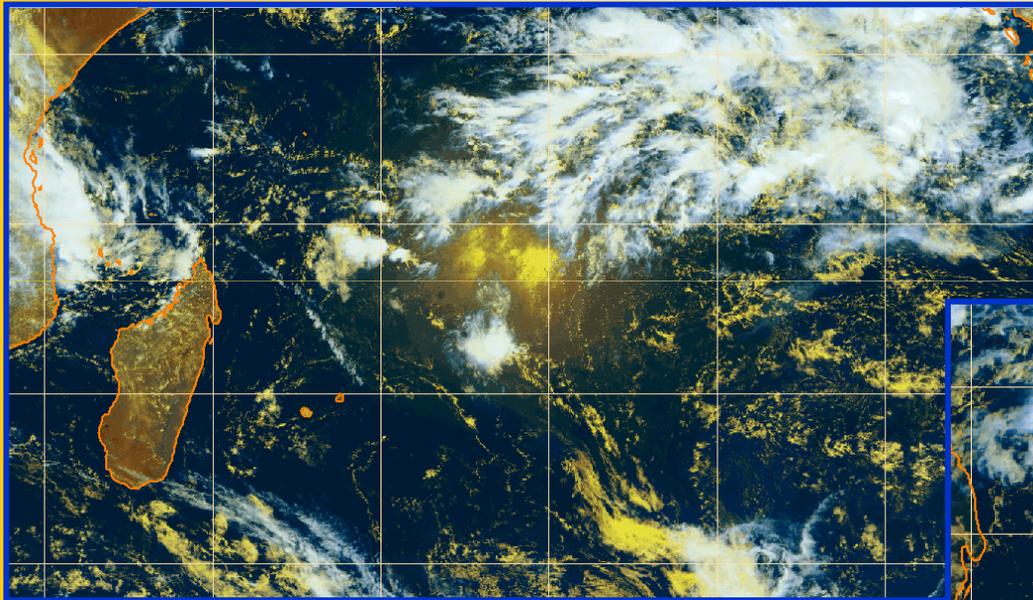


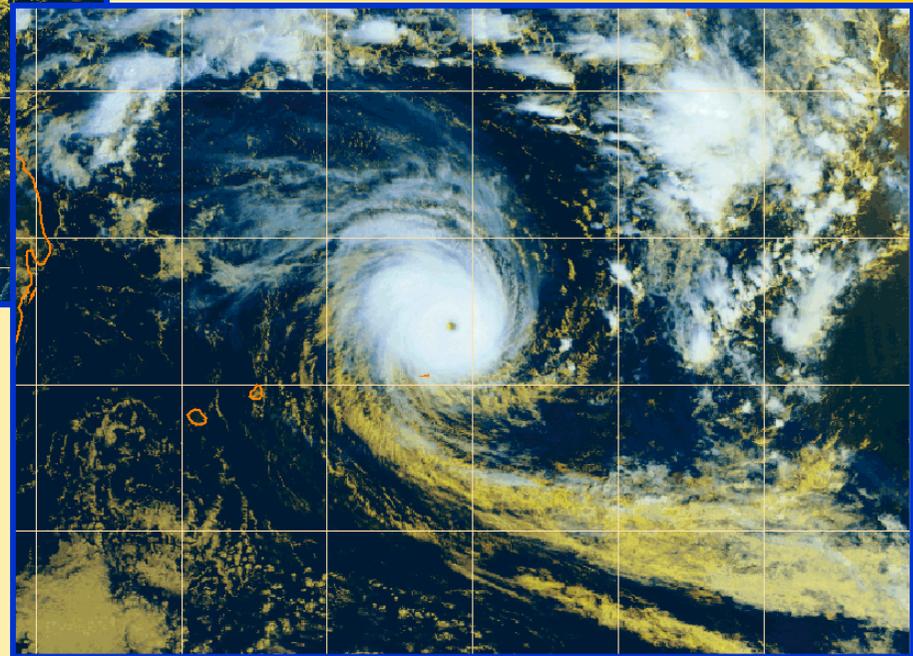
# *La cyclogénèse des systèmes dépressionnaires tropicaux*

## Tropical cyclone formation



Cyclogenesis in the South-West  
Indian ocean (15-20 January 2002)

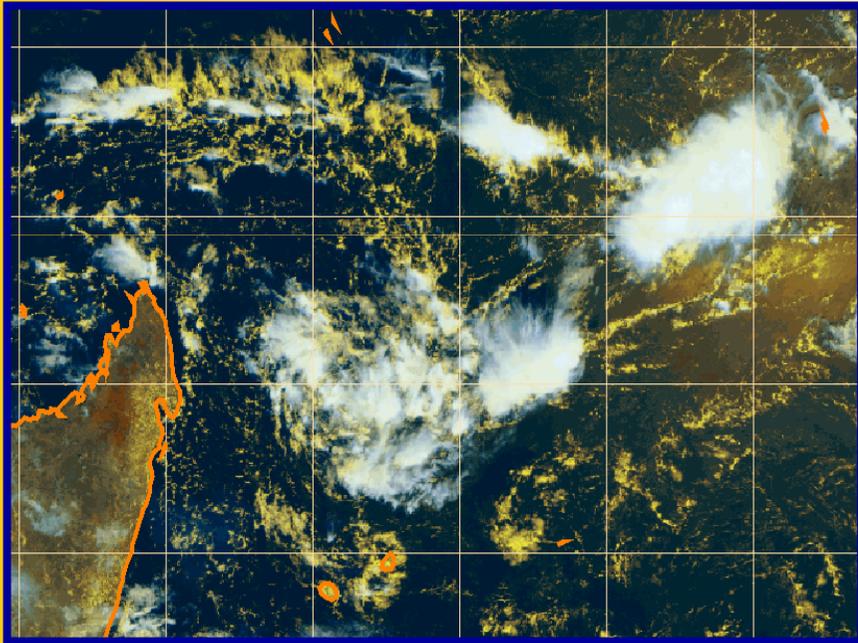
Cyclogénèse dans le Sud-Ouest de  
l'Océan Indien (15-20 janvier 2002)



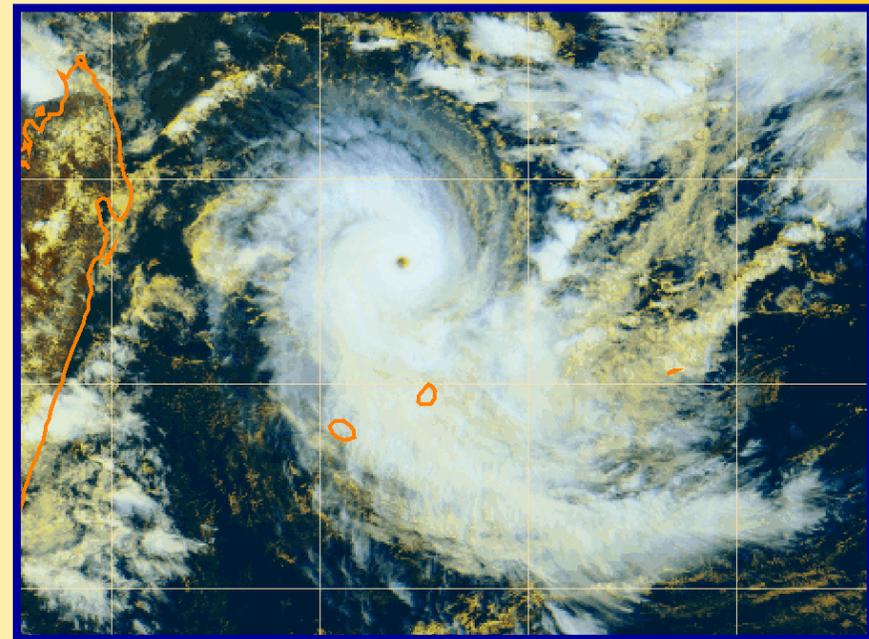
# *La cyclogénèse des systèmes dépressionnaires tropicaux*

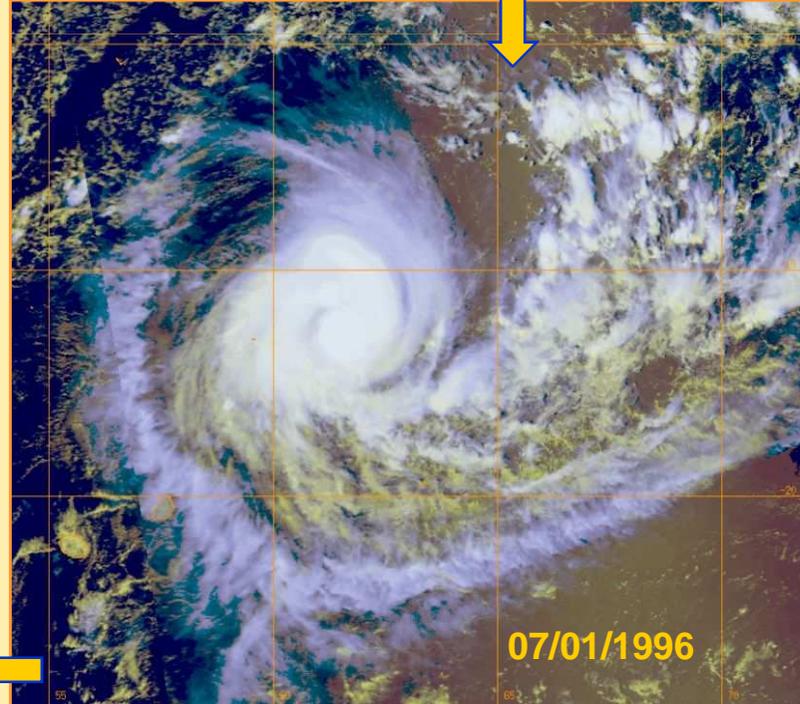
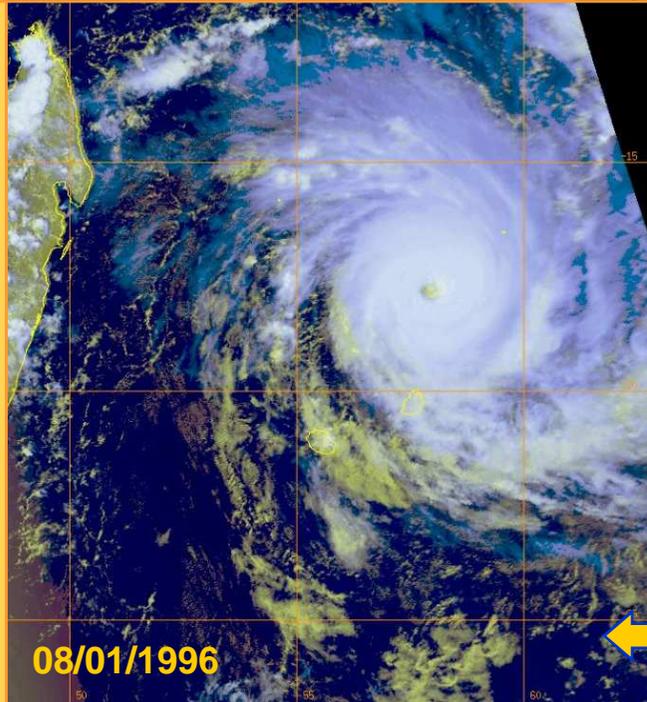
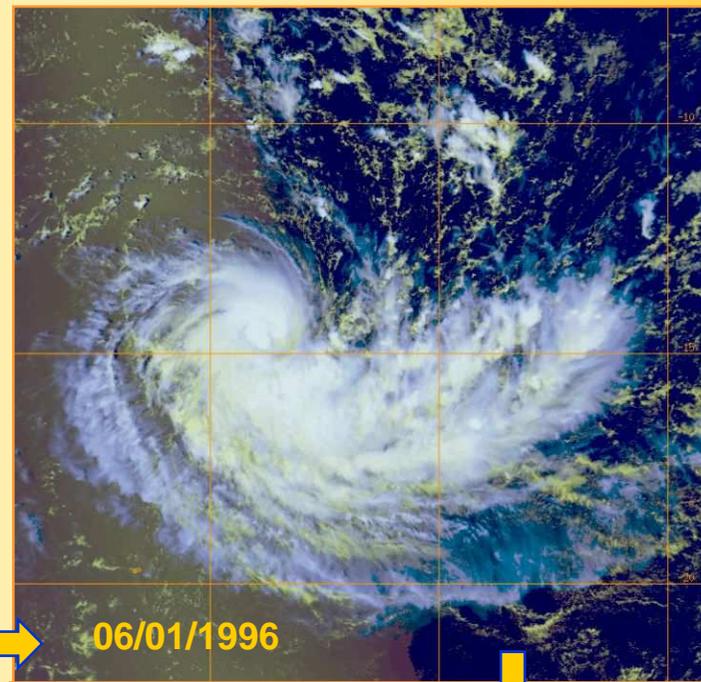
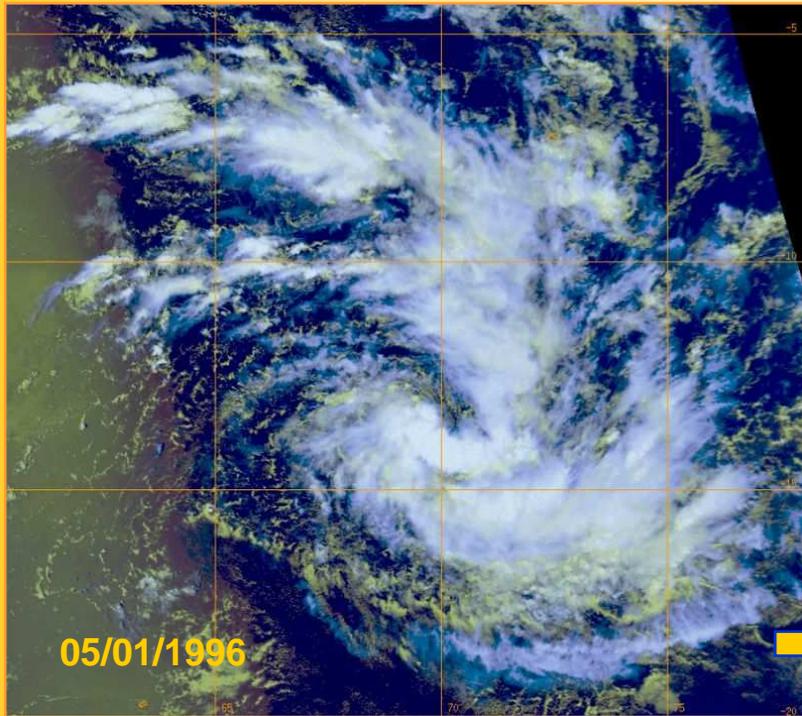
## Tropical cyclone formation

Cyclogenesis in the South-West  
Indian ocean (24-28 January 2000)



Cyclogénèse dans le Sud-Ouest de  
l'Océan Indien (24-28 janvier 2000)





| Vent maximal soutenu (en kt)                    | moins de 34  | 34 à 47                                 | 48 à 63                             | 64 et plus   | terme générique   |
|---|--|---|-------------------------------------|--|---|
| Nombre de Beaufort et terme descriptif          | jusqu'à 7  | 8. coup de vent<br>9. fort coup de vent | 10. tempête<br>11. violente tempête | 12. ouragan  |   |
| CMM (OMM n°471)                                 | 1. dépression tropicale  | 2. tempête tropicale modérée            | 3. forte tempête tropicale          | 4. ouragan (ou synonyme local)   | cyclone tropical 1 - 4                                  |
| Région V - partie de l'hémisphère Sud           | (1. perturbation tropicale)<br>(2. dépression tropicale)   | 3. cyclone tropical (34 kt et plus)     | 4. fort cyclone tropical (a)        | 5. ouragan   | cyclone tropical 3 - 5                                  |
| Région I  | (1. zone de temps perturbé)<br>(2. perturbation tropicale)<br>3. dépression tropicale                      | 4. tempête tropicale modérée            | 5. forte tempête tropicale          | 6. cyclone tropical (64-90 kt)<br>7. cyclone tropical intense (90-115 kt)<br>8. cyclone tropical très intense (plus de 115 kt) | cyclone tropical 3 - 8                                  |
| Groupe d'experts des cyclones tropicaux         | (1. minimum, zone dépressionnaire)<br>(2. dépression, dépression tropicale(b))<br>(3. forte dépression(b)) | 4. tempête cyclonique                   | 5. forte tempête cyclonique         | 6. forte tempête cyclonique avec un cœur de vents d'ouragan  | perturbation cyclonique 1 - 6<br>cyclone tropical 4 - 6 |
| Comité des typhons                              | 1. Zone dépressionnaire<br>2. dépression, dépression tropicale   | 3. tempête tropicale                    | 4. forte tempête tropicale          | 5. typhon  | cyclone tropical 1 - 5                                  |
| Région IV                                       | (1. perturbation tropicale)<br>2. dépression tropicale   | 3. tempête tropicale                    |                                     | 4. ouragan   | cyclone tropical 2 - 4                                  |
| Vocabulaire météorologique international (1992) | 1. perturbation tropicale<br>2. dépression tropicale   | 3. tempête tropicale                    | 4. forte tempête tropicale          | 5. ouragan ; typhon ; cyclone tropical (SWIO)(c)   | cyclone tropical 1 - 5                                  |

34 kt

64 kt

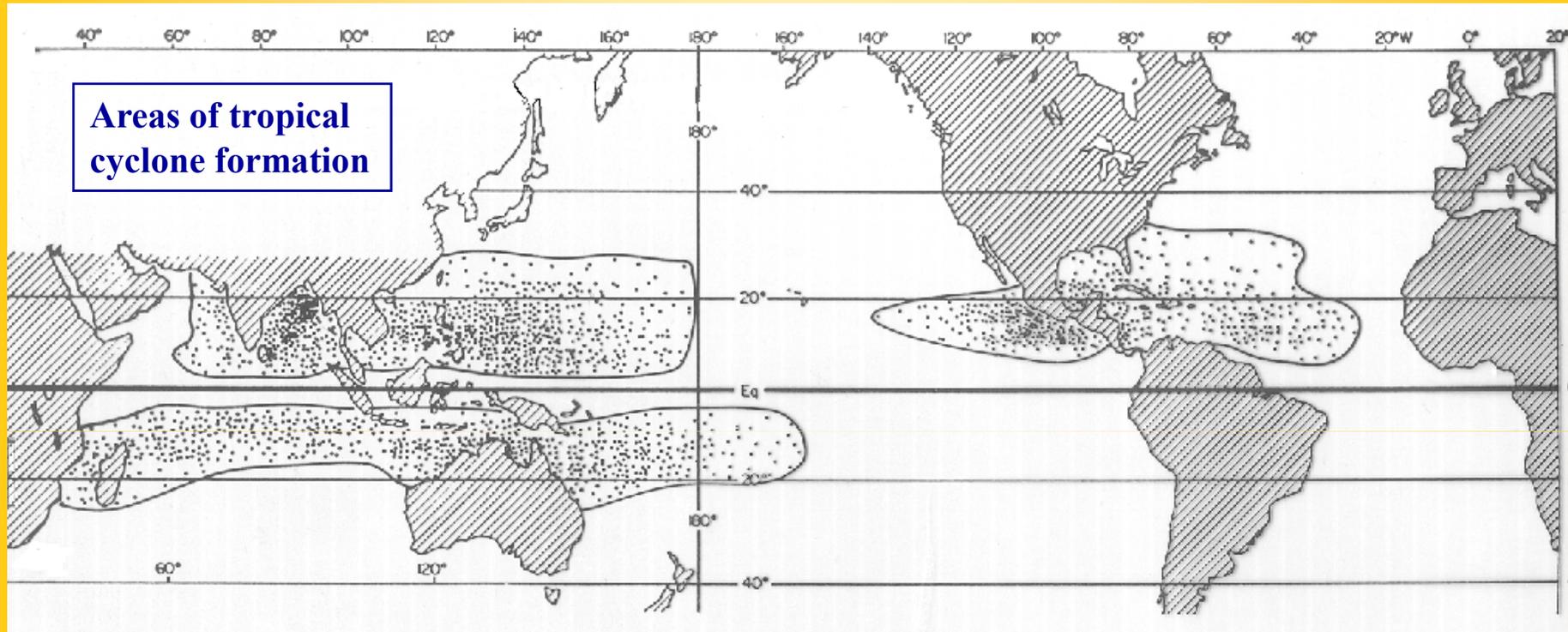
Genesis Intensification

## Les systèmes dépressionnaires tropicaux :

**nomenclature des classifications et dénominations utilisées suivant les différentes régions OMM.**

**WMO classifications of tropical disturbances and associated terminology being used in the different tropical cyclone basins.**

## Zones de cyclogénèse



Les points représentent les positions où ont été détectées les perturbations initiales de tous les cyclones observés sur une période de 20 ans (GRAY, 1975).

