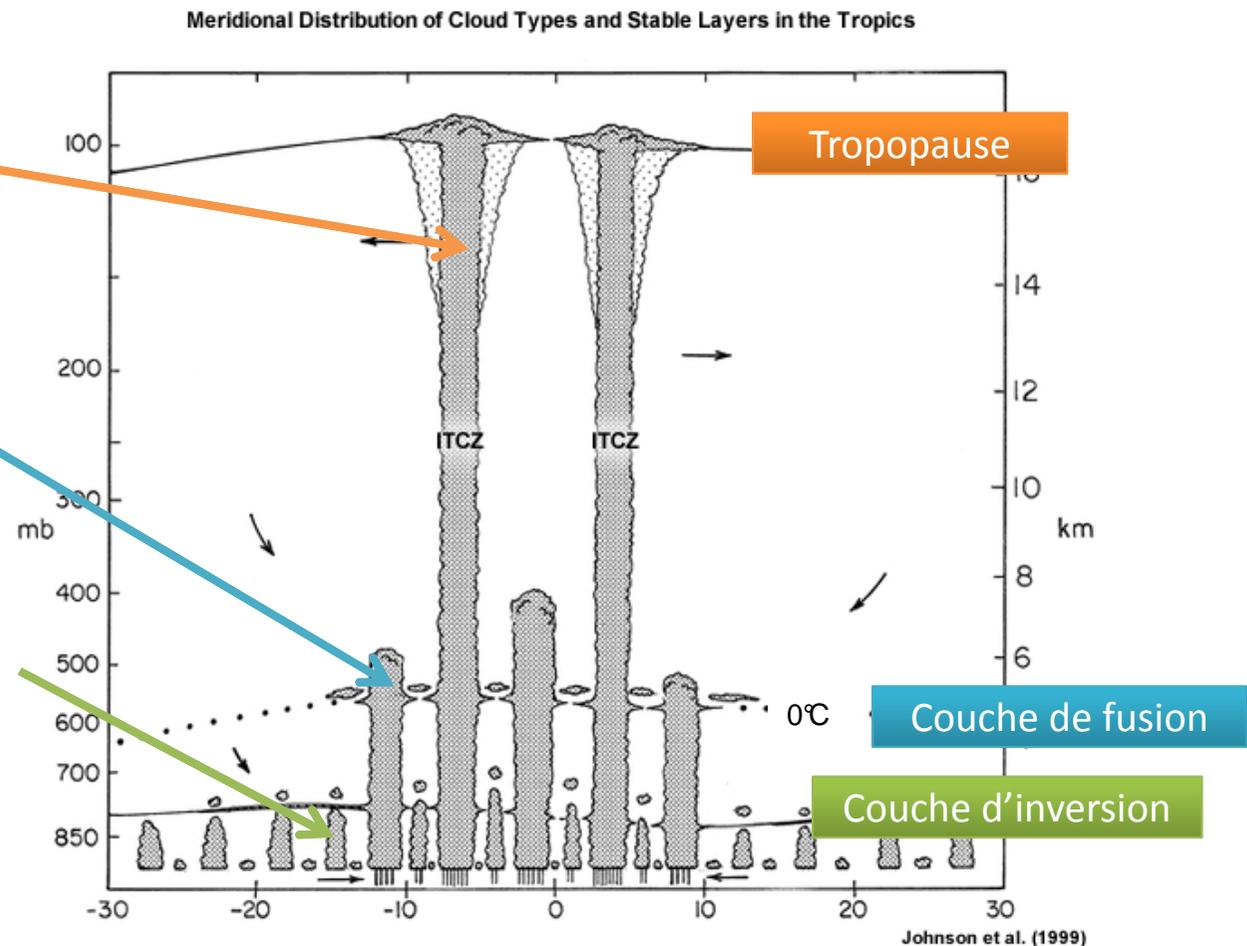


Les phénomènes convectifs en zone tropicale



→ 3 modes de convection aux tropiques

- Convection profonde atteignant la tropopause
- Cumulus congestus pénétrant la couche de fusion
- Convection peu profonde pénétrant la couche d'inversion





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



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...)

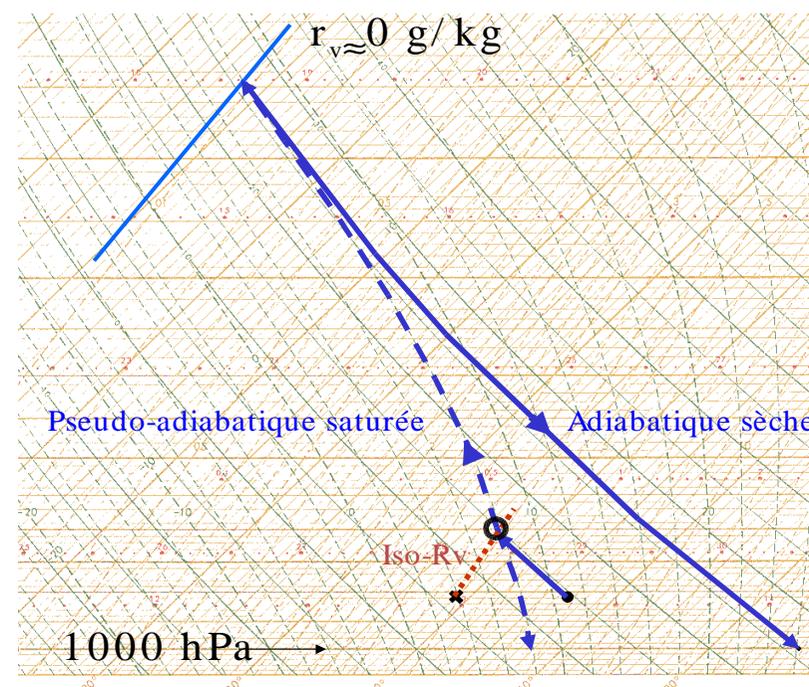
➔ Maillon essentiel de la chaîne de processus participant à la redistribution de l'énergie au sein du système Terre/atmosphère

Notions de base – 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**



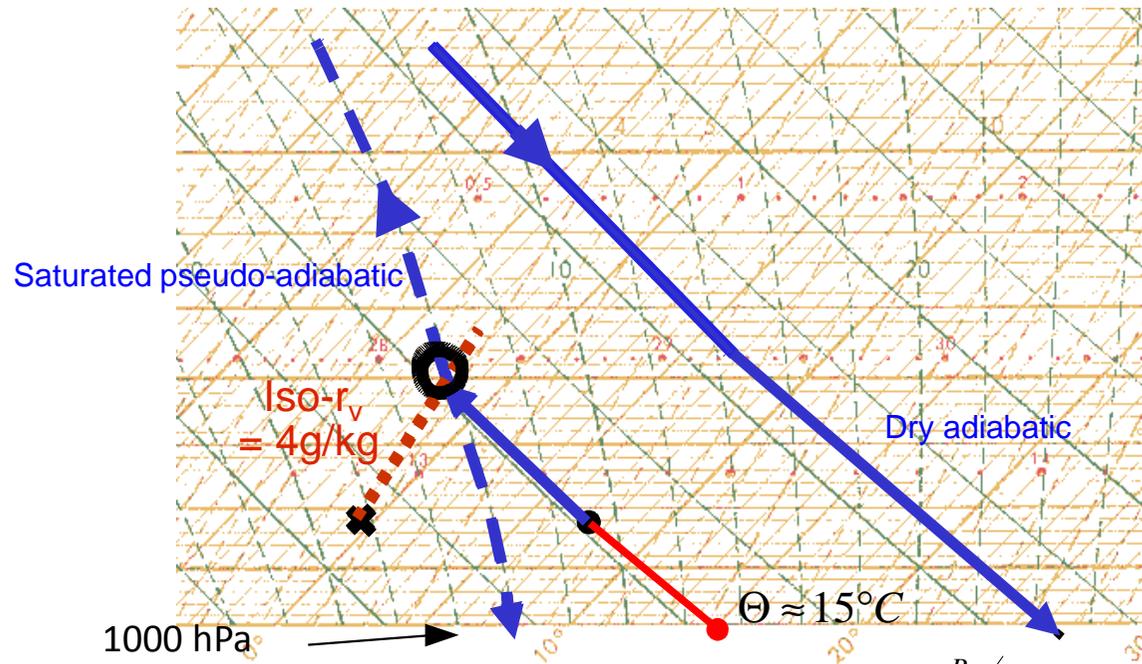
→ Importance de la proportion d'eau

- **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 – Les invariants par adiabaticisme



- **Température potentielle** $\Theta = T_0 \left(\frac{1000}{P_0} \right)^{R_a / C_{pa}}$
 → 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 – Les invariants par adiabaticisme

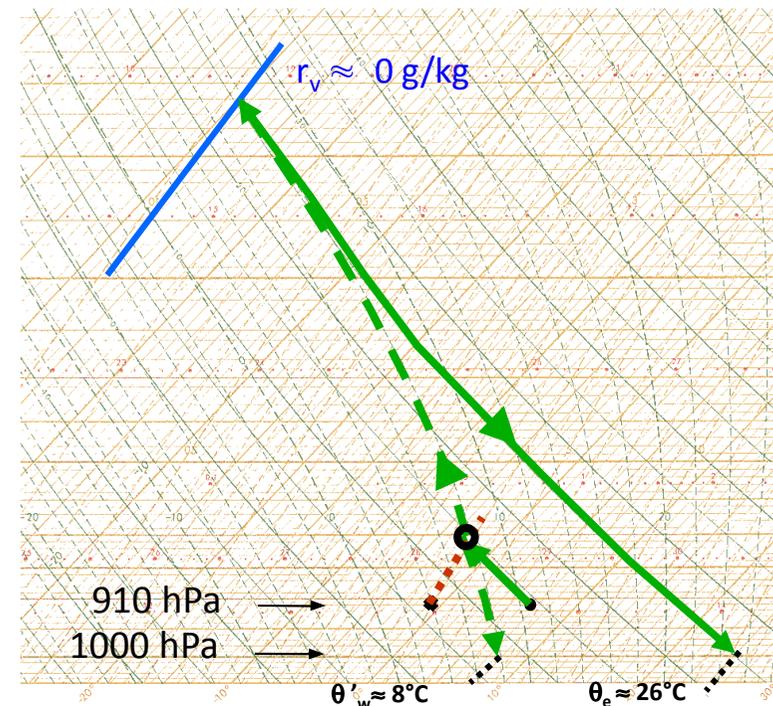


- **Température potentielle équivalente** $\Theta_e \approx \Theta \exp(Lq_v / C_p T)$
 - température d'une particule d'air humide amenée adiabatiquement à 1000 hPa, après saturation adiabatique puis assèchement pseudo-adiabatique
 - prise en compte de l'humidité et des processus de condensation/évaporation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