Dots represent initial detection of pre-hurricane tropical disturbances.

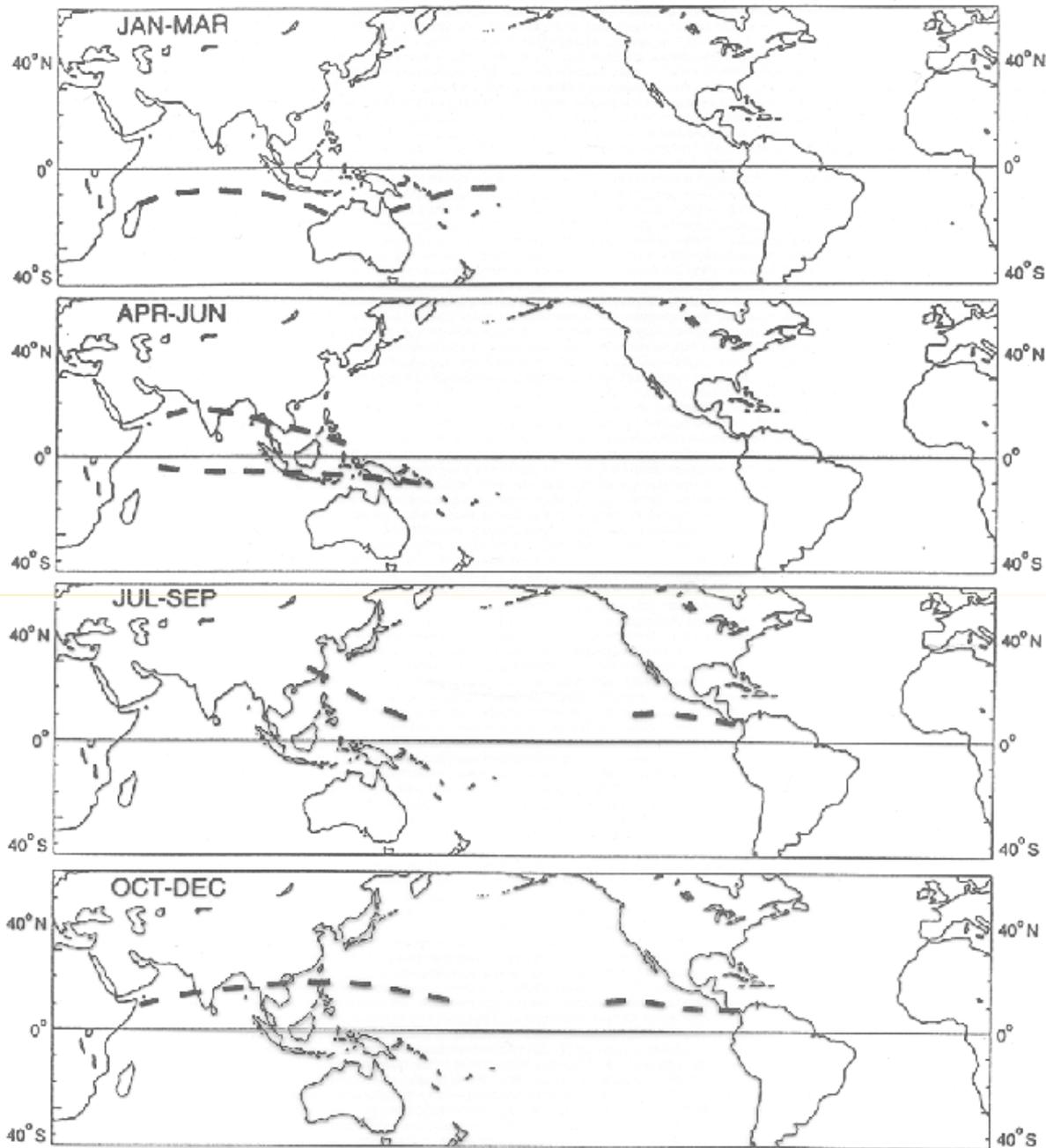
# Représentation schématique des ZCIT d'alizé et de mousson.

|  | <b>ZCIT d'alizé</b><br><i>Trade Wind ITCZ</i> | <b>ZCIT de mousson</b><br><i>Monsoon ITCZ</i> |
|--|---|---|
| <b>Flux de basses couches</b><br><i>Low level flow</i> |   |   |
| <b>Flux d'altitude</b><br><i>Upper level flow</i>      |   |   |
| <b>Cisaillement vertical</b><br><i>Vertical shear</i>  |   |   |

**Schematics of tradewind and monsoon-type ITCZ flow regimes.**

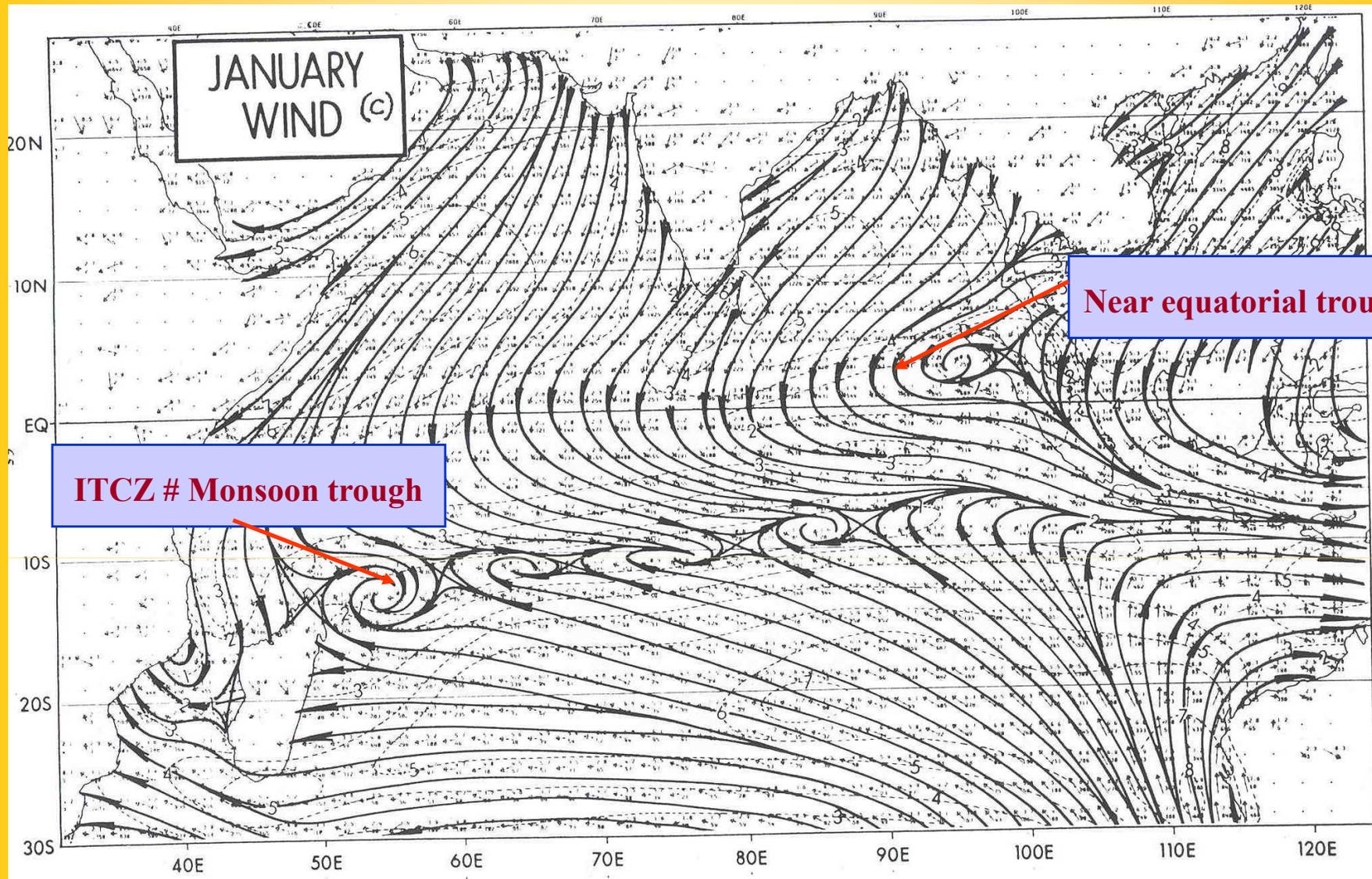
Situation type de janvier dans le bassin Australie/SE Océan Indien

Situation type du mois d'août dans le Pacifique Nord-Ouest.

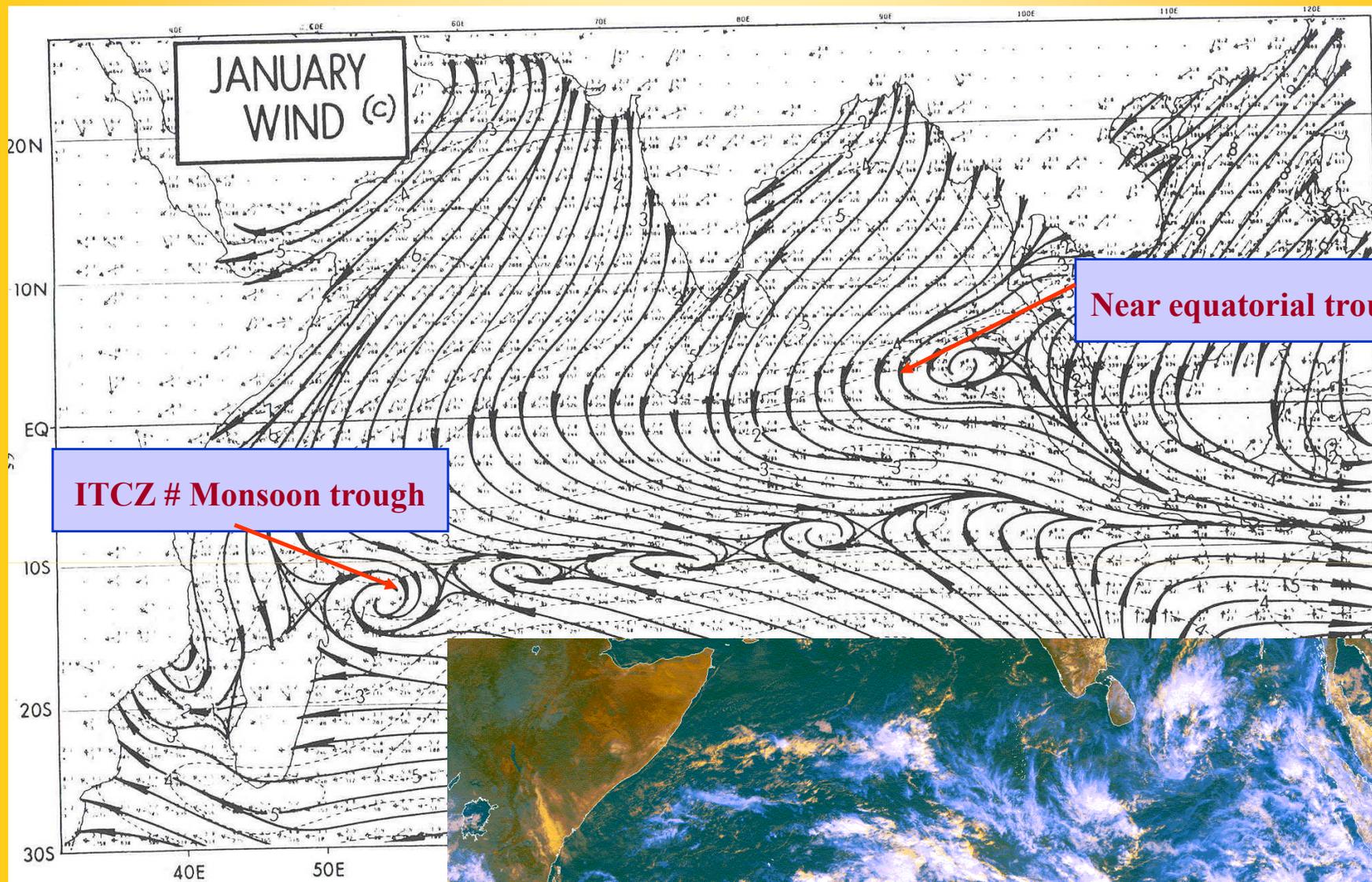


**Distribution océanique  
des positions  
saisonniers  
moyennes de la ZCIT  
de type mousson**

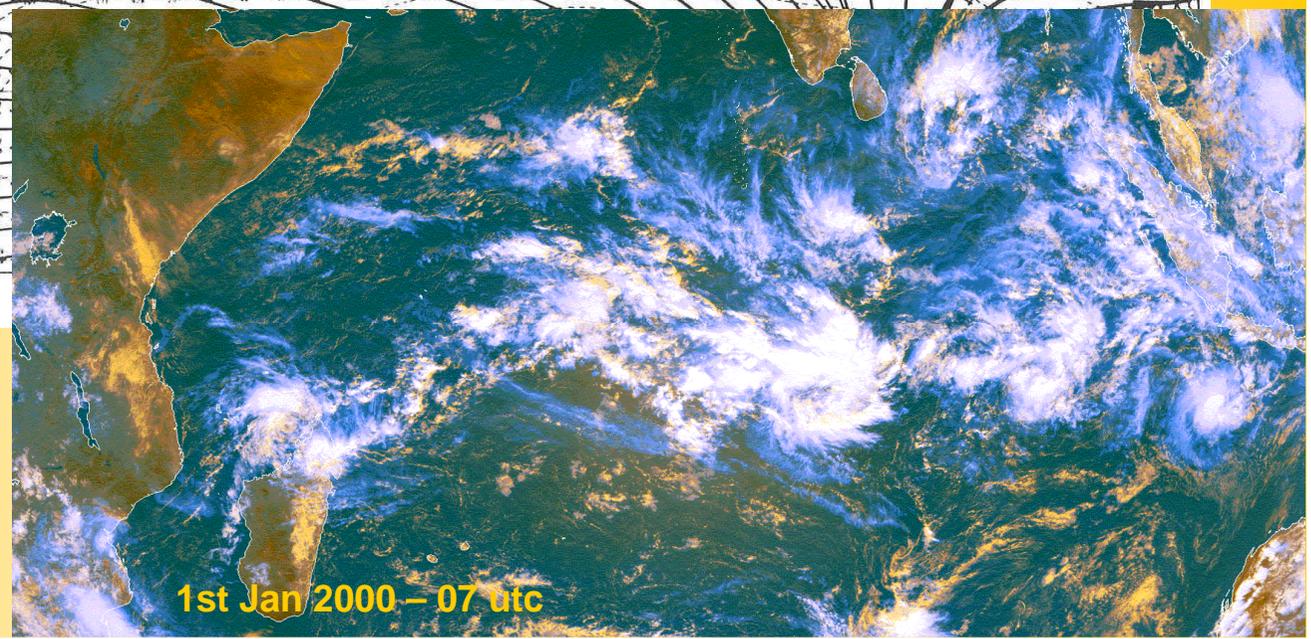
**Representative  
seasonal locations  
of the oceanic  
monsoon-type ITCZ.**



**Mean surface streamlines  
during SH summer  
(Source : Saddler, 1975)**



**Mean surface streamlines during SH summer**  
 (Source : Saddler, 1975)



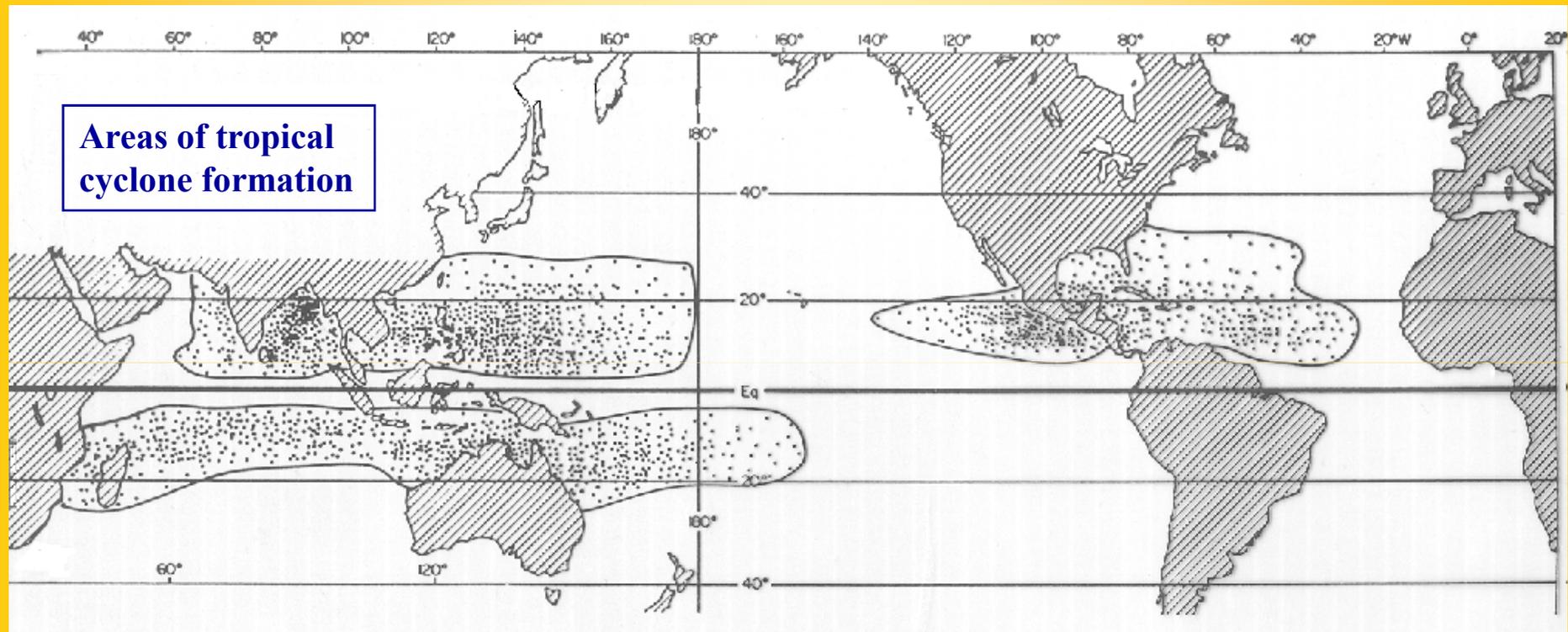
# Les conditions climatologiques nécessaires à la cyclogénèse