Θ_e → effet de Foehn idéal

- **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'_w → subsidences sous précipitations





- **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 $(r_v - r_v^{env})$ ↗

THÉORIE DE LA PARTICULE : Accélération = Flottabilité

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

➔ 2 régimes : Cas stable si $N^2 > 0$ ➔ oscillation de gravité

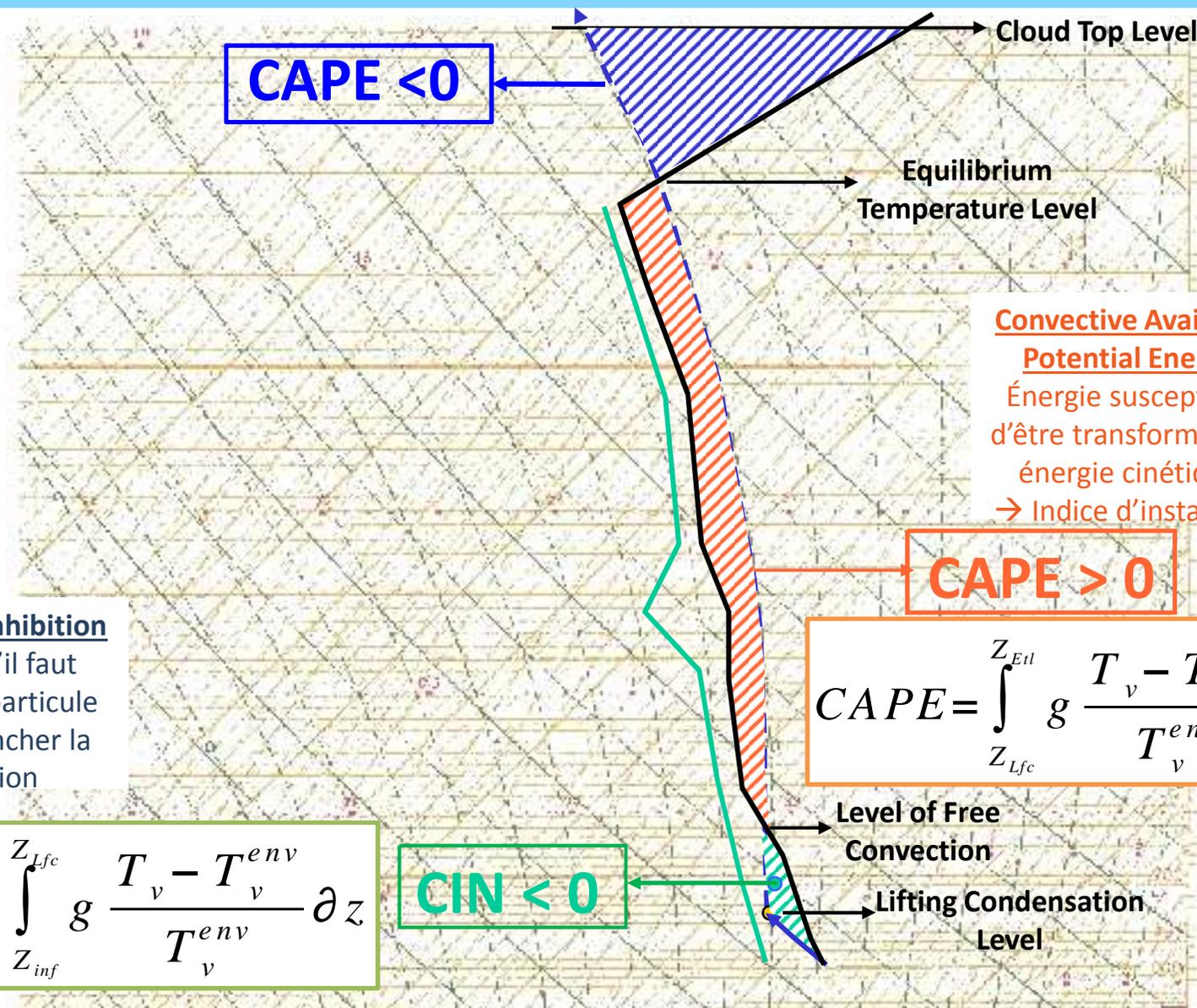
Cas instable si $N^2 < 0$ ➔ convection sèche ou humide

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 : $CAPE = 1250 \text{ J/kg}$ ➔ w_{max} (théorique) = 50 m/s

Notions de base – Flottabilité, théorie de la particule



CAPE < 0

Convective Available Potential Energy
Énergie susceptible d'être transformée en énergie cinétique
→ Indice d'instabilité

CAPE > 0

$$CAPE = \int_{Z_{Lfc}}^{Z_{Et}} g \frac{T_v - T_v^{env}}{T_v^{env}} \partial z$$

Convective Inhibition

Énergie qu'il faut fournir à la particule pour déclencher la convection

$$CIN = \int_{Z_{inf}}^{Z_{Lfc}} g \frac{T_v - T_v^{env}}{T_v^{env}} \partial z$$

CIN < 0



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



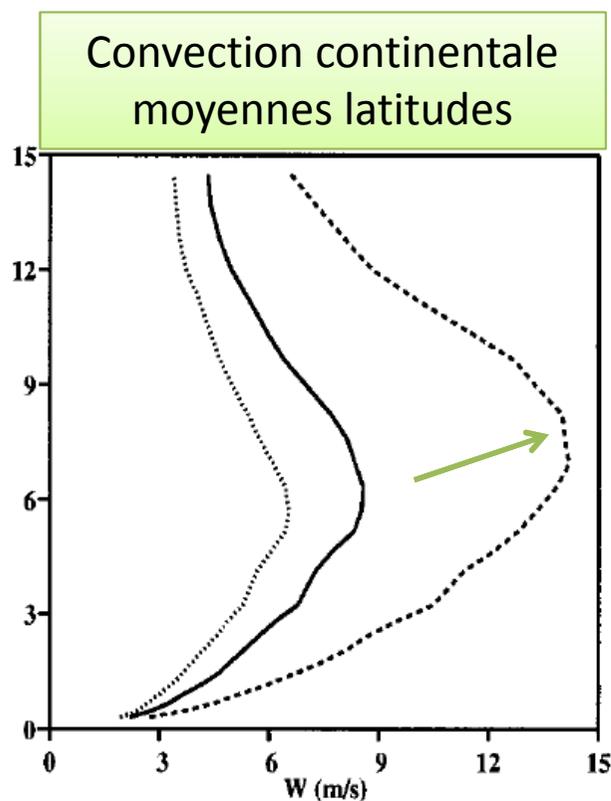
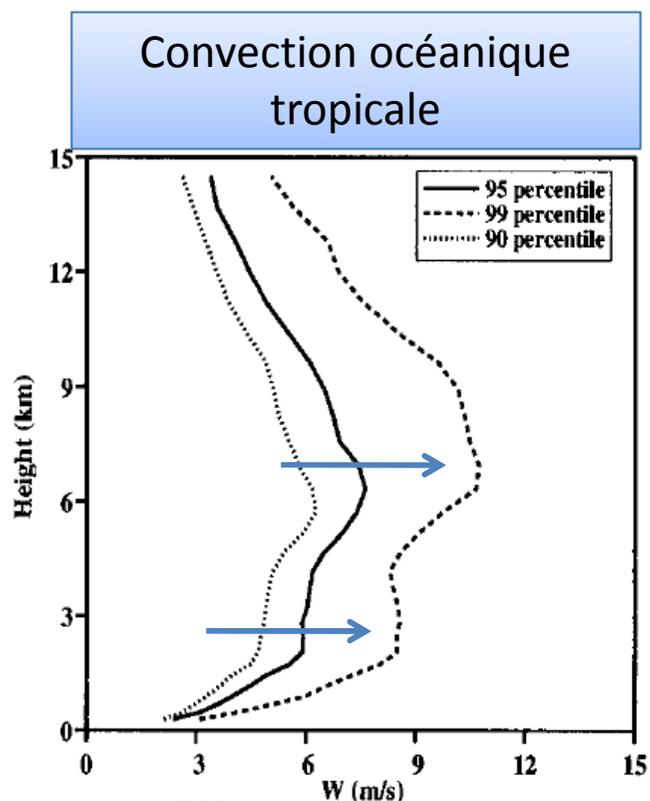
→ Déstabilisation de l'atmosphère

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

Phénomènes induits : 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 : $w_{\max}^{\text{théorique}} = \sqrt{2 \times \text{CAPE}}$



→ Type et intensité de la convection :

- ascendances, subsidences
- CAPE, DCAPE
- charge en eau condensée
- cisaillement vertical de vent

Xu et Randall (2001)