## Climatological conditions for tropical cyclone formation

- 1. Existence d'une perturbation préexistante dans les basses couches de l'atmosphère.**  
*Presence of a pre-existing disturbance in the lower atmosphere.*
- 2. Force de Coriolis suffisante.**  
*Significant value of planetary vorticity.*
- 3. Cisaillement vertical de vents horizontaux faibles.**  
*Weak vertical shear of the horizontal winds.*
- 4. SST supérieures à 26°C sur une épaisseur suffisante.**  
*SST exceeding 26°C and a deep thermocline.*
- 5. Conditions d'instabilité conditionnelle sur une large portion de la troposphère.**  
*Conditional instability through a deep atmospheric layer.*
- 6. Humidité relative importante dans les couches inférieures et moyennes de la troposphère.**  
*Large values of relative humidity in the lower and middle troposphere.*

# Zones de cyclogénèse et force de Coriolis

## Tropical cyclone formation and planetary vorticity

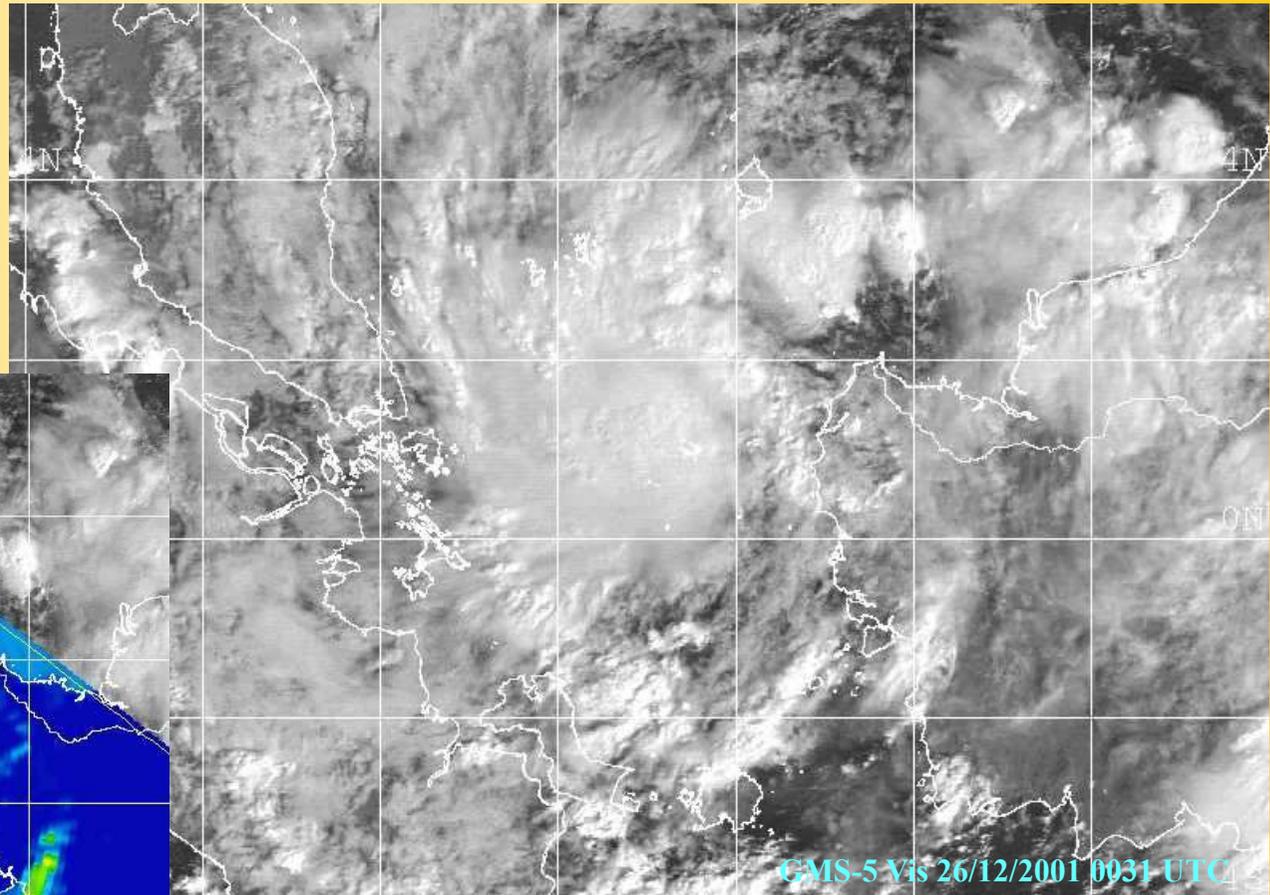
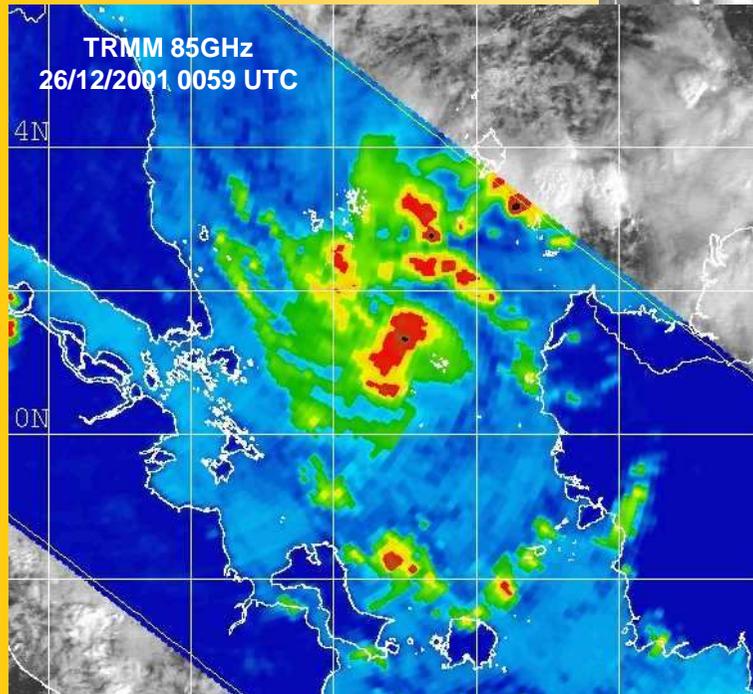


Les points représentent les positions où ont été détectées les perturbations initiales de tous les cyclones observés sur une période de 20 ans (GRAY, 1975).

Dots represent initial detection of pre-hurricane tropical disturbances.

# Cyclogénèse et force de Coriolis

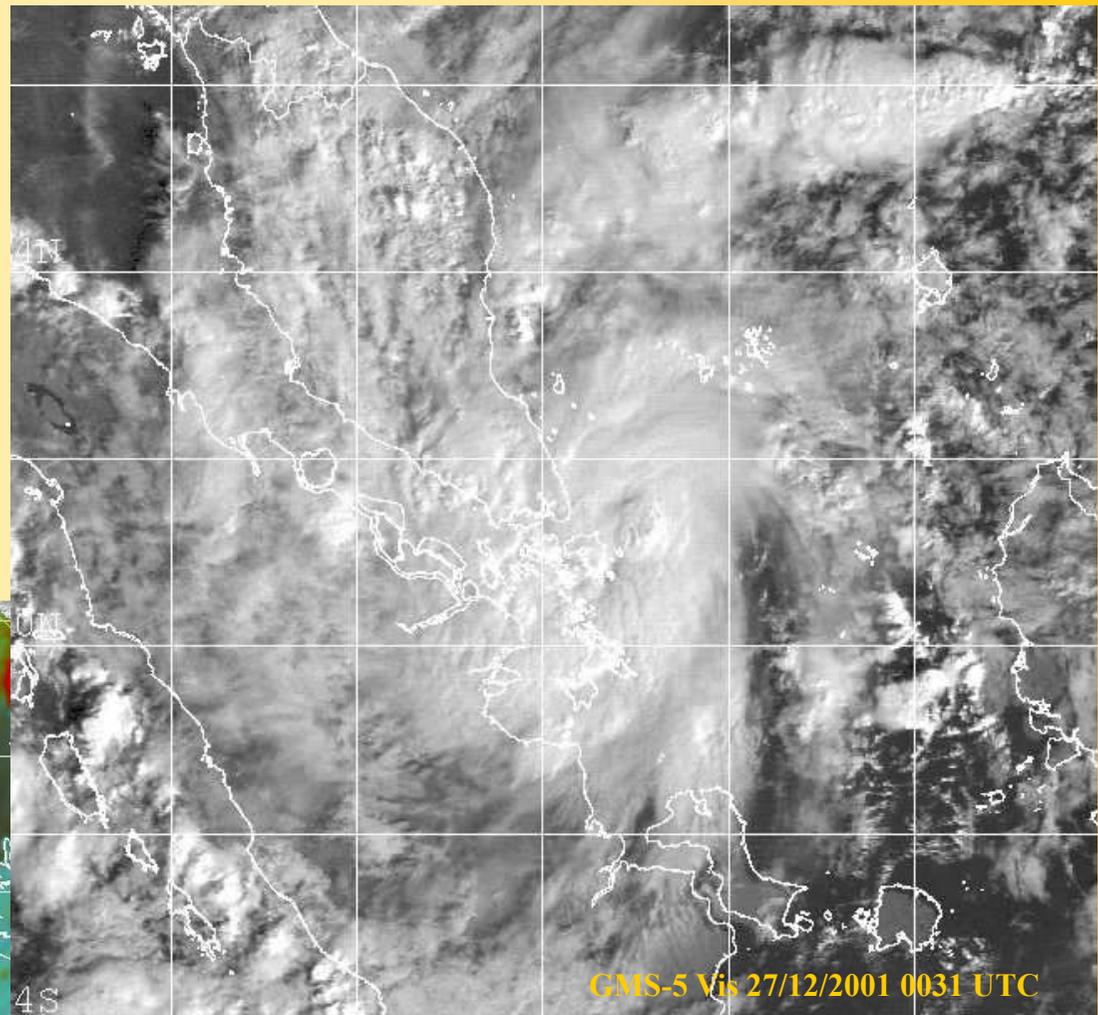
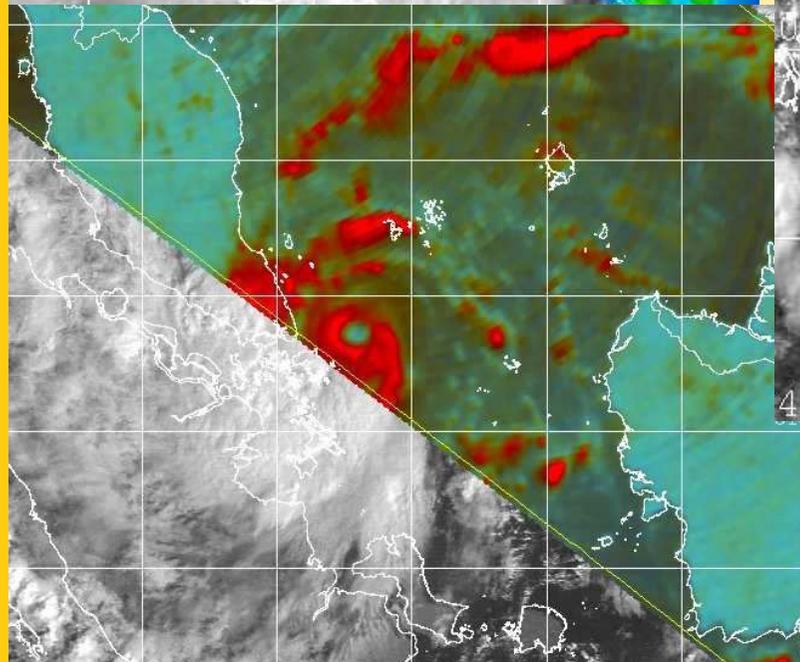
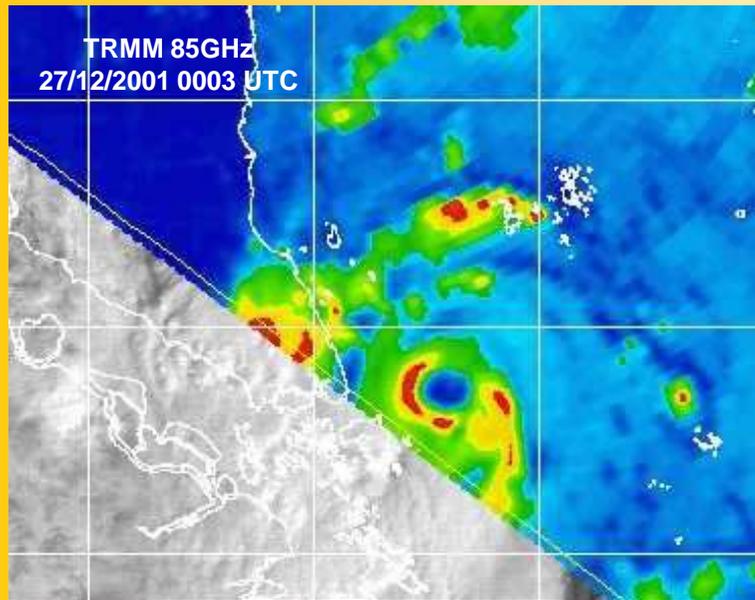
**Tropical cyclone formation and planetary vorticity**



SDT Vamei se formant à l'est de Singapour près de l'équateur.

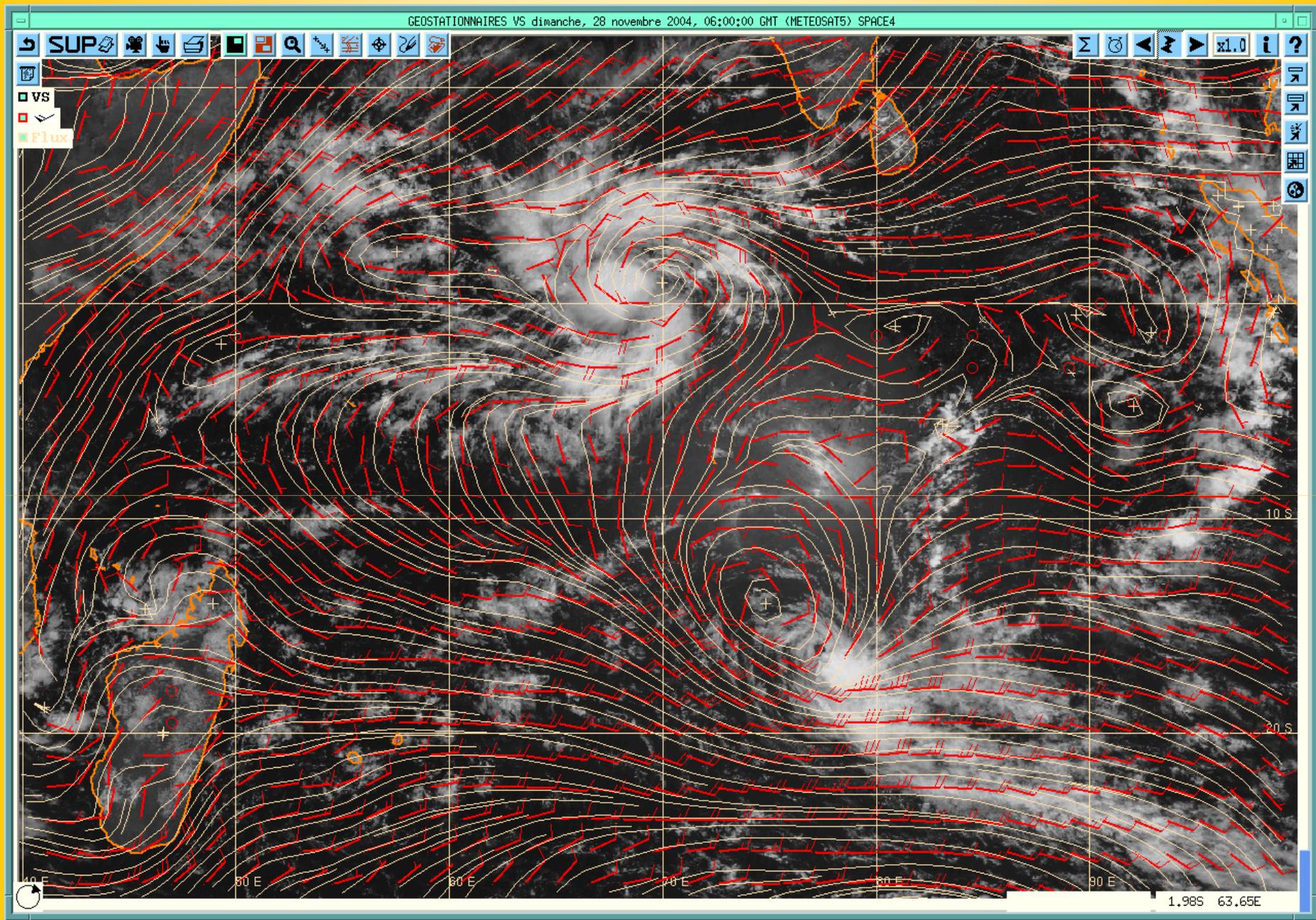
**TC Vamei developing east of Singapore close to the Equator.**

# Cyclogénèse et force de Coriolis



**SDT Vamei à l'est de Singapour près de l'équateur.**

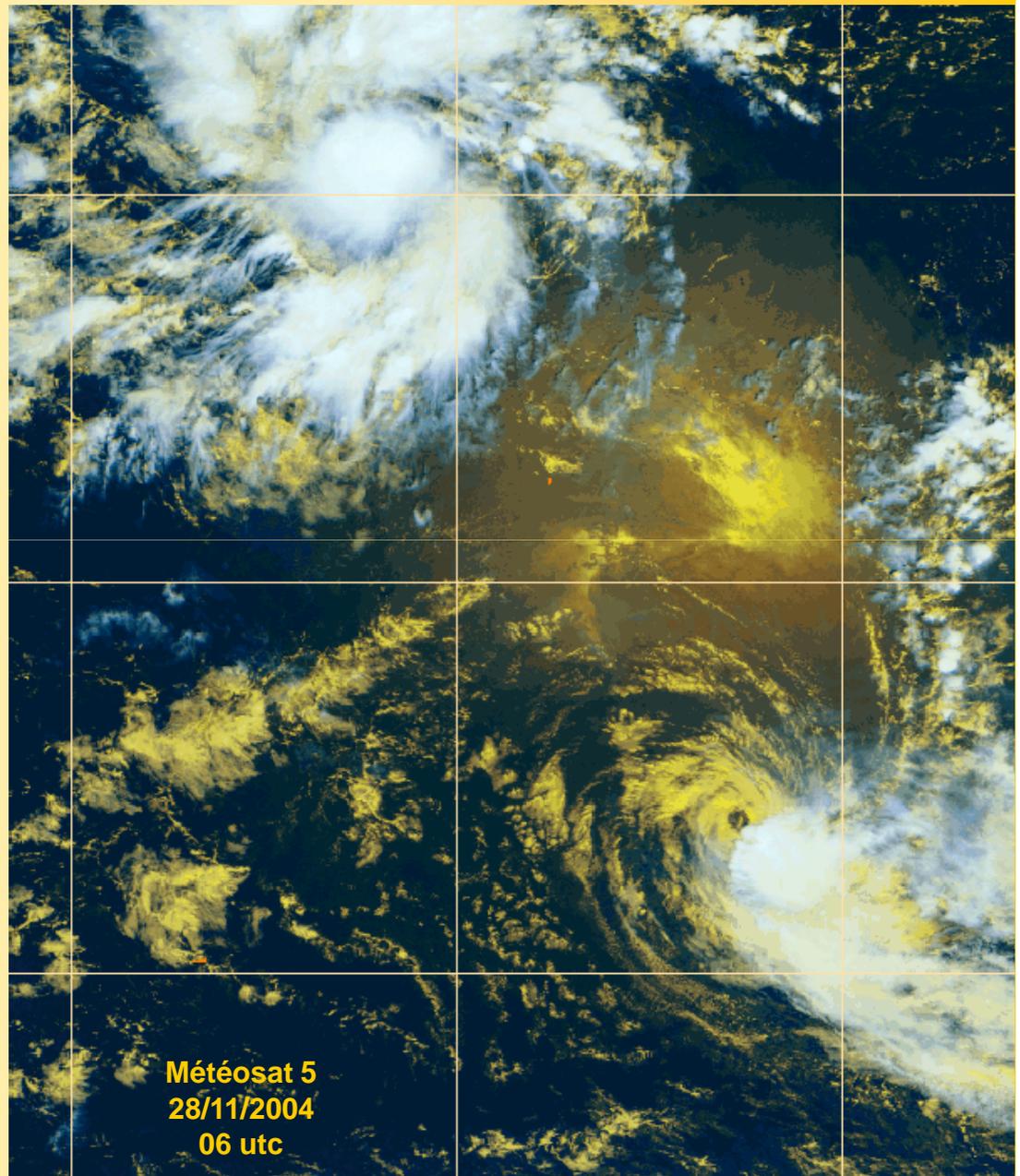
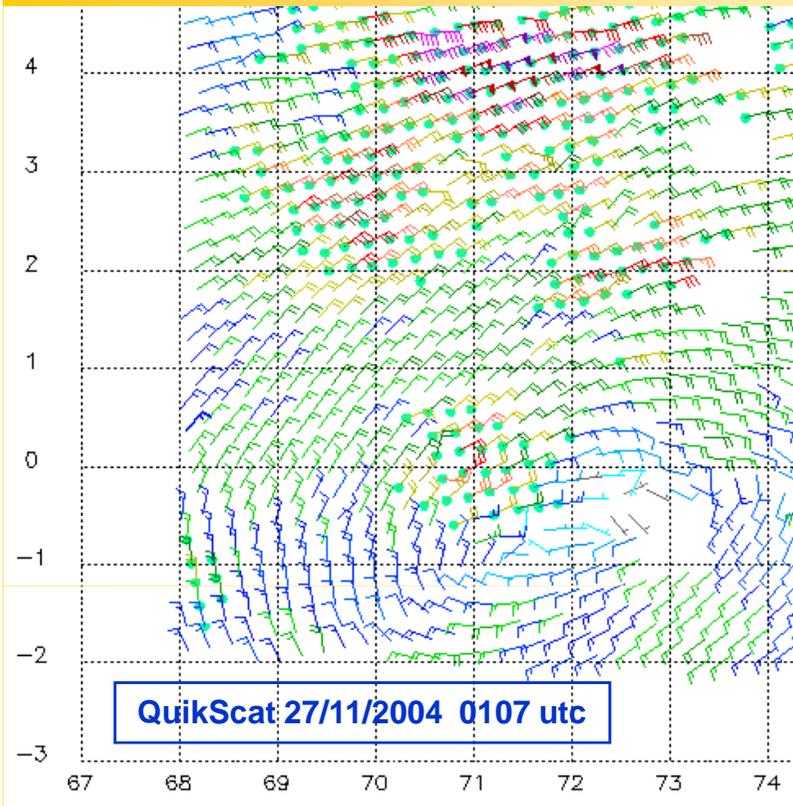
**TC Vamei east of Singapore close to the Equator.**



**Cyclogenèse d'Agni près de l'Equateur.**

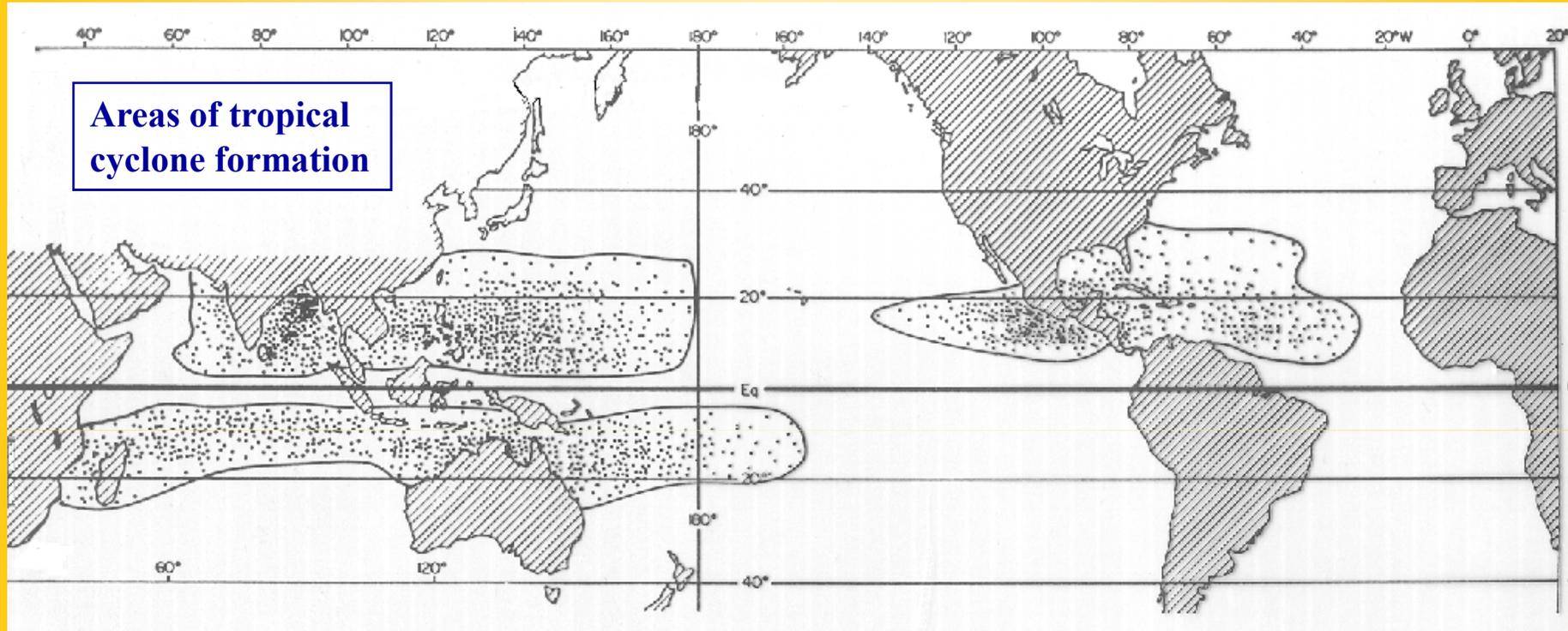
**Cyclogenesis of Agni near the Equator.**

# Cyclogénèse et force de Coriolis



**AGNI : tempête tropicale par 0.7°N  
(et cyclone tropical par 5°N deux  
jours plus tard). Cyclogenèse à  
partir d'un minimum  
dépressionnaire initial ayant  
temporairement changé  
d'hémisphère la veille) !**

## Zones de cyclogénèse vs. SST



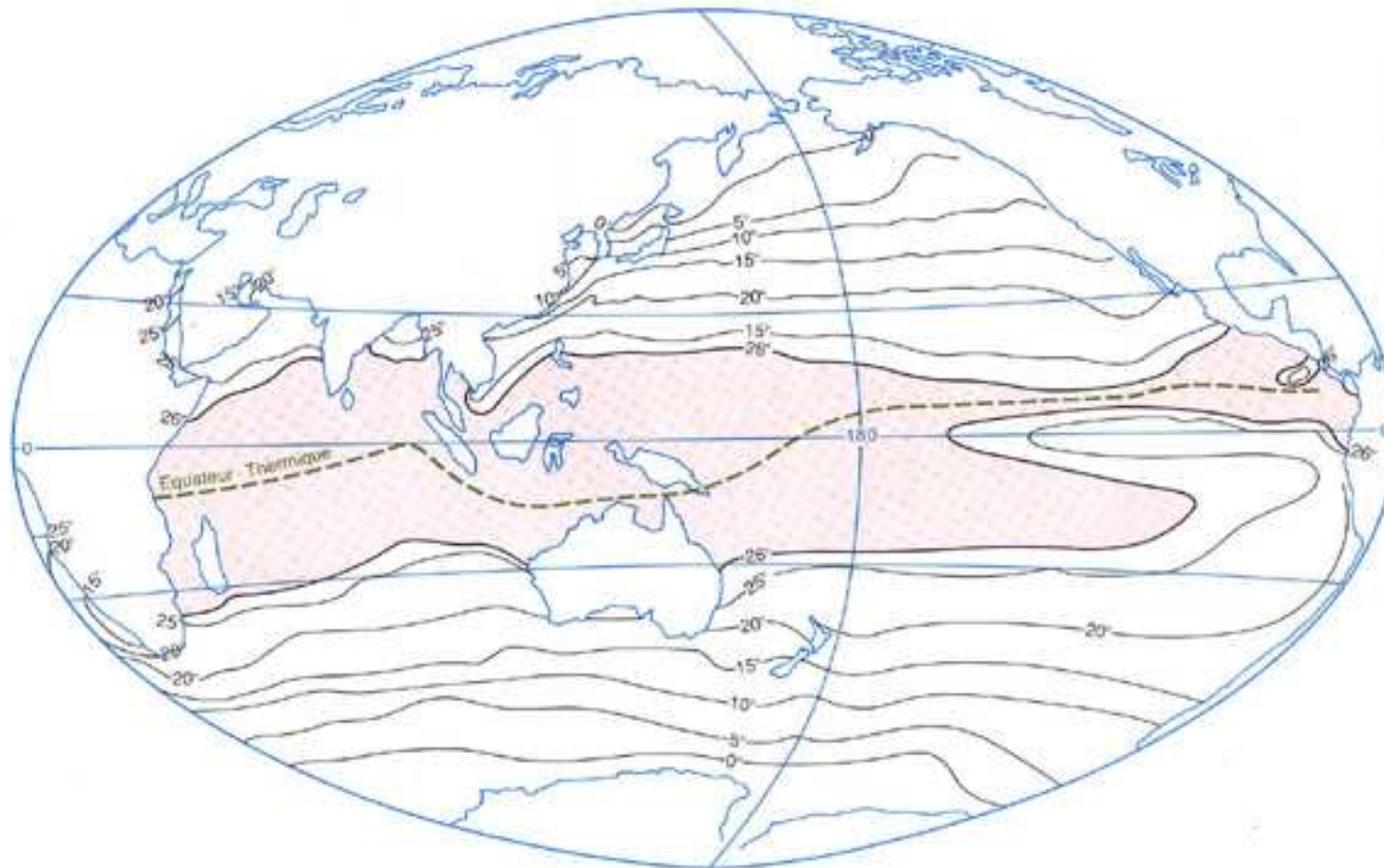
Les points représentent les positions où ont été détectées les perturbations initiales de tous les cyclones observés sur une période de 20 ans (GRAY, 1975).

Dots represent initial detection of pre-hurricane tropical disturbances.

**Températures moyennes de surface de la mer  
sur les océans Indien et Pacifique, au mois de février.**

**SST of the Indian and Pacific Oceans (average for February)**

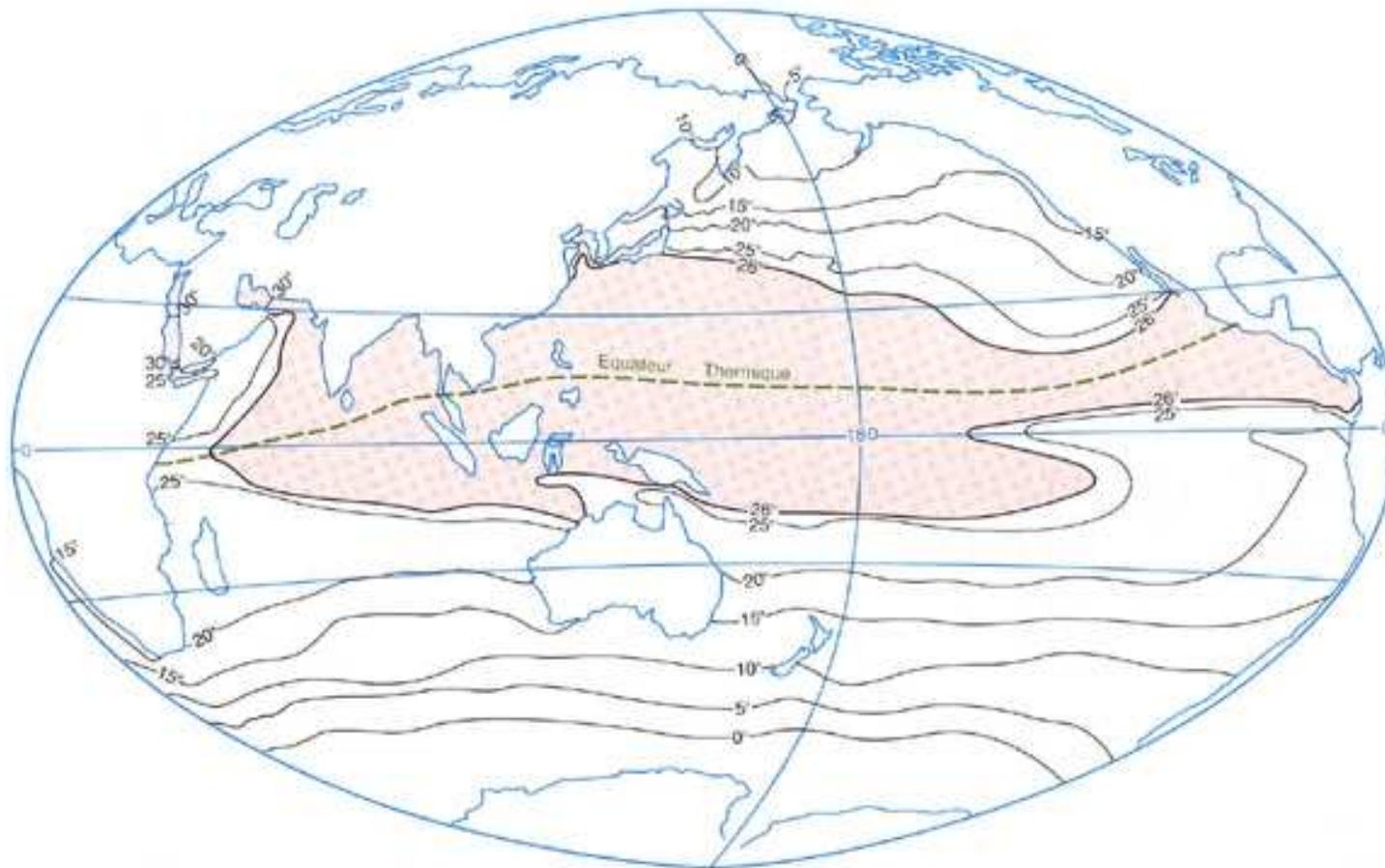
**Février**



**Températures moyennes de surface de la mer  
sur les océans Indien et Pacifique, au mois d'août.**

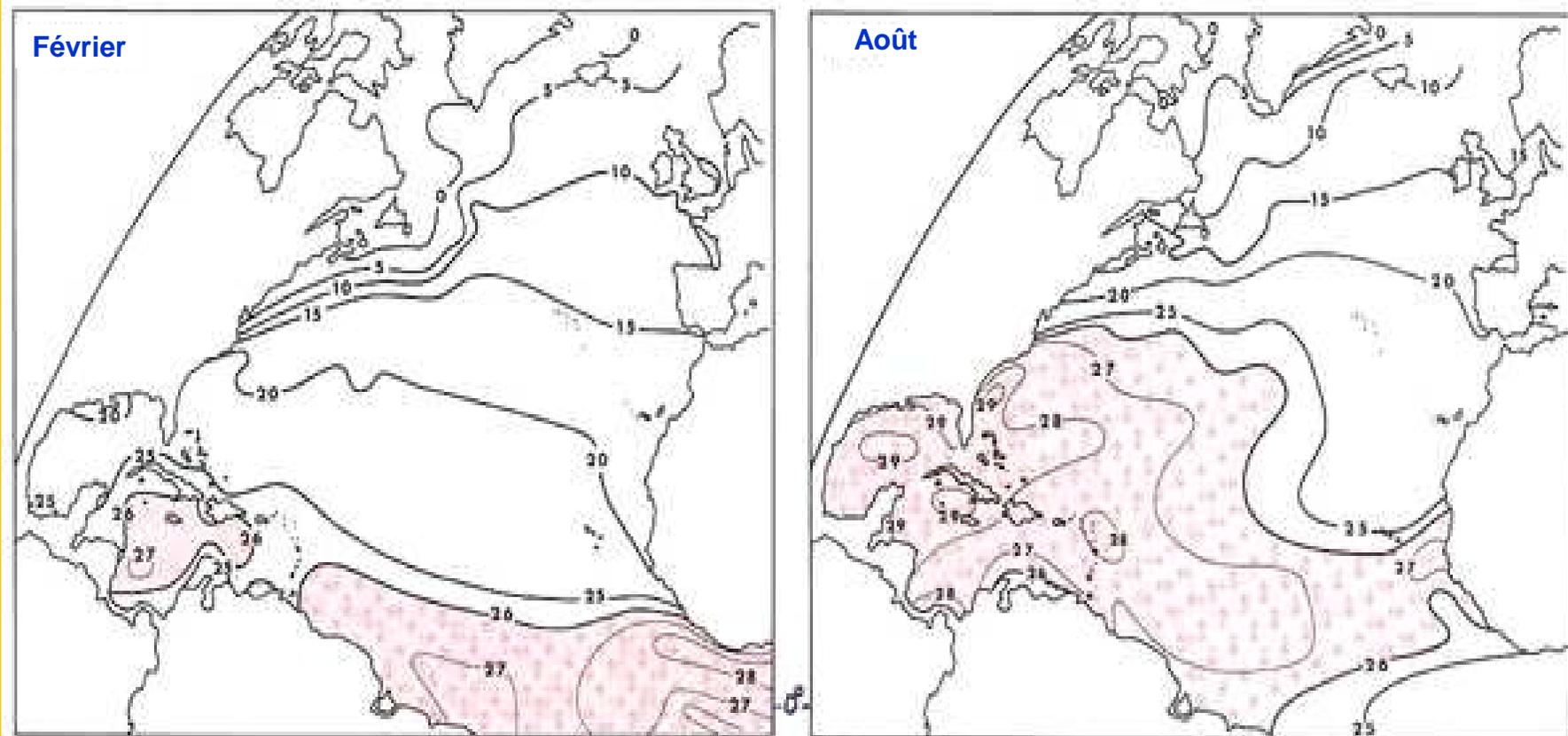
**SST of the Indian and Pacific Oceans (average for August)**

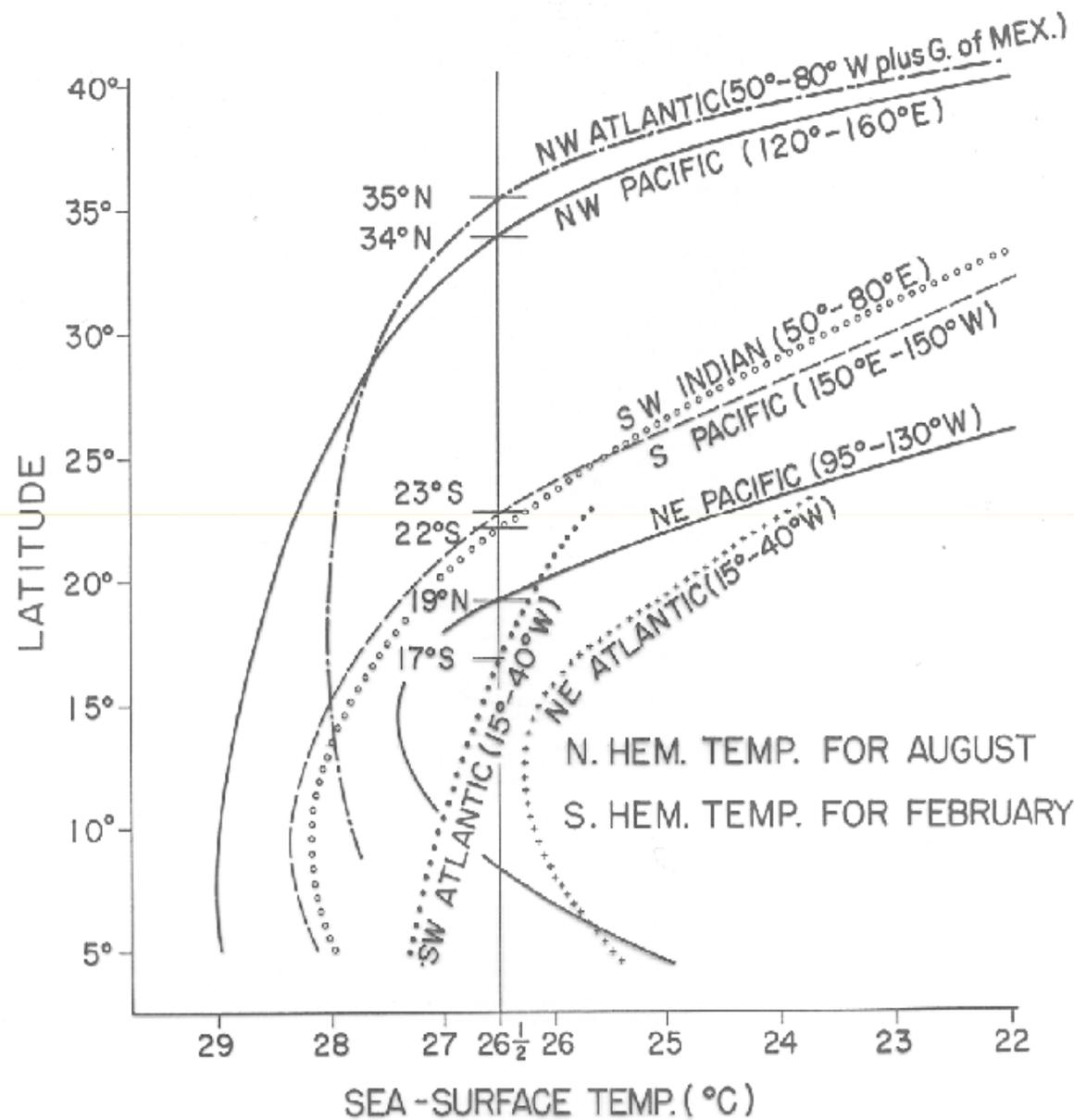
**Août**



**Températures moyennes de surface de la mer  
sur le bassin cyclonique Atlantique, aux mois de février et d'août.**

SST of the Atlantic basin (average for February and August).