Phénomènes induits : les subsidences

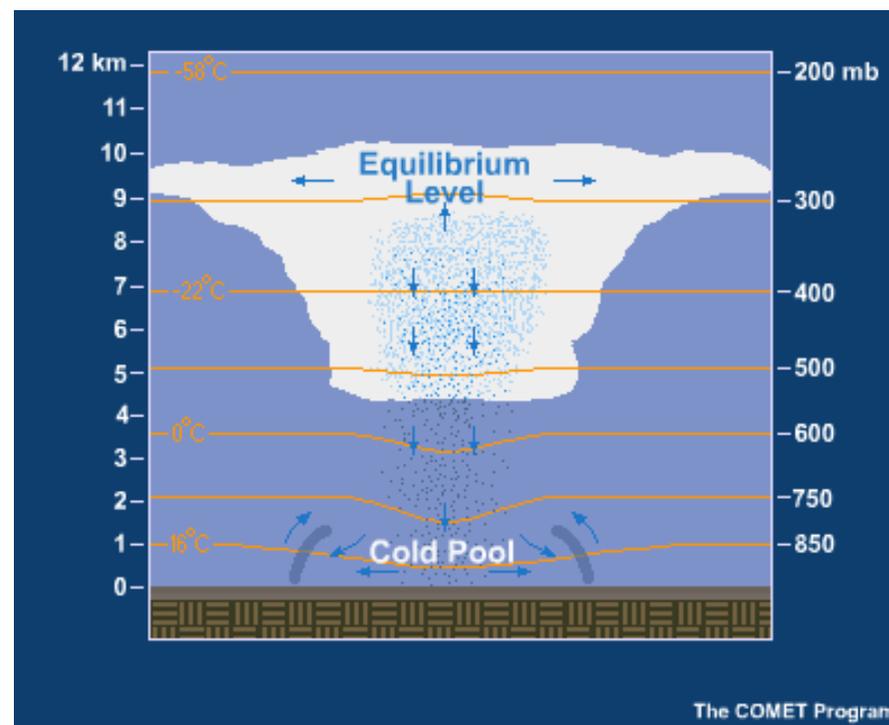


- **Subsidences convectives = réponse aux ascendances**

- ✓ 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 : $w \sim$ 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 : courants de densité, fronts de rafale

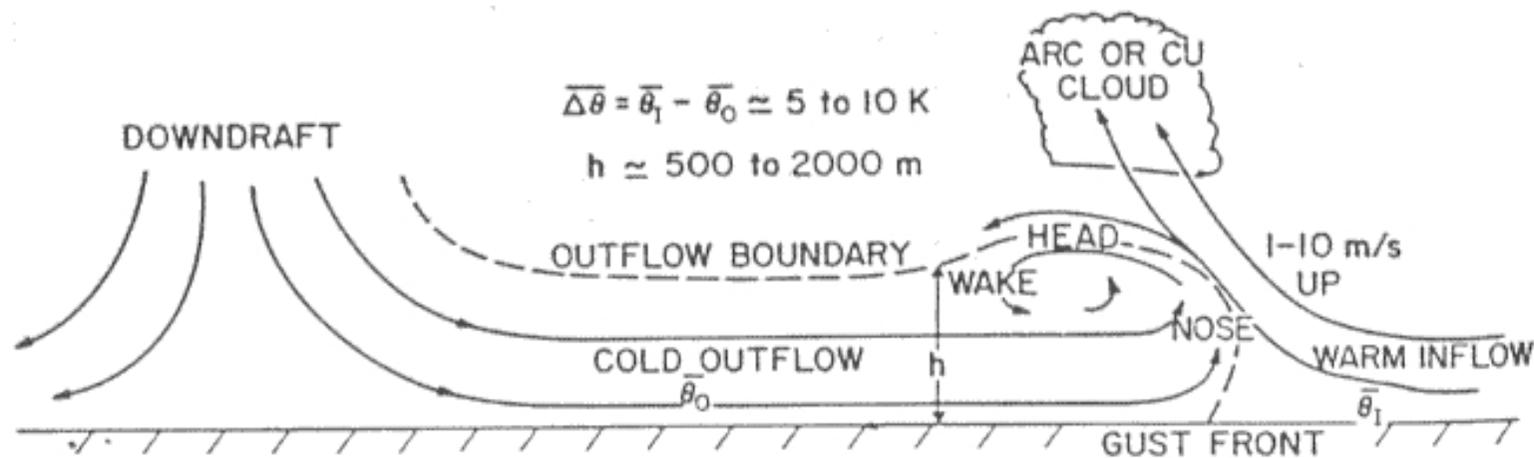


Courant de densité = conséquence de la subsidence au sol
= poche d'air dense s'étalant au sol

- ✓ Brusques changements en surface (rotation et intensification du vent, précipitations, $T \searrow$, $R \nearrow$...)

- ✓ Favorise le déclenchement de la convection

- ✓ Vitesse de propagation $C^* = \sqrt{-2g \left(\frac{\Theta'_v}{\Theta_{v0}} - q_l - q_s \right) h}$



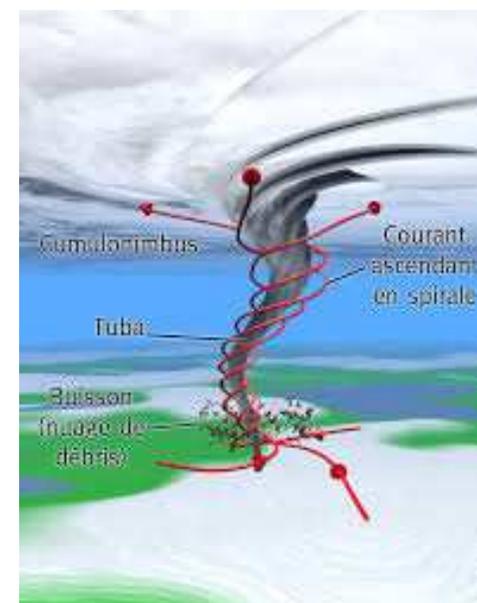
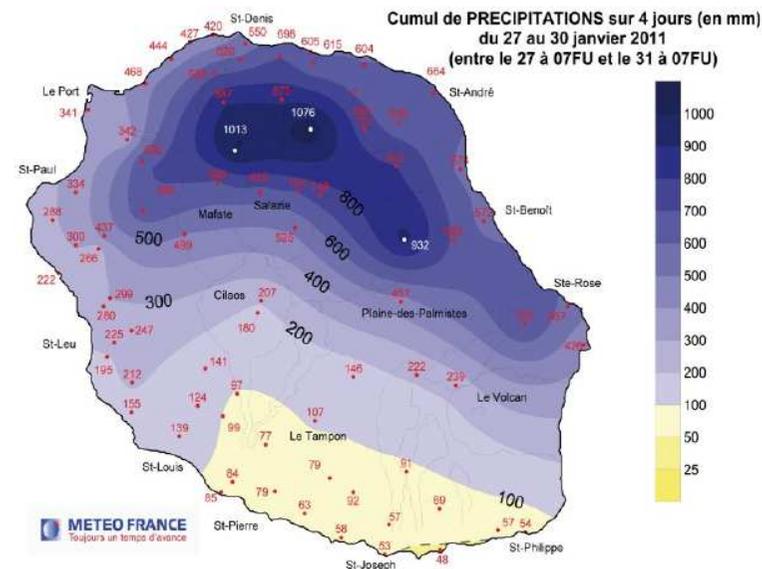


Précipitations

- ✓ partie stratiforme : extension et durée
- ✓ partie convective : forte intensité

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

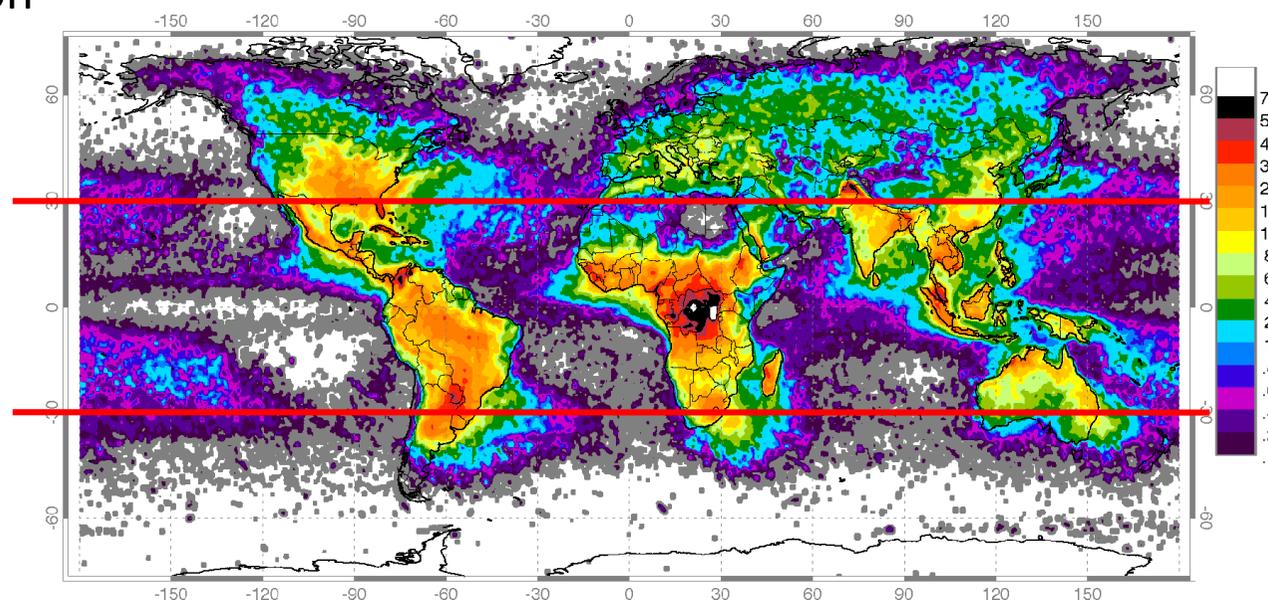
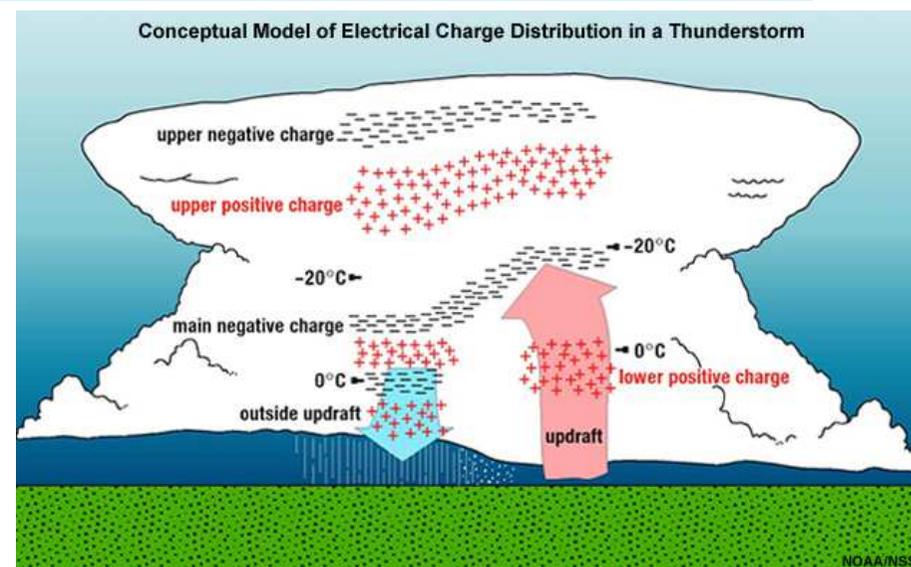