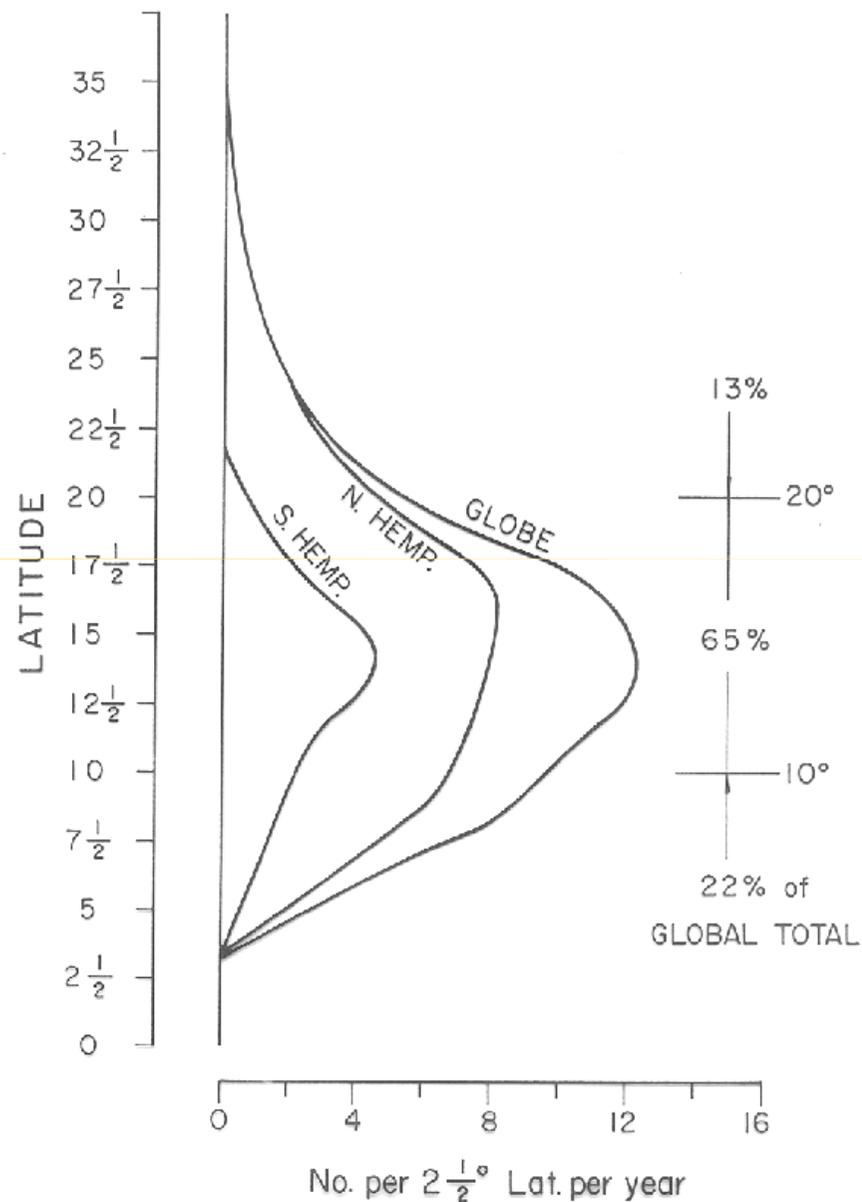
Répartition moyenne des températures de surface de la mer dans les différents bassins cycloniques pendant le mois le plus chaud de l'année.

Latitudinal variations of SST in the various formation regions during the warmest summer month.

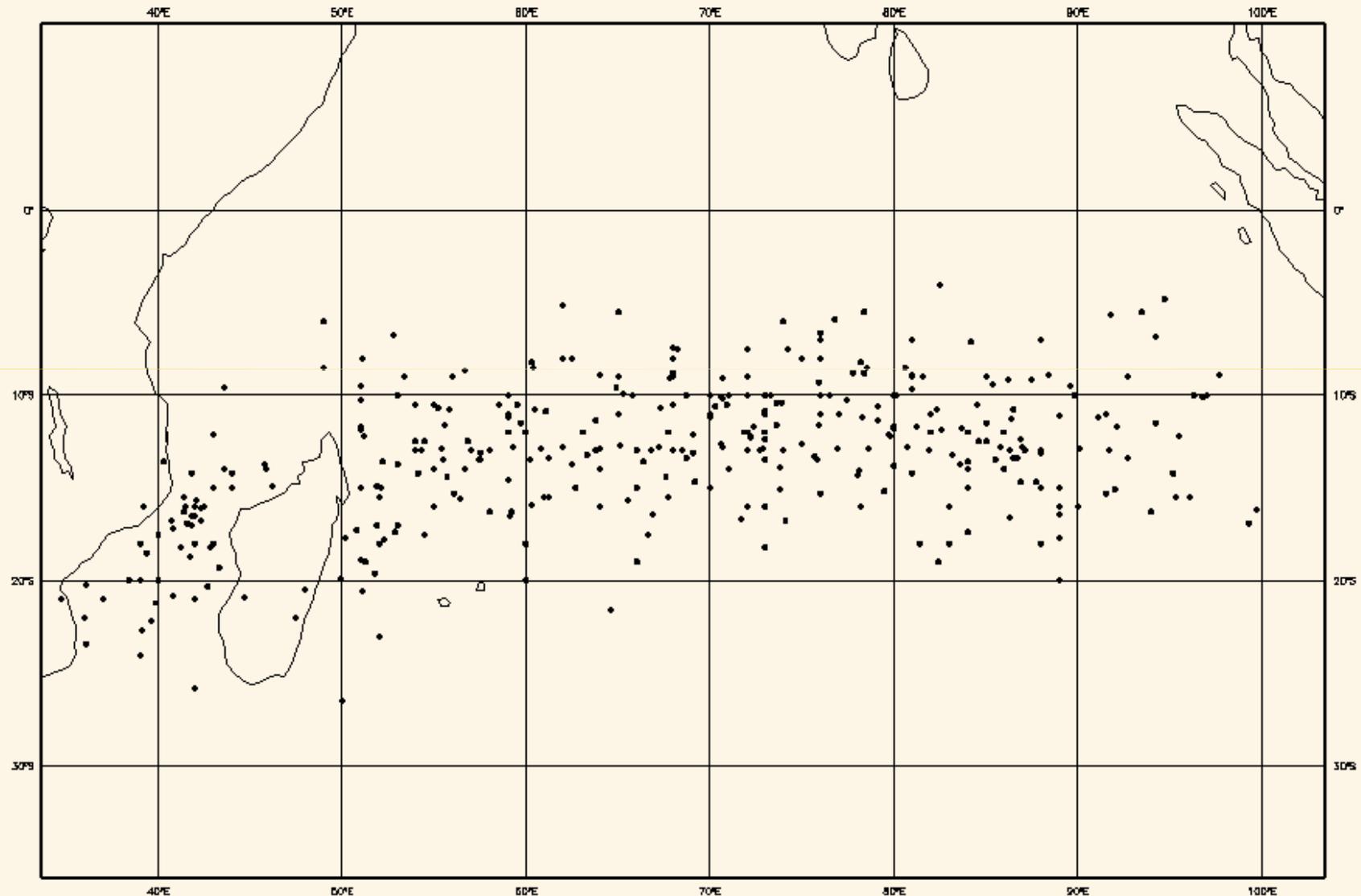
## Répartition méridienne des positions initiales des perturbations s'étant ensuite intensifiées en tempêtes tropicales

Fréquence annuelle par  $2.5^\circ$  de latitude.

Latitudes at which initial disturbances that later became tropical storms were detected.

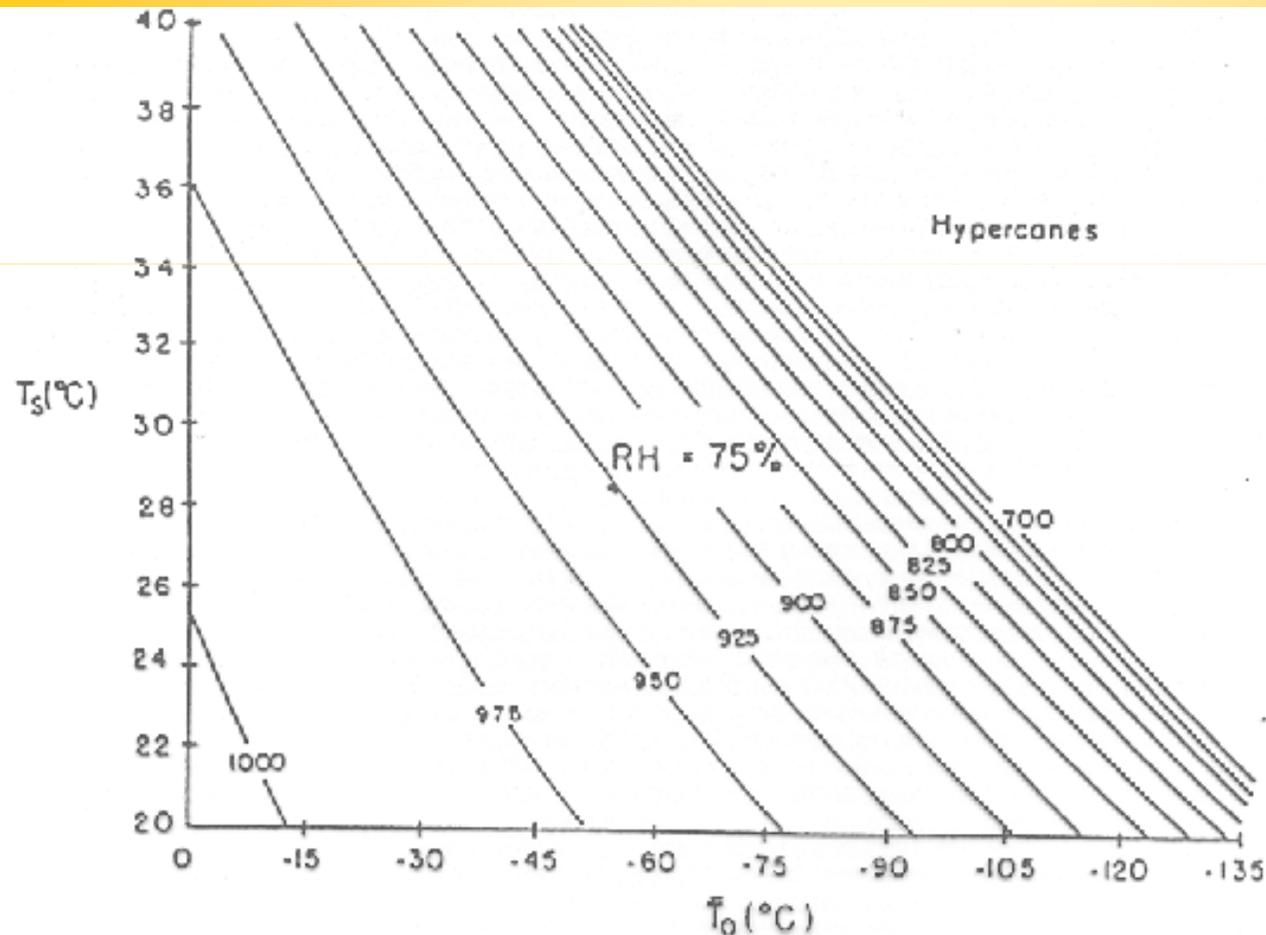


## Cyclogénèses dans le Sud-Ouest de l'océan Indien



**Abaque donnant la pression centrale minimale suivant les températures de la mer ( $T_s$ ) et de la tropopause ( $T_o$ ) dans un cycle de Carnot idéal.**

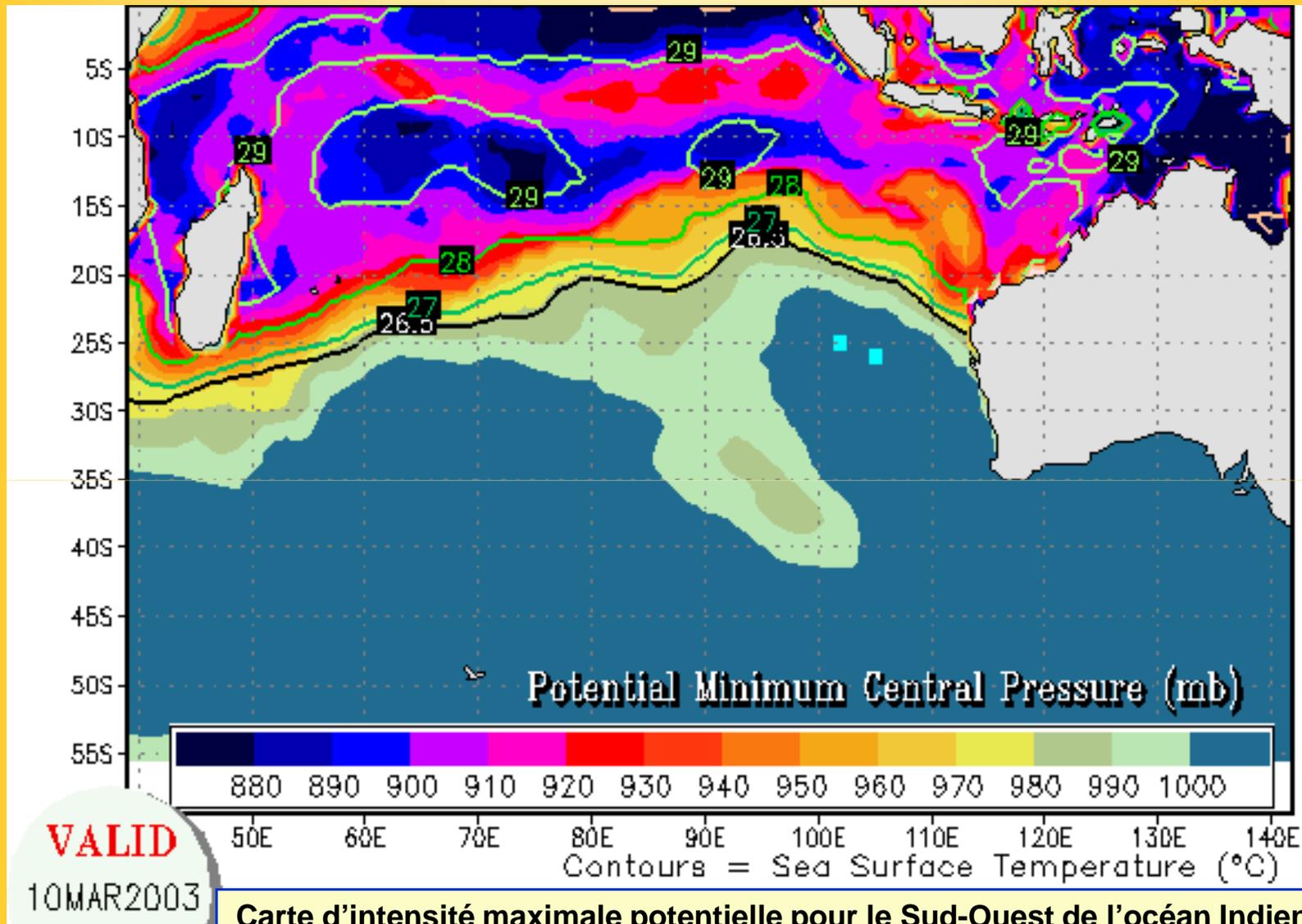
Minimum sustainable central pressure as a function of sea-surface temperature ( $T_s$ ) and mean outflow temperature ( $T_o$ ), assuming an ambient surface pressure of 1015 hPa and an ambient near-surface relative humidity (RH) of 75%.



Ceci pour une pression en surface de 1015 hPa et une humidité relative près de la surface de 75% dans l'environnement.



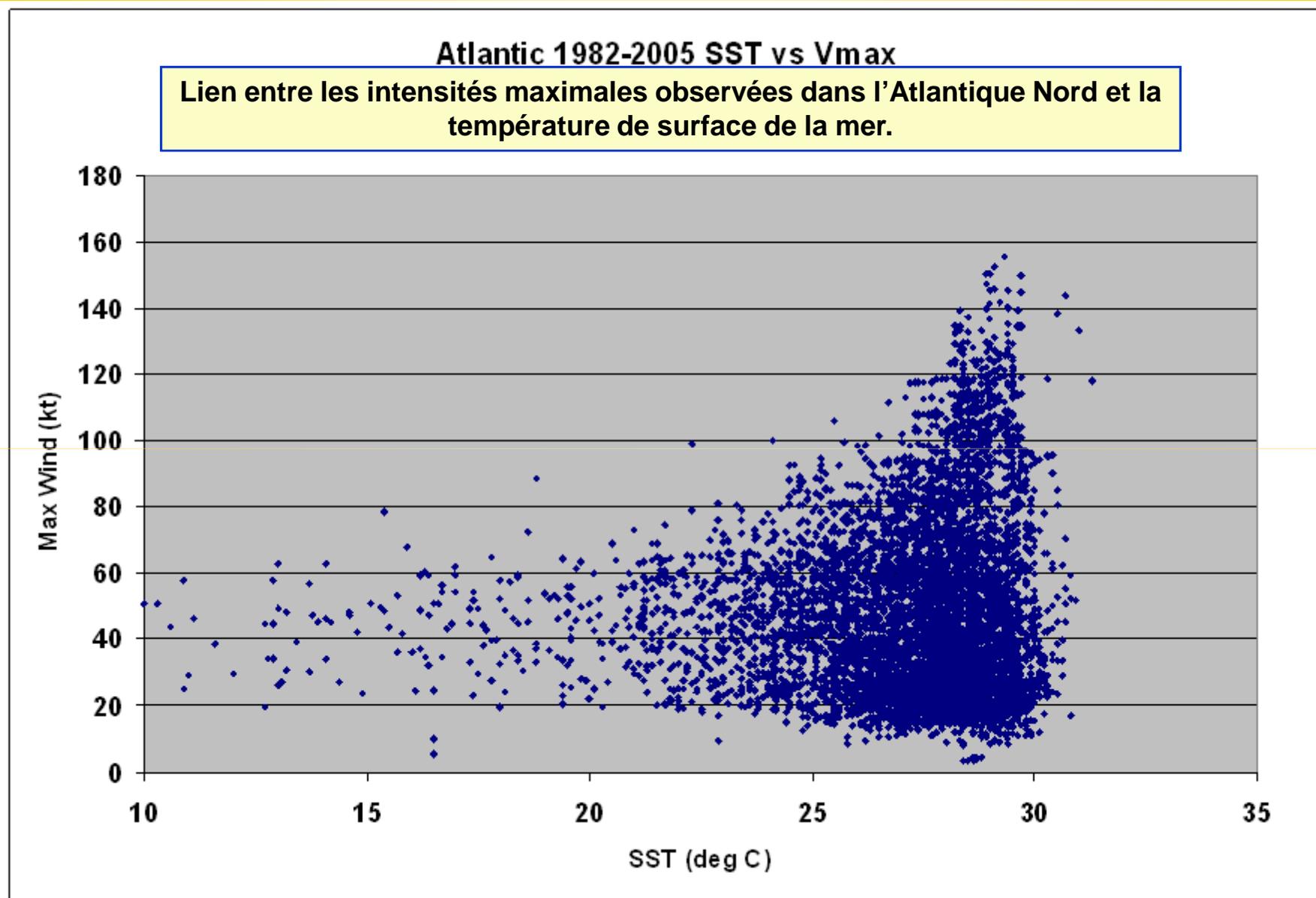
## Intensité maximale potentielle des cyclones tropicaux



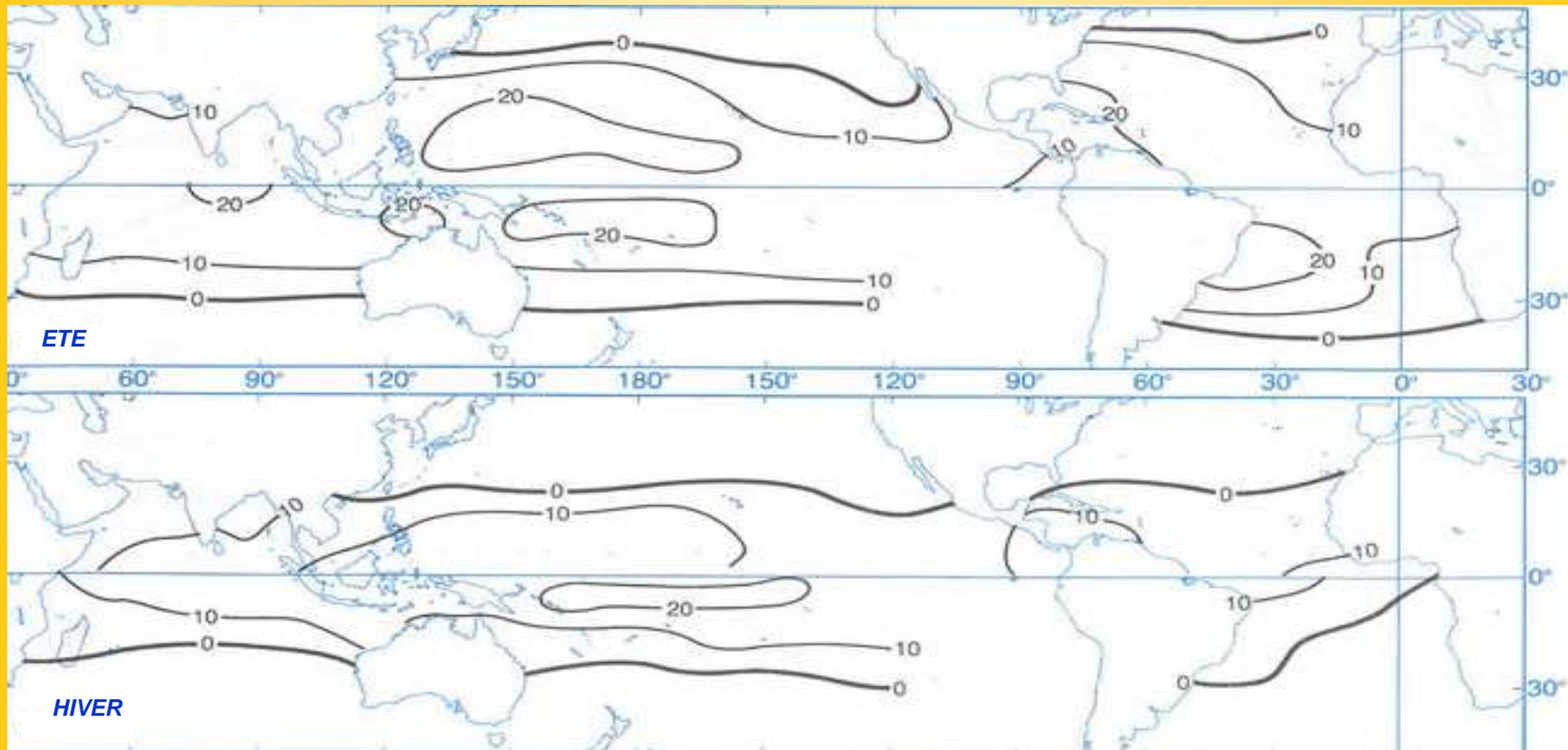
Carte d'intensité maximale potentielle pour le Sud-Ouest de l'océan Indien (exprimée par le minimum de pression centrale).

Maximum potential intensity map for South West Indian Ocean.

## Intensité maximale potentielle des cyclones tropicaux



Relationship between observed max intensities and Sea Surface Temperature.



## Potentiel de convection

$$Pe = \Theta_e (\text{surface}) - \Theta_e (500 \text{ hPa})$$

Répartition océanique des valeurs moyennes du potentiel de convection pendant l'été (août/sept en HN, janv/fev en HS) et pendant l'hiver (janv/fev en HN et août /sept en HS). Valeurs en Kelvin.

Mean oceanic potential instability during summer (resp. winter), i.e. during aug/sept in NH (resp. SH) and during Jan/Feb in SH (resp NH).

# Les "ingrédients" pré-requis nécessaires à une possible cyclogénèse

Background requirement to make tropical cyclone formation a possibility...

**1. La situation/l'environnement sont climatologiquement favorables.**

*Climatology is right (i.e. region, season, SST, etc...)*

**2. La configuration synoptique est favorable du point de vue dynamique.**

*Synoptic flow pattern is right (monsoon trough or high vorticity with small vertical wind shear, etc...).*

**3. Un Système Convectif de Méso-échelle est présent au sein d'un amas nuageux.**

*Active Mesoscale Convection System (MCS) is present within a cloud cluster.*



**Ingrédients nécessaires, mais pas suffisants...**

*Even when all these basic background requirement are met, cyclogenesis is not guaranteed...*

# Conditions synoptiques de la cyclogénèse (1)

## Dynamical conditions associated with tropical cyclone formation (1)

**1. Existence d'une perturbation nuageuse initiale présentant de la convection profonde en abondance.**

*Pre-existing disturbance containing abundant deep convection.*

**2. Accroissement préalable du tourbillon relatif en basse troposphère sur une échelle horizontale de 1000 à 2000 km.**

*Previous spin-up of lower tropospheric relative vorticity over a horizontal scale of 1000 to 2000 km.*

**3. La perturbation initiale doit acquérir une structure à cœur chaud à travers l'ensemble de la troposphère.**

*The pre-existing disturbance must acquire a warm core thermal structure throughout the troposphere.*

**4. Environnement présentant un cisaillement vertical de vent horizontal faible.**

*Large-scale environment with weak vertical shear of the horizontal wind.*

## Conditions synoptiques de la cyclogénèse (2)

### Dynamical conditions associated with tropical cyclone formation (2)

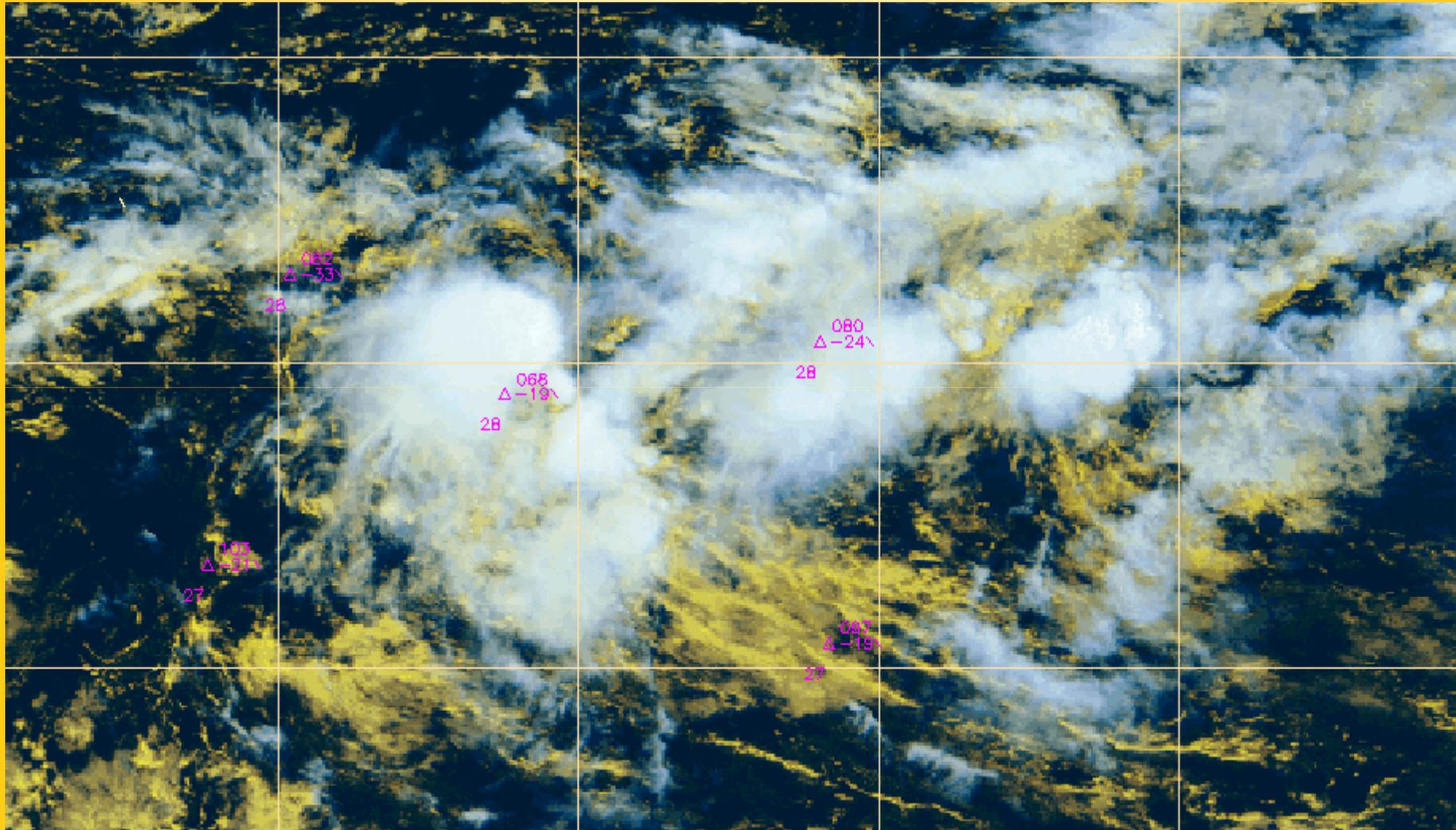
**5. Interaction fréquente entre la perturbation naissante et un talweg d'altitude.**  
*Frequent interaction between an upper-tropospheric trough and the incipient disturbance.*

**6. Un indicateur précoce du début de cyclogénèse est l'apparition de bandes nuageuses de convection au sein de la perturbation naissante.**  
*An early indicator that cyclogenesis has begun is the appearance of curved banding features of deep convection within the incipient disturbance.*

**7. Le cœur central du futur cyclone peut avoir pour origine un méso-vortex en moyenne troposphère formé en association avec une zone d'altostratus pré-existante à méso-échelle.**  
*The inner core of the cyclone may originate as a mid-level meso-vortex that has formed in association with a pre-existing meso-scale area of altostratus.*

## La perturbation nuageuse initiale

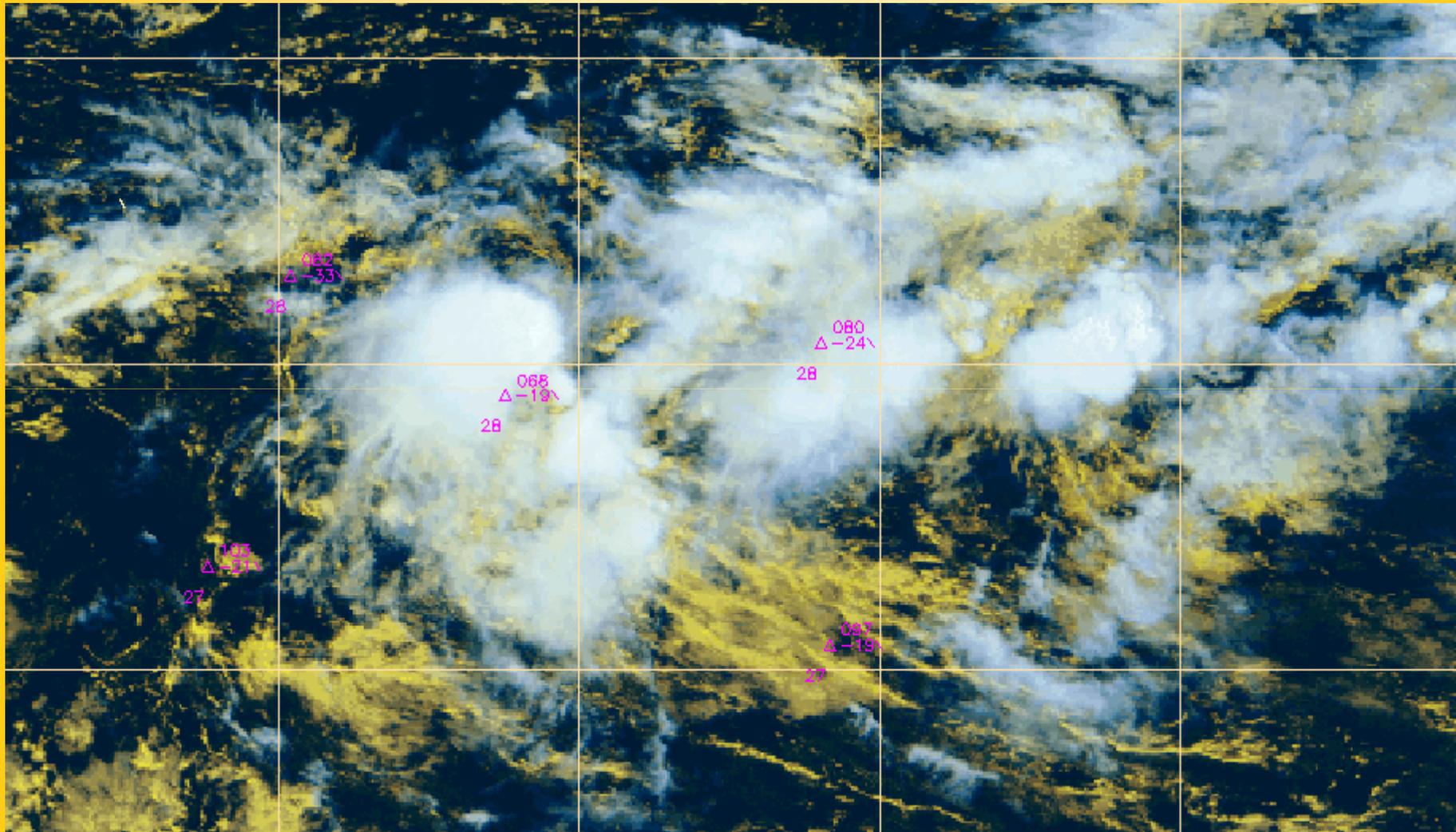
### The pre-existing disturbance



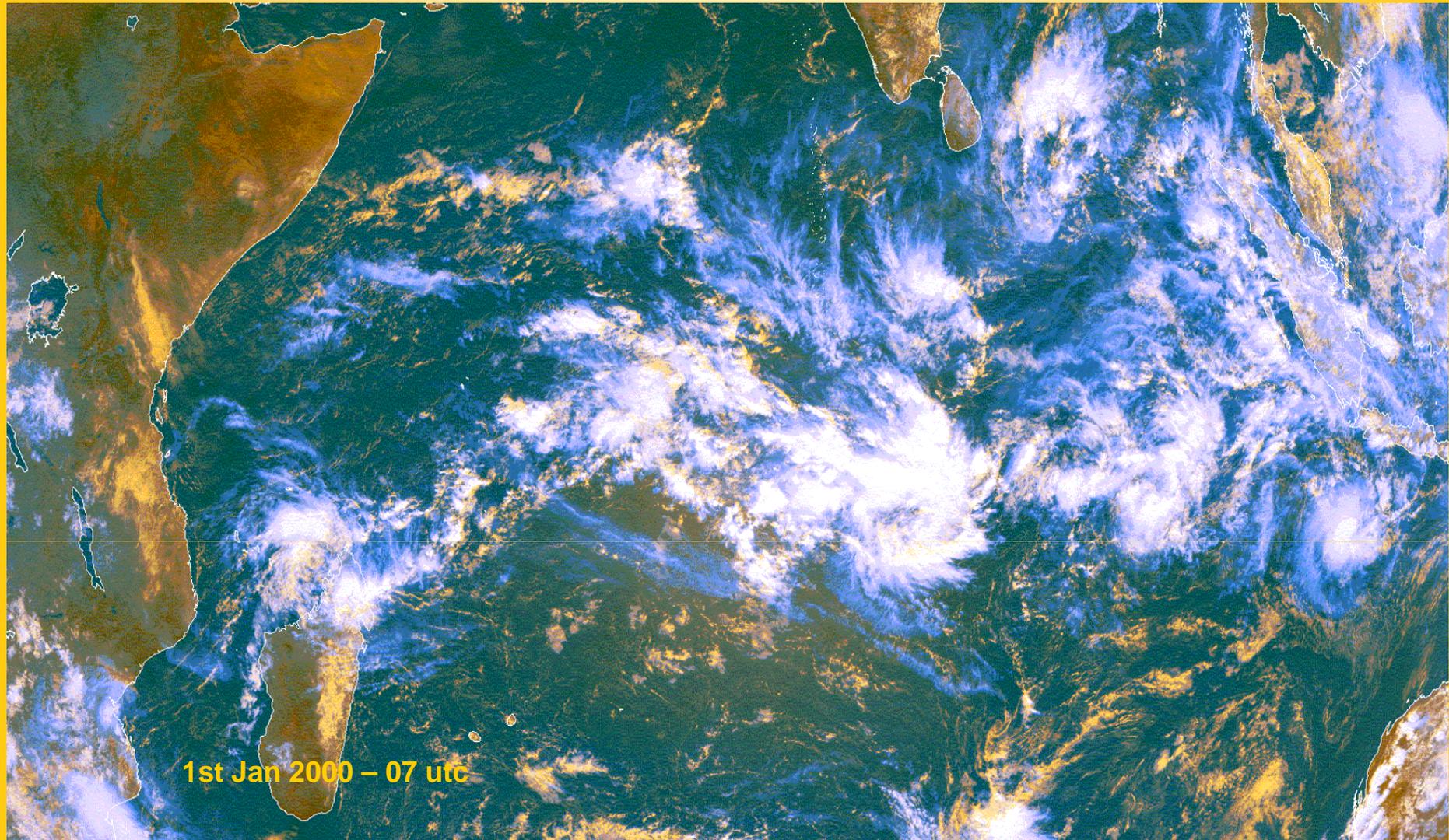
*We observe universally that tropical storms form only within pre-existing disturbances... An initial disturbance therefore forms part of the starting mechanism. A weak circulation, low pressure, and a dep moist layer are present at the beginning. Riehl (1954)*