Phénomènes induits : les éclairs



Eclairs = décharge électrostatique

- séparation de charge +/- consécutive aux collisions entre particules de glace
 - importance de la phase glace et de l'intensité des ascendances
- Indicateur de l'intensité de la convection



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



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

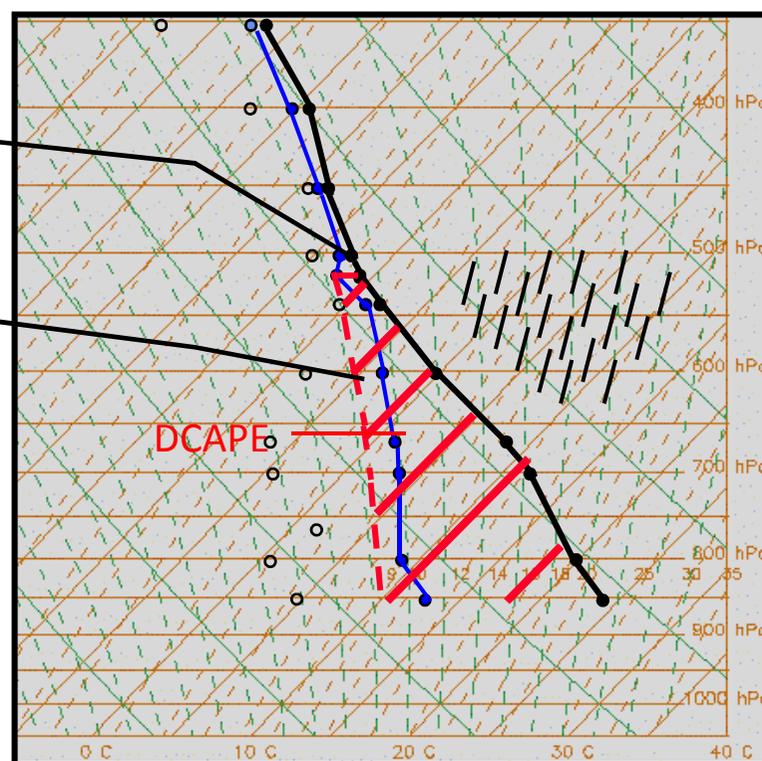
Environnement : stabilité thermique



- **Convective Available Potential 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

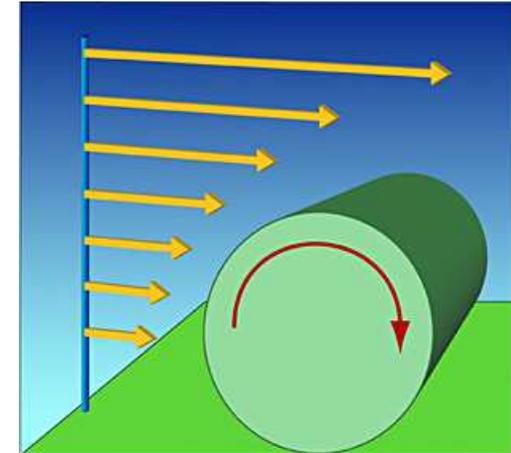
2. Descente pseudo-adiabatique
jusqu'à 1000 hPa
avec évaporation
pour rester à saturation



Environnement : cisaillement vertical de vent



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



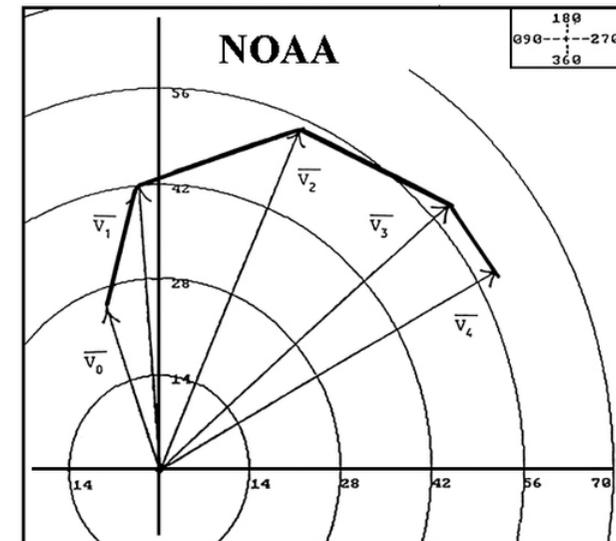
Représentation sur un hodographe

→ Vecteur vent

- Origine : centre du repère
- Orientation : direction du vent
- Longueur \propto module du vent

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

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

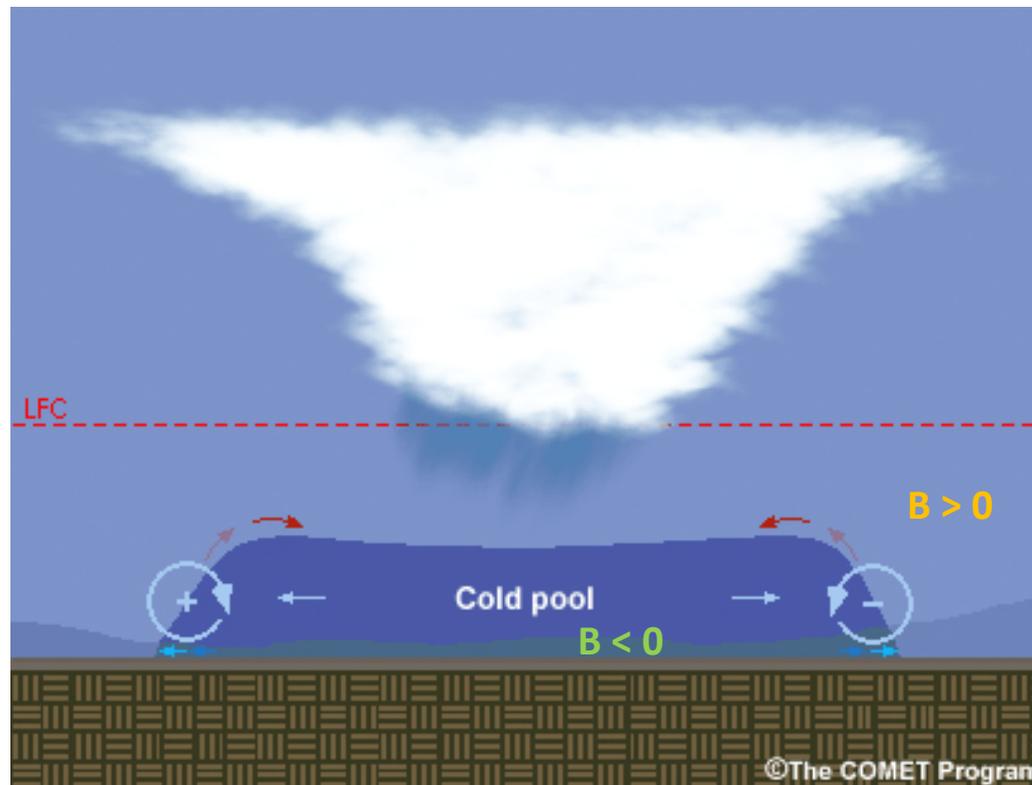


Height / Hauteur (km)	Dir	Speed / Vitesse
Sfc	161°	25
1	175°	42
2	204°	54
3	229°	59
4	241°	59



Interaction avec le courant de densité

- 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**





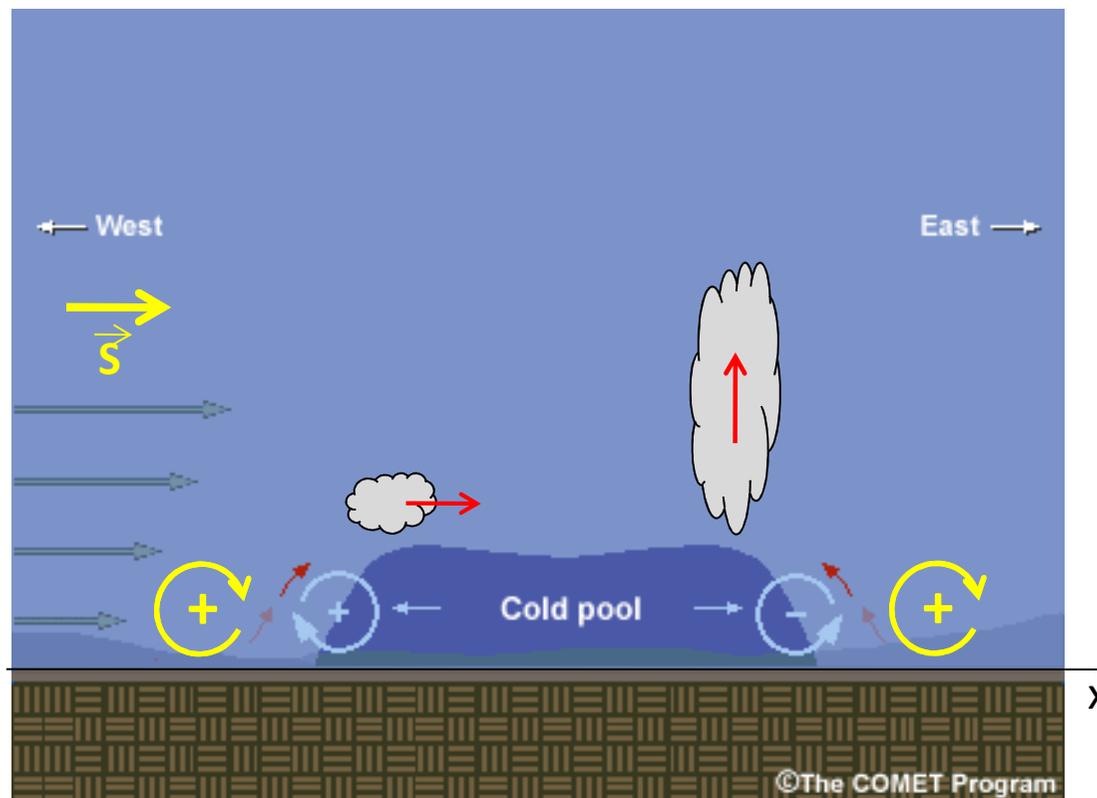
Interaction avec le courant de densité

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

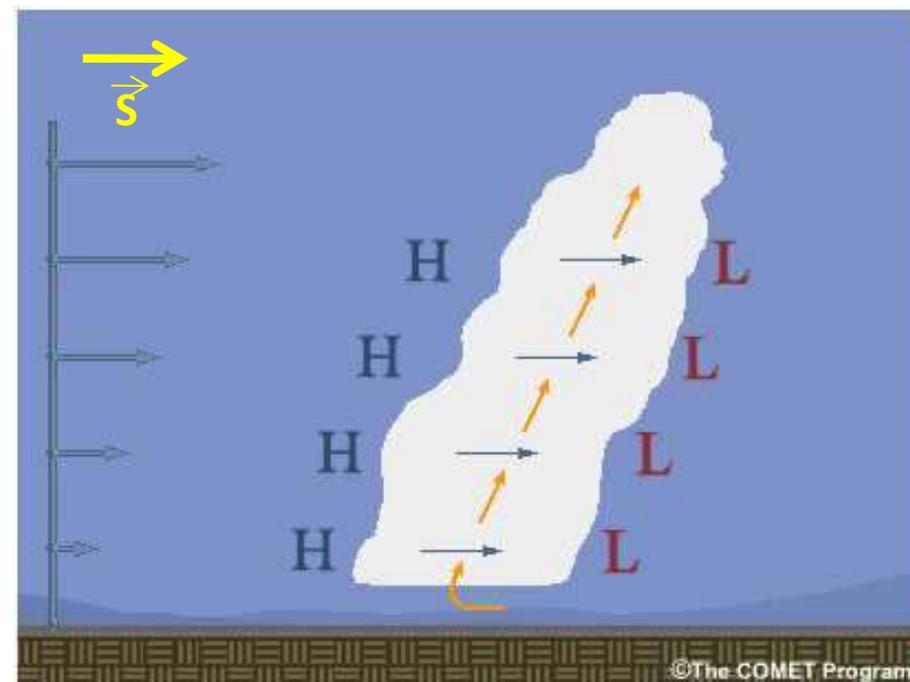
- ascendance redressée au front de rafale
- vitesses verticales ↗





Interaction avec les mouvements verticaux

- Le courant ascendant joue le rôle d'un obstacle au flux 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**



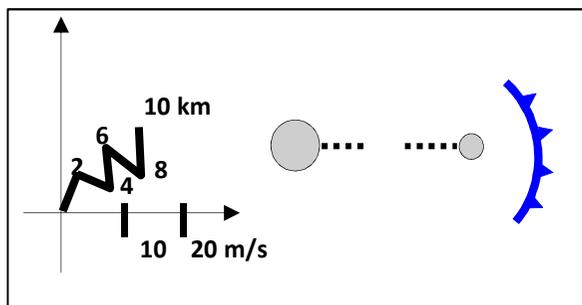
Environnement : cisaillement vertical de vent



Division de cellules convectives

Cisaillement faible

Cisaillement
unidirectionnel

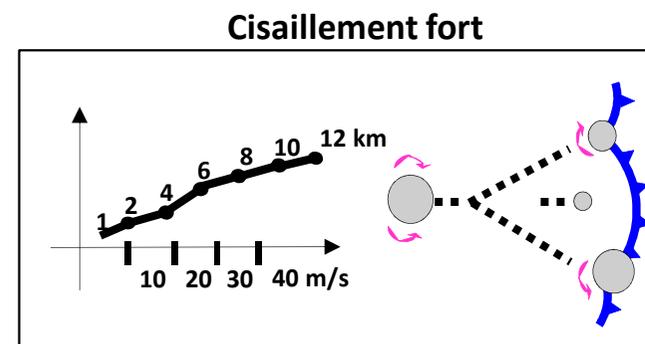
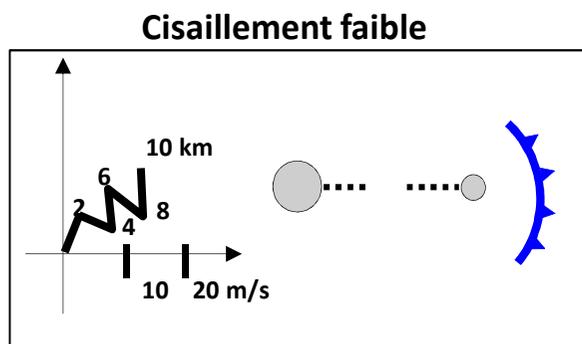


Environnement : cisaillement vertical de vent

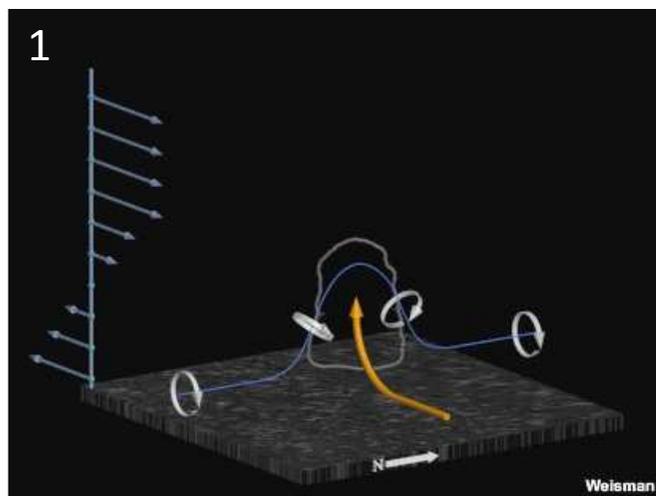


Division de cellules convectives

Cisaillement unidirectionnel



1. Courant ascendant + cisaillement vertical de vent → formation de 2 tourbillons

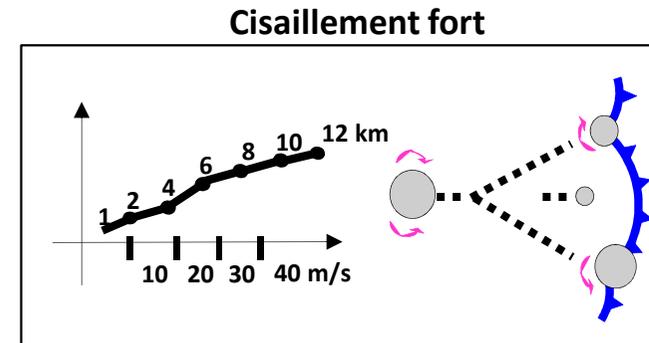
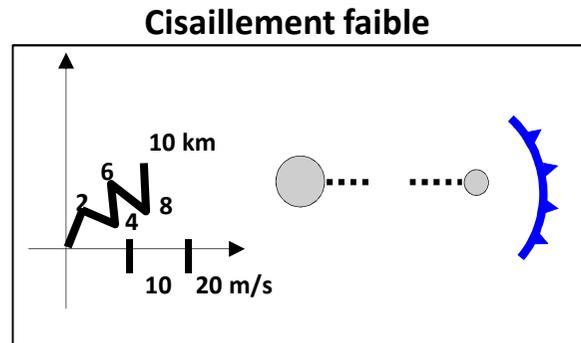


Environnement : cisaillement vertical de vent

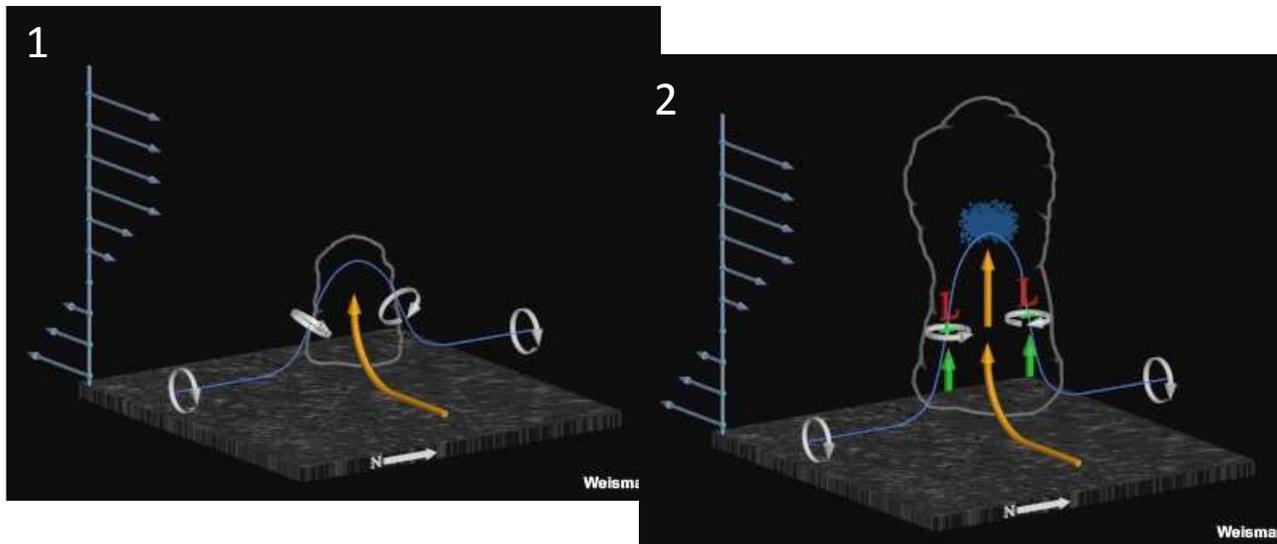


Division de cellules convectives

Cisaillement unidirectionnel



1. Courant ascendant + cisaillement vertical de vent → formation de 2 tourbillons
2. Min. de pression associé aux 2 zones de tourbillon vertical → updrafts au centre des vortex