# La perturbation nuageuse initiale

## The pre-existing disturbance



Cloud clusters within low pressure area      meso-scale ascent (vertical motion 100 hPa/day over a 4° square area for pre-genesis disturbances)      upper-tropospheric warm core  
Larger rotational circulation (1000-1500 km)

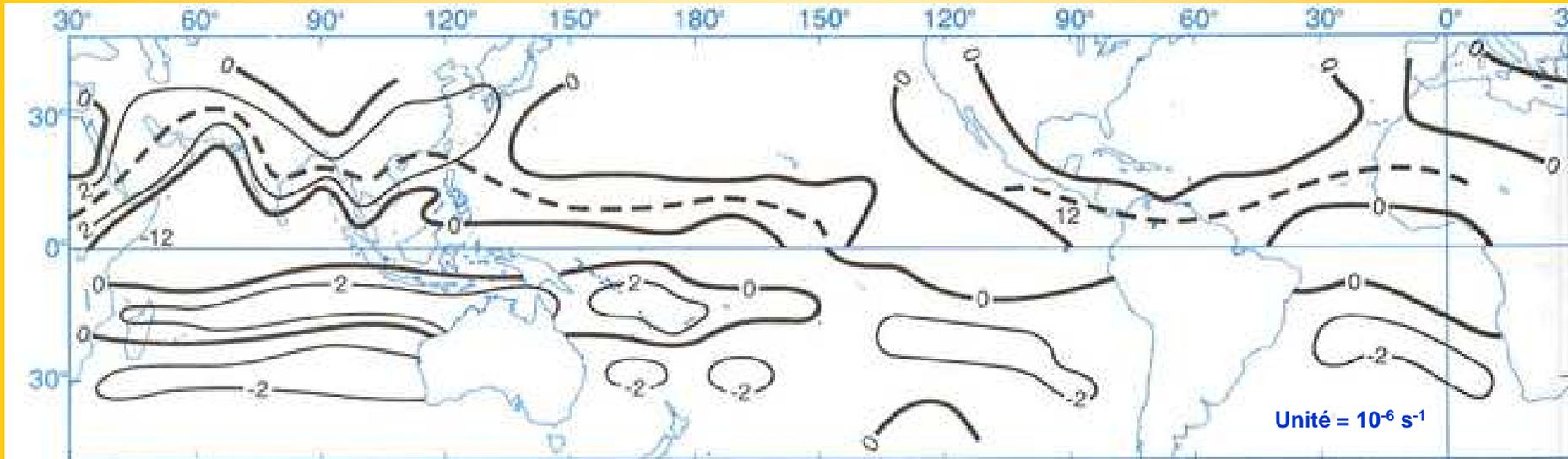


**An important requirement is that the pre-cyclone cloud cluster must be « persistent » .**

***Zehr found 72 cloud clusters that lasted more than two days in the North Pacific in 1983-1984 : 22 non-developing vs. 50 that became tropical storms (developers).***

***Hence a 70% probability of cyclogenesis.***

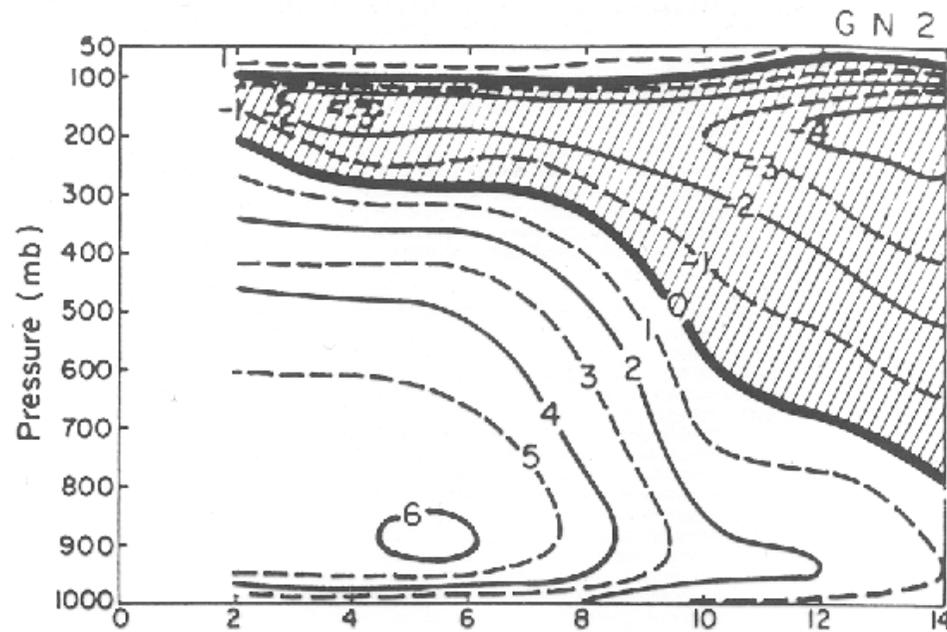
## Carte moyenne du tourbillon relatif en surface



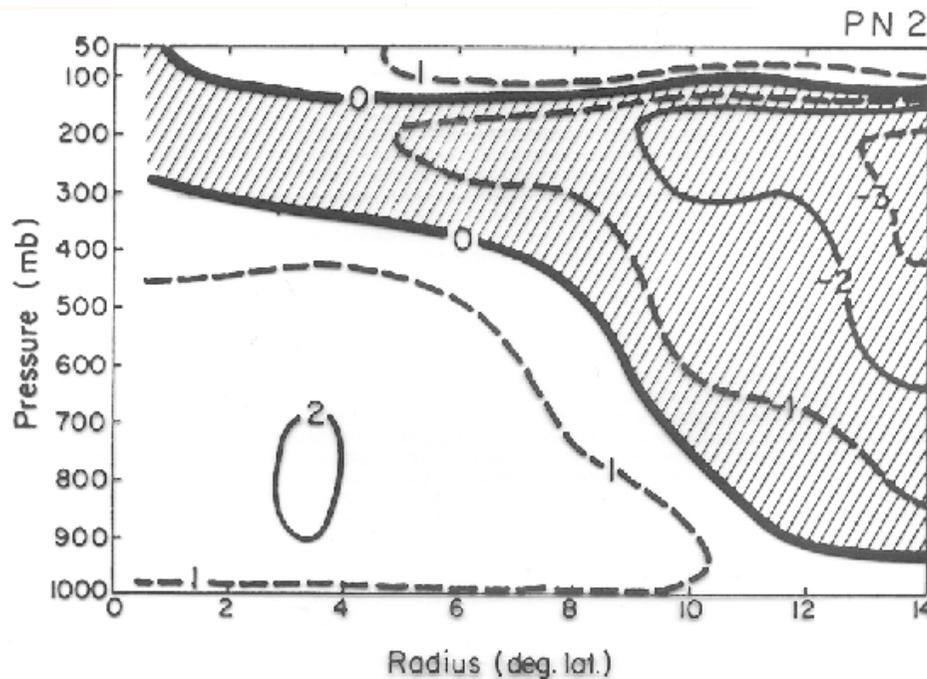
Pour les mois d'août dans l'hémisphère Nord et janvier dans l'hémisphère Sud.  
Les valeurs extrêmes (+12, -12) sont observées dans l'hémisphère Nord au mois d'août en liaison avec l'hiver austral.

**Chart of mean surface relative vorticity during August in the northern hemisphere and during January in the southern hemisphere.**  
Extreme values (+12, -12) are found in the northern hemisphere during August and linked with austral winter.

## Comparaison de circulations tangentielles



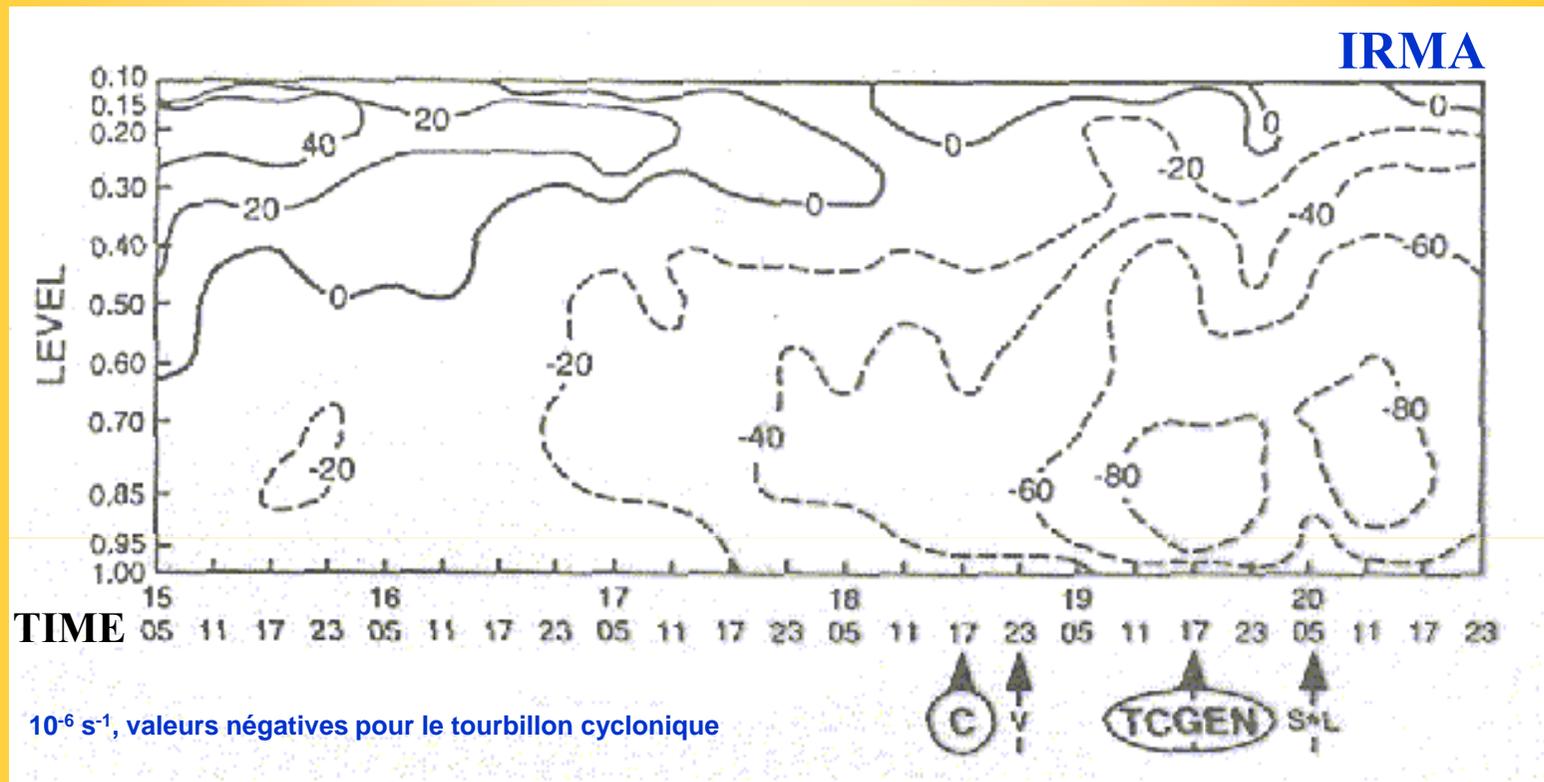
En (m/s) autour de perturbations composites du Pacifique Nord-Ouest, respectivement pour des futurs typhons, 18 h avant leur genèse (en haut), et pour des amas nuageux durables ayant ensuite avorté (en bas).



Tangential winds (m/s) for West Pacific composites of pre-typhoon cloud clusters about 18 h prior to genesis (GN) and non-developing, long lasting cloud clusters (PN).

Stronger middle- and lower-level cyclonic circulations from 2-8° lat. radius and larger inward eddy fluxes of momentum in the middle levels for developpers compared to non-developpers.

**Evolution temporelle de la coupe verticale du tourbillon relatif, dans un rayon de 300 km autour de la perturbation initiale de la future IRMA, en janvier 1987.**



Time-height sections of relative vorticity (cyclonic is negative) over a 300 km radius circle surrounding the disturbance that developed into TC Irma during the Australian Monsoon Experiment (Jan 1987).

Mesures lors de la campagne AMEX (Australian Monsoon Experiment).

C : moment du premier maximum de convection.

V : début de renforcement rapide du tourbillon.

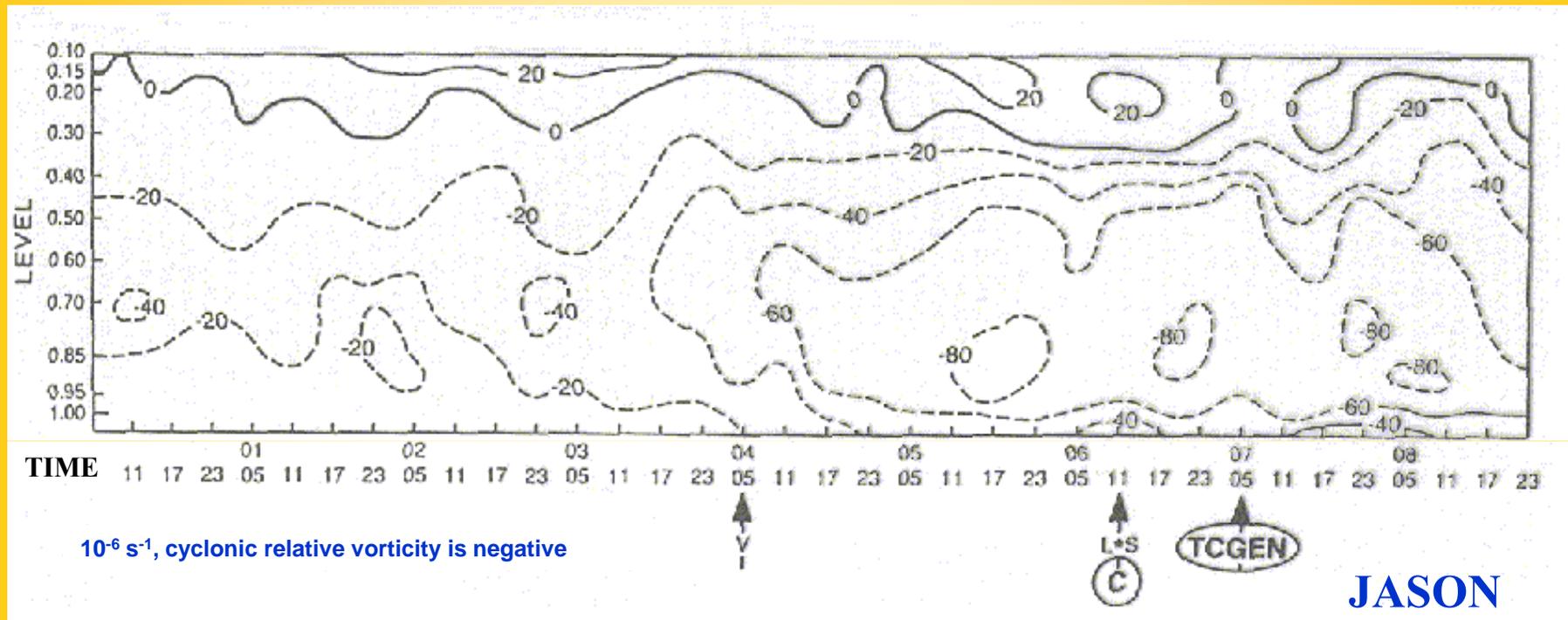
TCGEN : moment où les vents maximaux ont atteint 34 nœuds.

C : beginning of the early convective maximum

V : start of the spin-up of the outer circulation

TCGEN : TC genesis

**Evolution temporelle de la coupe verticale du tourbillon relatif, dans un rayon de 300 km autour de la perturbation initiale du futur Jason (janvier-février 1987).**



Time-height sections of relative vorticity (cyclonic is negative) over a 300 km radius circle surrounding the disturbance that developed into tropical cyclone JASON in January-February 1987.

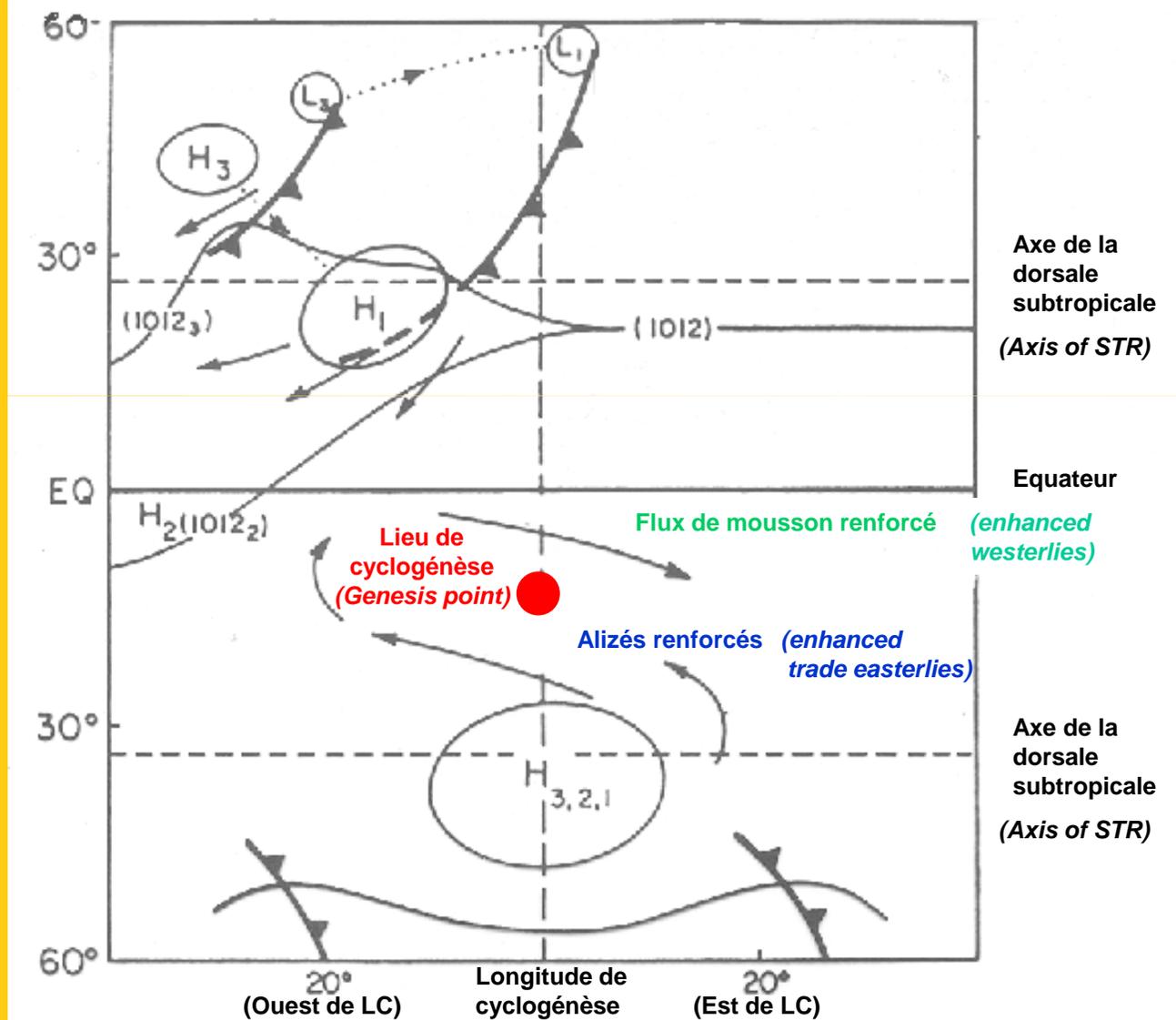
Data collected during the AMEX- Australian Monsoon Experiment.