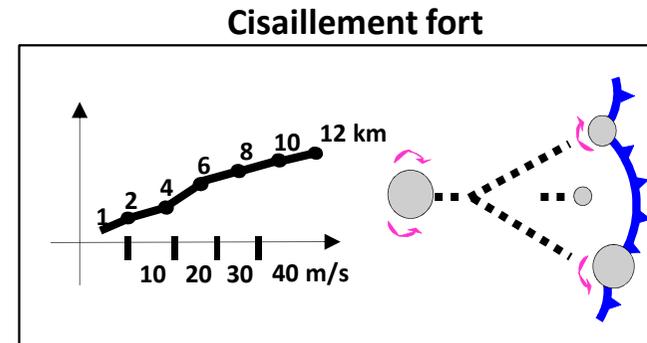
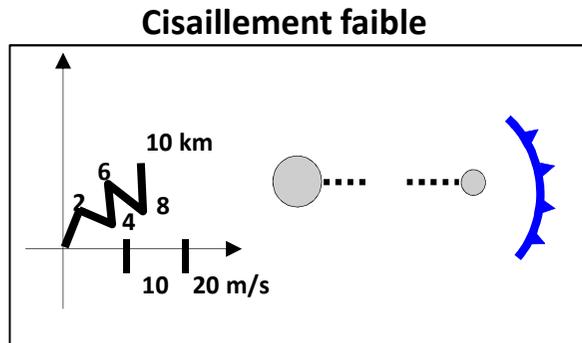


Environnement : cisaillement vertical de vent

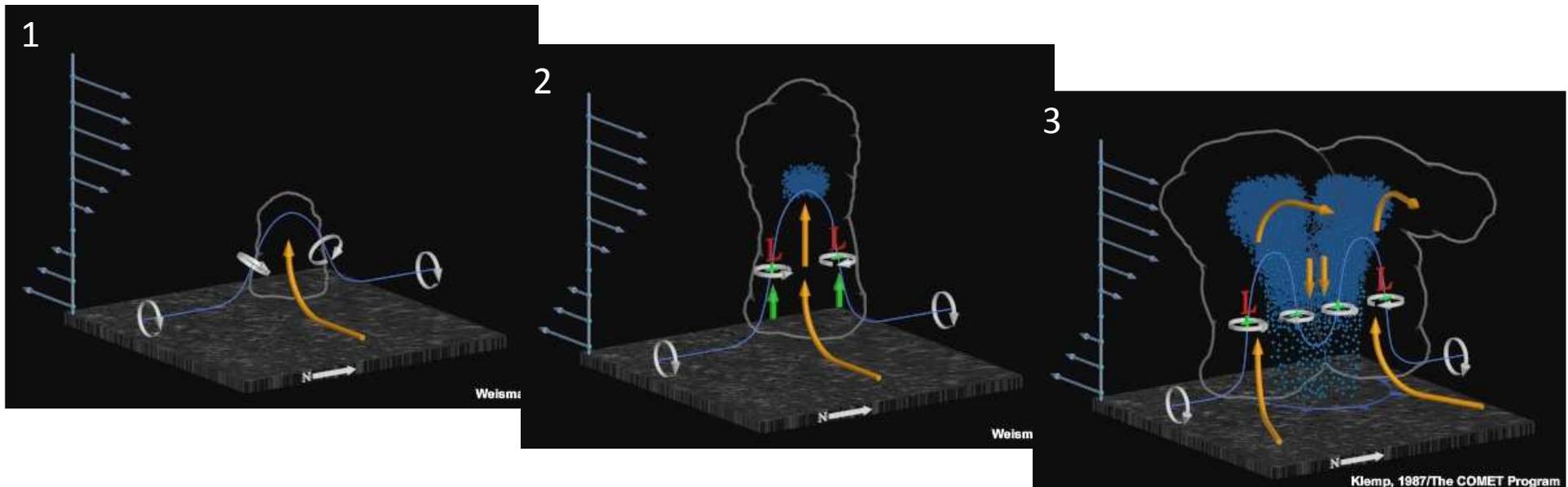


Division de cellules convectives

Cisaillement unidirectionnel



1. Courant ascendant + cisaillement vertical de vent → formation de 2 tourbillons
2. Min. de pression associé aux 2 zones de tourbillon vertical → updrafts au centre des vortex
3. Charge en eau freine l'ascendance et l'inhibe → séparation en 2 parties de rotation inverse



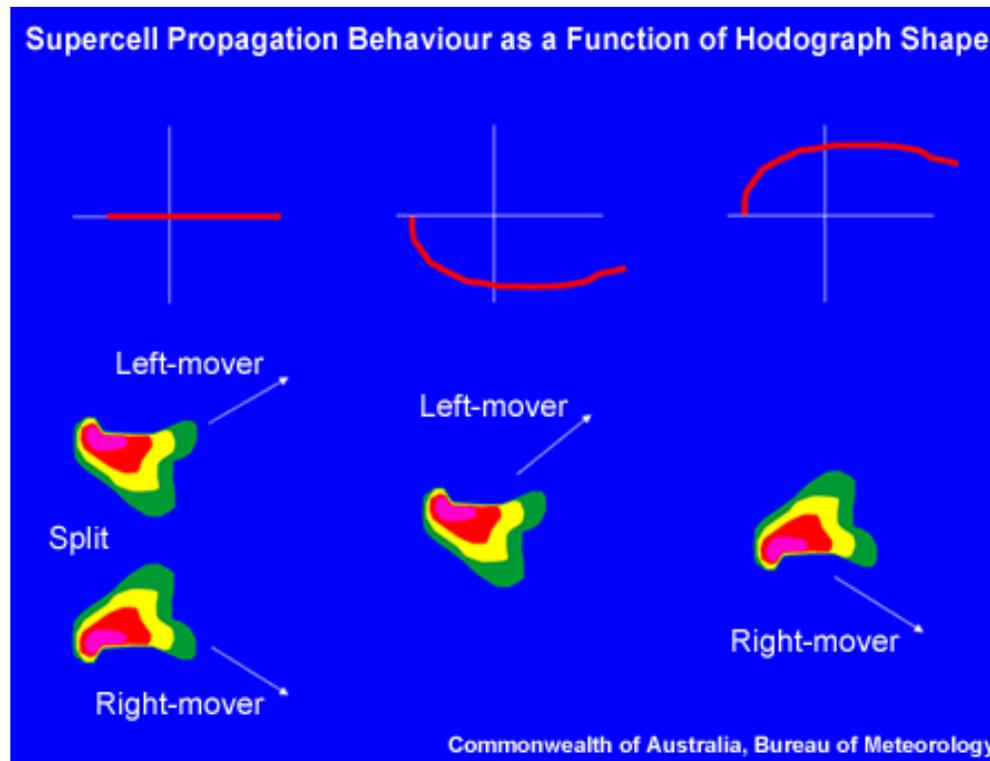


Division de cellules convectives

Cisaillement directionnel

→ rôle des gradients de pression qui favorisent

- la cellule droite si le cisaillement tourne dans le sens des aiguilles d'une montre
- la cellule gauche si le cisaillement tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre



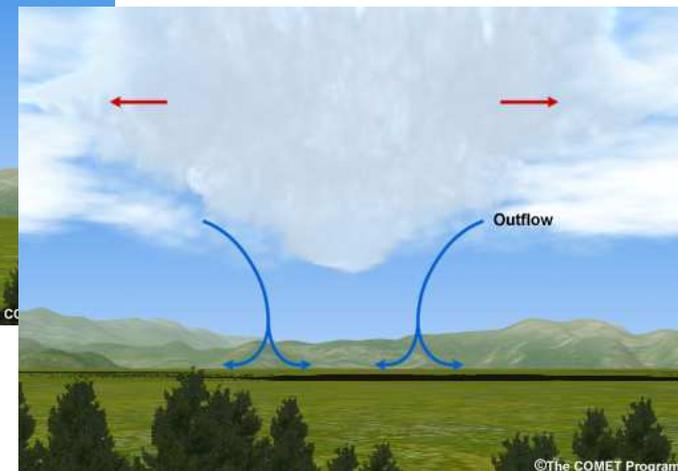
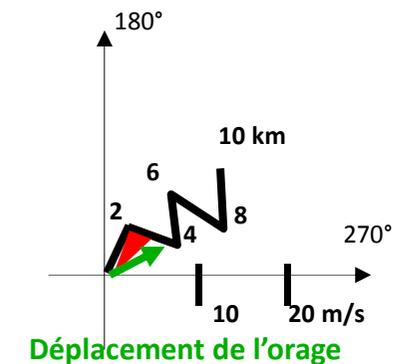
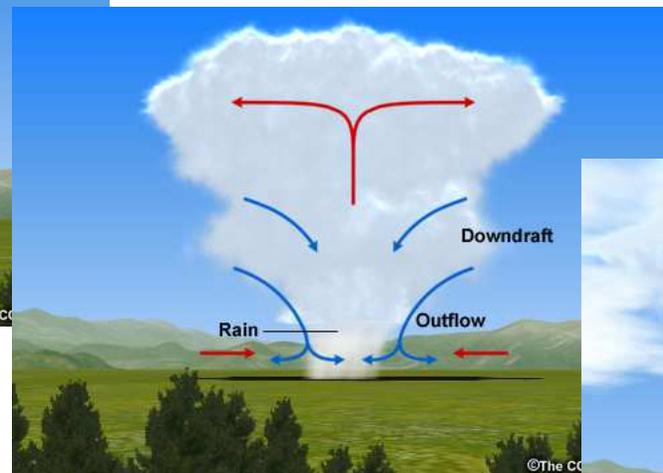
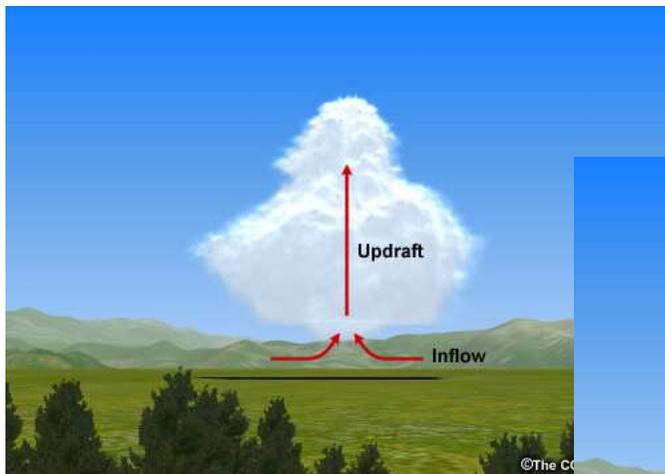


1. Définition de la convection
2. Quelques notions de base
3. Les facteurs déclenchants
4. Les phénomènes induits par la convection
5. Les conditions environnementales
6. Les différentes organisations de la convection

Organisation : convection ordinaire, cellule isolée



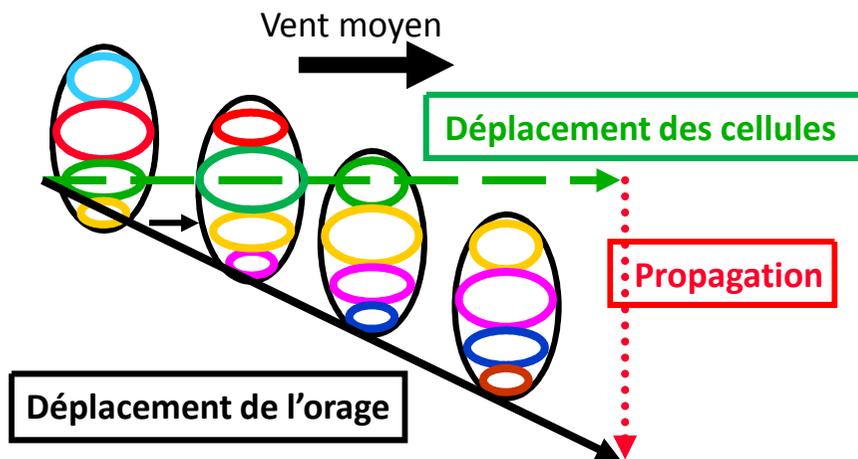
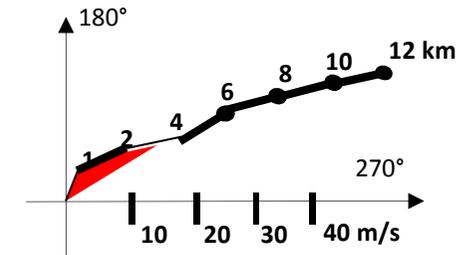
- ✓ **SYSTÈME CONVECTIF ÉLÉMENTAIRE** : 1 ascendance + subsidences compensatoires
- ✓ **Faible cisaillement de vent**
- ✓ Cb isolé à cycle de vie court (30 – 50 min)
- ✓ Pas de phénomènes très violents (averse puis pluies faibles sous enclume)
- ✓ Propagation à la vitesse moyenne de l'environnement



Organisation : convection isolée, multicellule



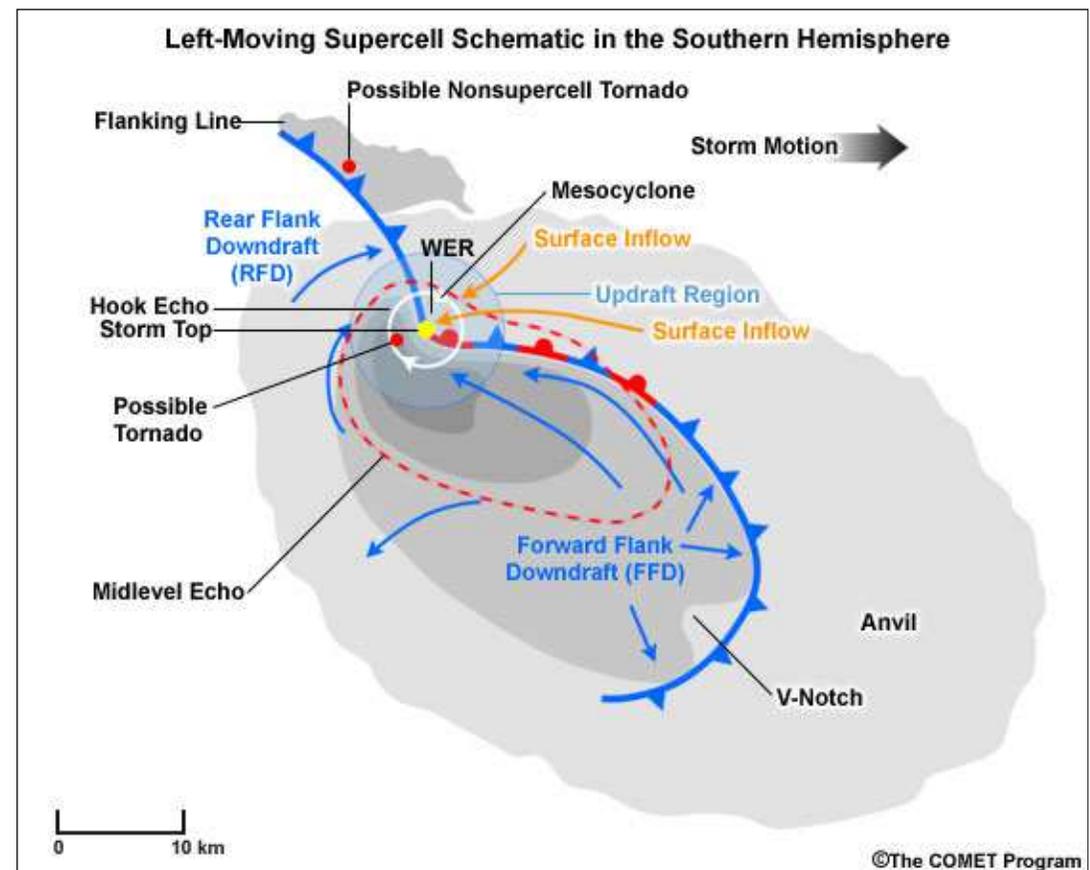
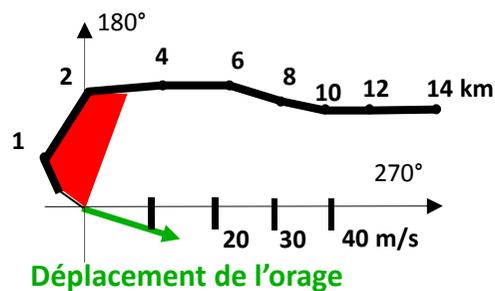
- ✓ **Fort cisaillement de vent unidirectionnel**
- ✓ Groupe de cellules à différents stades de développement
- ✓ **Propagation** = déplacement de cellules + genèse de nouvelles cellules
- ✓ Echelle horizontale : 20 à 30 km
- ✓ Grêle, rafales de vent et fortes pluies si stationnaire
- ✓ Durée de vie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



Organisation : 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 -100 km
- ✓ Durée de vie : plusieurs heures





Type de cellule	Processus dominant
Cellule ordinaire	Flottabilité (faible cisaillement)
Multicellule	Interactions <i>cold pool</i> – cisaillement
Supercellule	Interactions ascendance – cisaillement



Système Convectif de Méso-échelle = MCS

Définition

- ✓ Cellules orageuses organisées en vaste système convectif

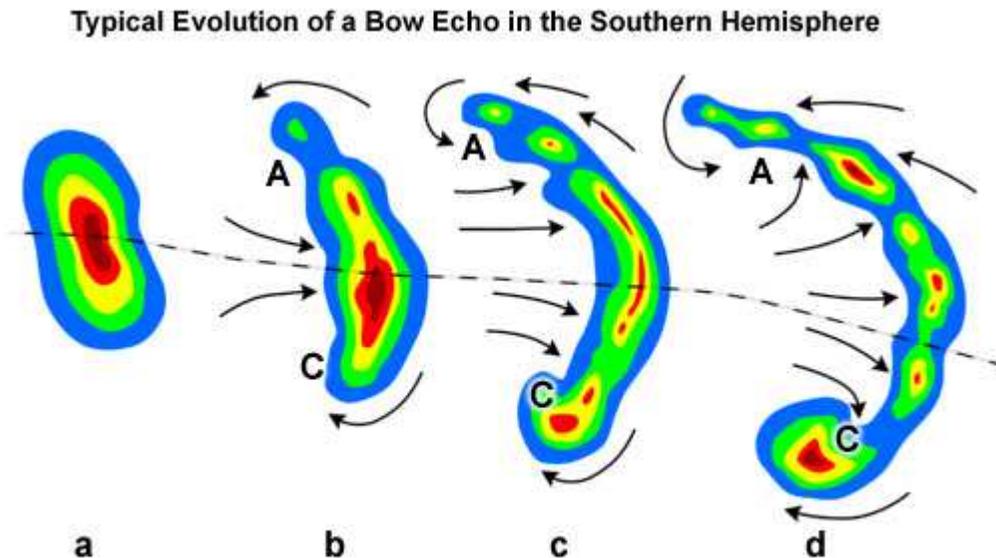
Caractéristiques

- ✓ 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 cisailé**

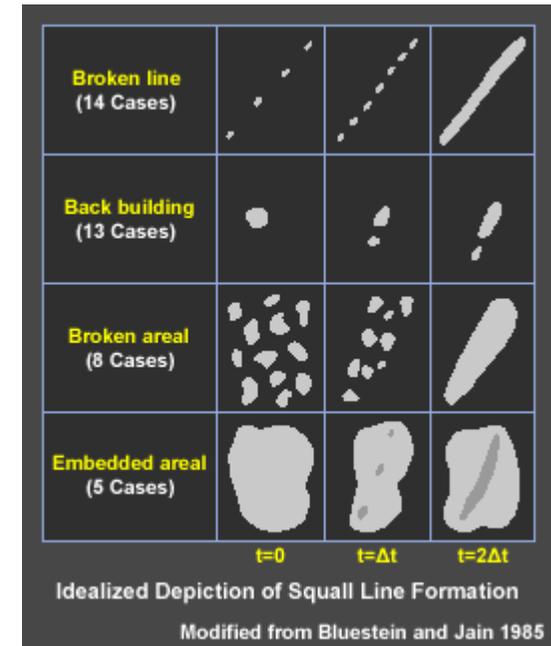


Différents types

- ✓ Ligne de grains
- ✓ Système en V



NOAA / The COMET Program

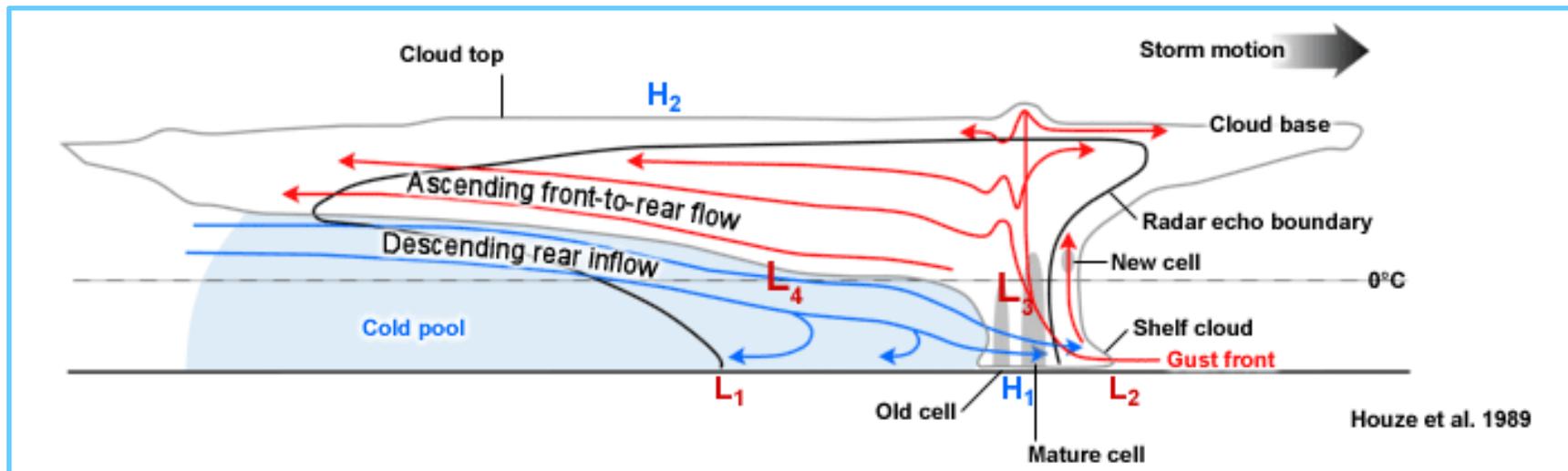
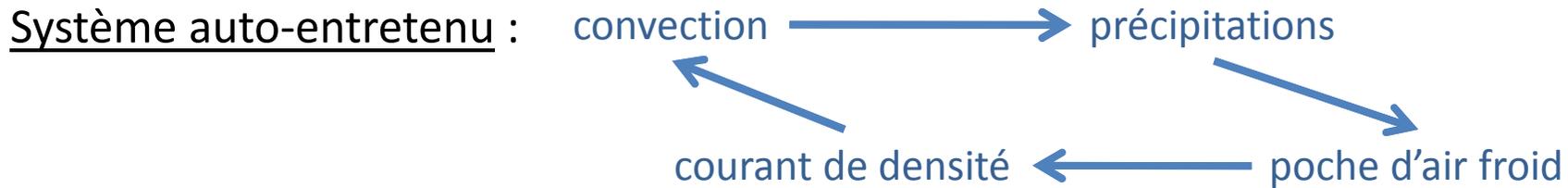


- ✓ **Complexe convectif de méso-échelle (MCC)** : ($T_{IR} < -32^{\circ}\text{C}$ sur + de 100000 km²) + ($T_{IR\text{cold}} < -52^{\circ}\text{C}$ sur + de 50000 km²) + (sur + de 6 h) – *diamètre ~ 600 km*

Organisation : systèmes convectifs de méso-échelle



• Archétype de la ligne de grains



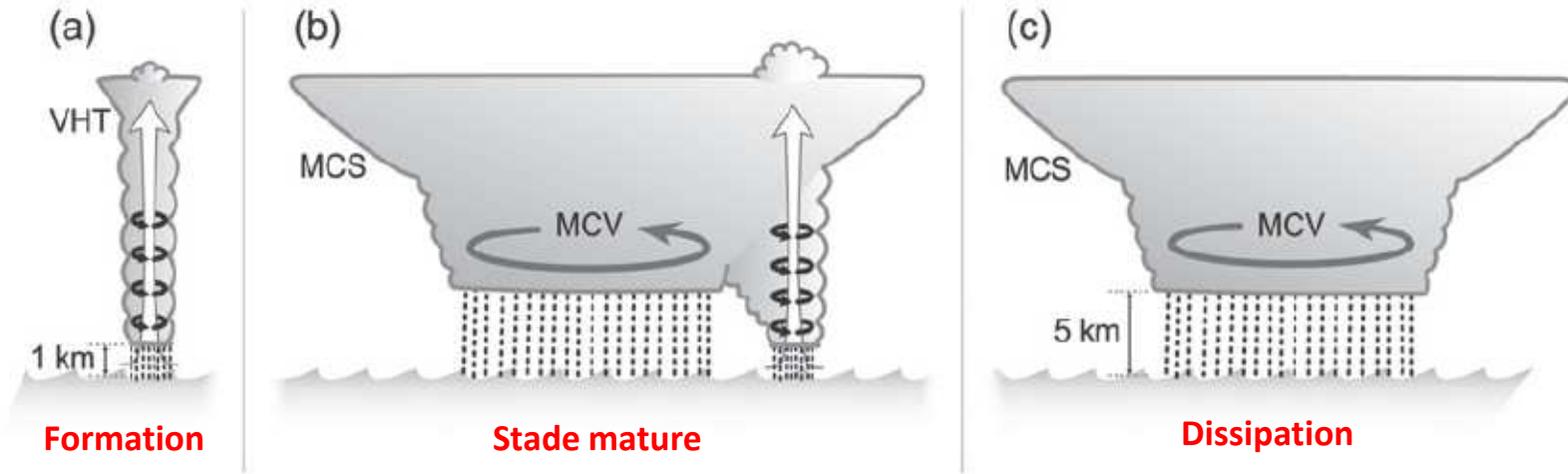
• Spécificités sous les Tropiques

- ✓ Moins de cisaillement
- ✓ Courant de densité moins important
- ✓ Cellules convectives de plus grande taille
- ✓ Déplacement est → ouest

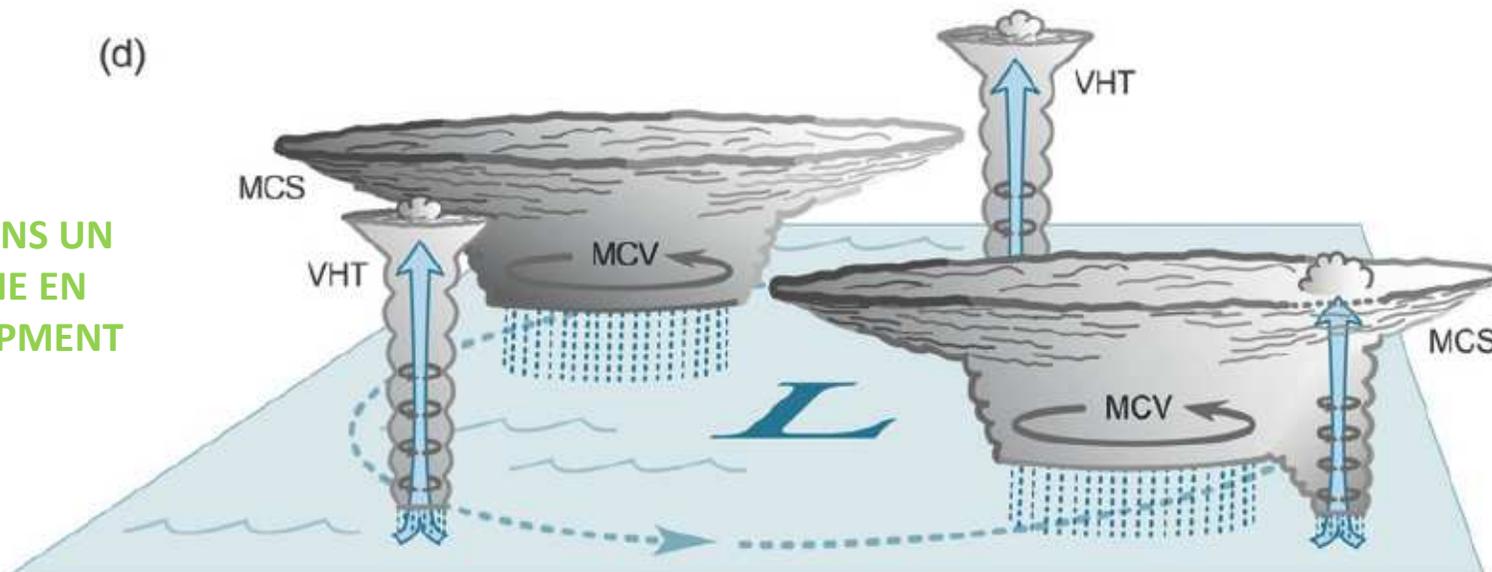
Organisation : systèmes convectifs de méso-échelle



CYCLE DE
VIE D'UN
MCS



MCSs DANS UN
CYCLONE EN
DEVELOPPMENT



Houze (2009)



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