Label V : time of the beginning of the rapid spin-up of the outer circulation.

Label C : time of the beginning of the early convective maximum.

TCGEN : time of the classification as a tropical storm (max winds reaching 34 knots).

**Carte de surface idéalisée représentant les "poussées" d'alizés et de mousson produites dans l'hémisphère Sud par les évolutions des centres d'action associés.**

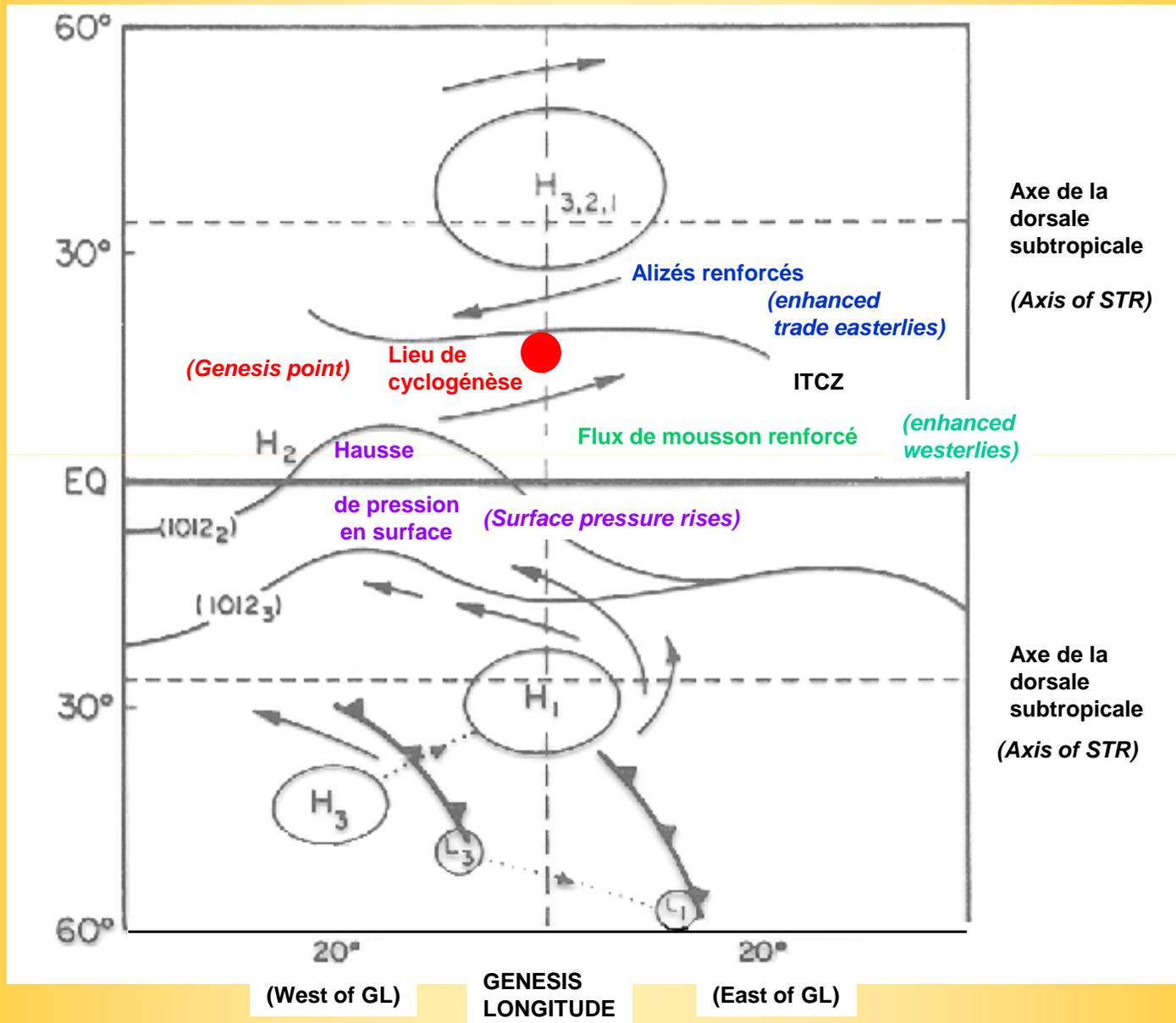


Les indices 1, 2, 3 indiquent les positions 1, 2, et 3 jours avant la cyclogénèse.

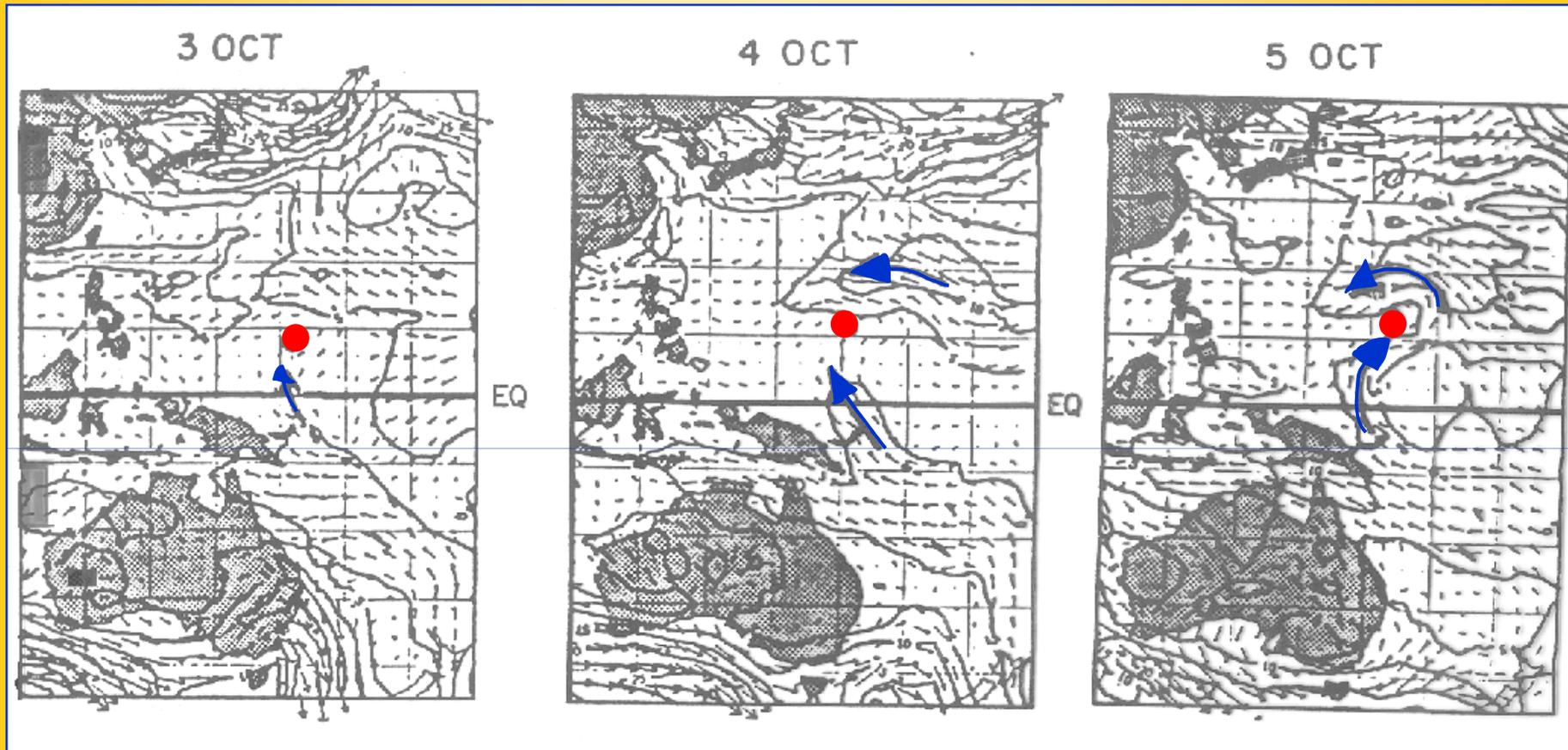
**Idealized surface chart showing the positions of important synoptic scale features and related surges 3 days to 1 day before cyclogenesis (for southern hemisphere).**

Subscripts 1,2,3 on the highs (H) and lows (L) denote days before genesis.

**Idem que précédemment mais pour l'hémisphère Nord**



**Analyses des champs de vent à 850 hPa par le modèle du CEP les 3, 4, 5 oct 1983 à 12 utc, lors de la phase initiale de genèse du futur typhon OGDEN.**

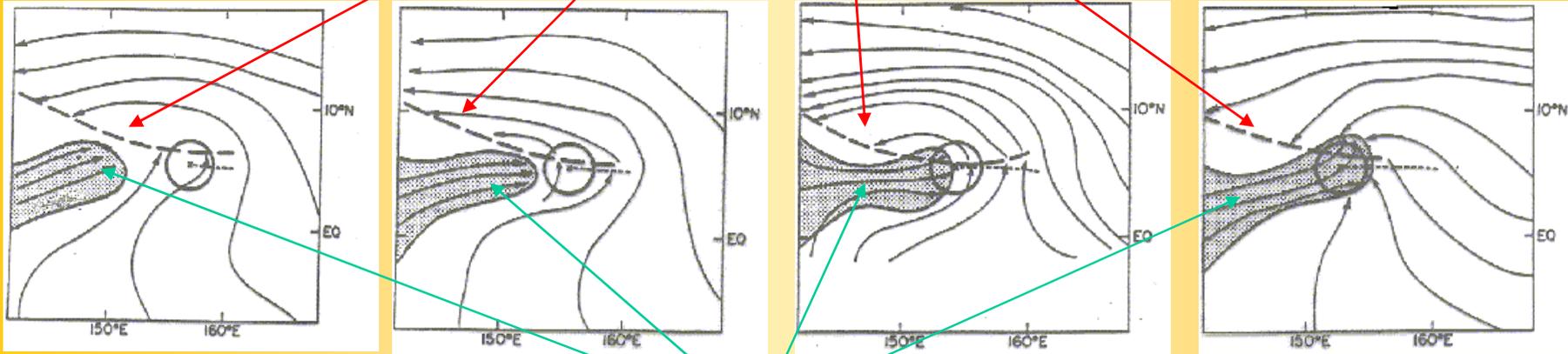


Durant toute cette période, les vents maximaux au sein de la perturbation sont demeurés inférieurs à 15 m/s.

ECMWF 850 hPa analyses during the early stages of formation of pre-typhoon OGDEN at 12Z on October the 3rd, 4th, and 5th 1983. Maximum winds in the disturbance at this stage were less than 15 m/s for all 3 periods.

Talweg de mousson  
(*Monsoon trough*)

Le cercle représente la circulation dépressionnaire de la perturbation initiale (4° de diamètre).  
La croix représente le centre du vortex de méso-échelle associé.



Poussée de flux  
(*Surge*)

18 sept 1983, 03 utc  
MSLP = 1005 hPa

18 sept 1983, 09 utc  
MLSP = 1005 hPa

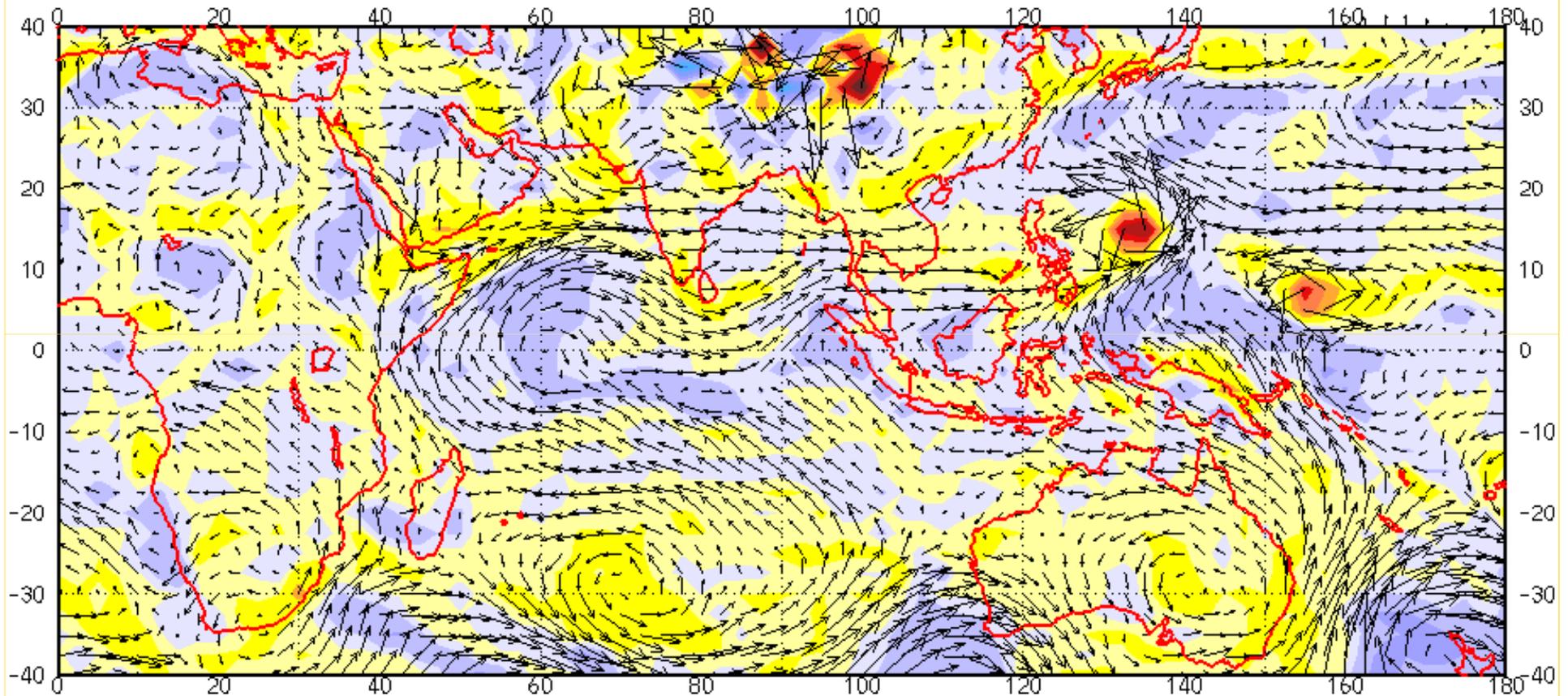
18 sept 1983, 15 utc  
MLSP = 1005 hPa

18 sept 1983, 21 utc  
MSLP = 1004 hPa

**Evolution toutes les 6 heures des lignes de flux analysées à 850 hPa, lors de la phase 1 de la cyclogénèse du typhon FORREST.**

Six hourly sequence of 850 hPa streamline analyses during Stage 1 of tropical cyclogenesis for typhoon FORREST, showing time evolution of the surge, the monsoon trough and the broadscale cyclonic circulation centre location of the pre-stage 1 disturbance (4° diameter circle).  
(the mesoscale vortex location is denoted by an « x » symbol).

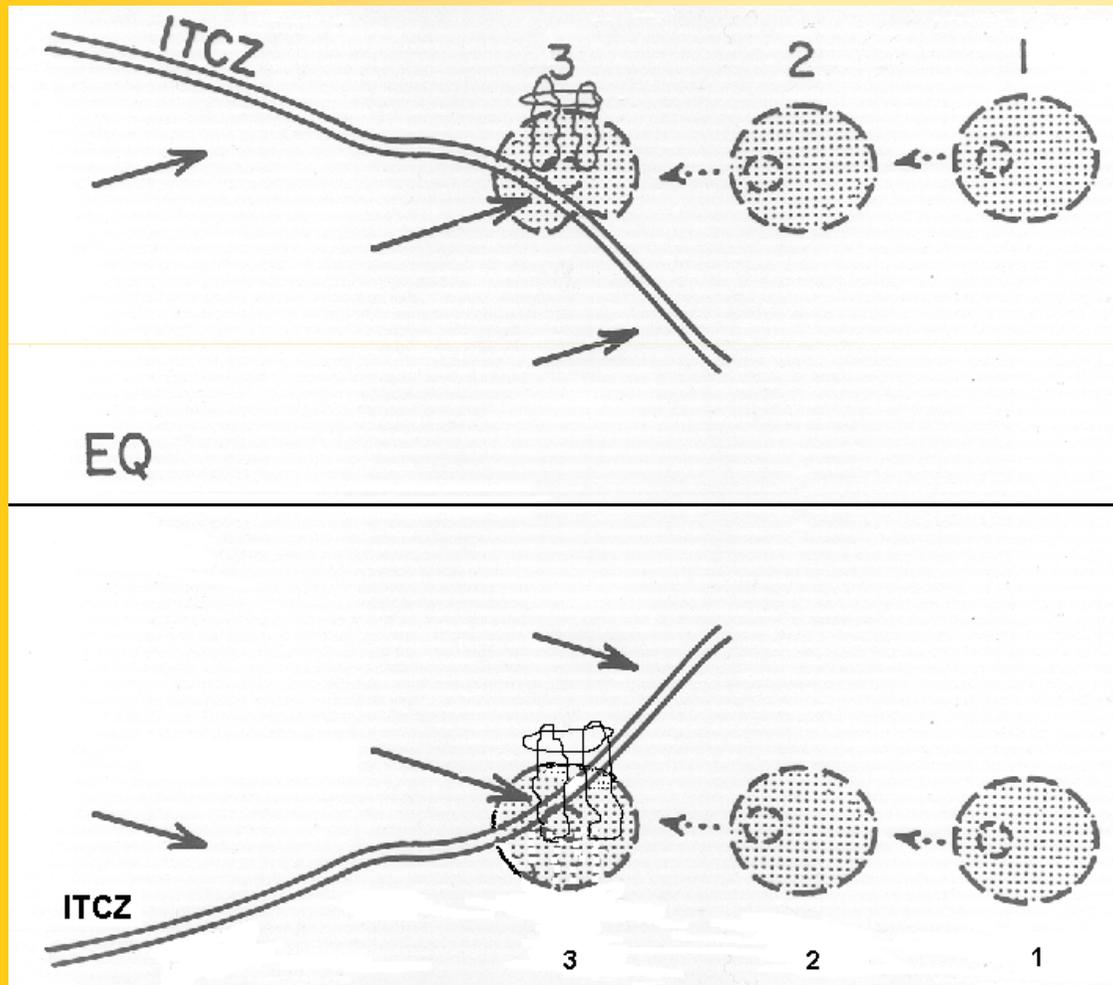
**Cyclogenèses des typhons Rammasun et Chataan dans le Pacifique Nord-Ouest  
le 30 juin 2002 (vents et tourbillon absolu à 850 hPa).**



**Cyclogenesis of typhoons Rammasun and Chataan in the NWP on  
30 June 2002 (850 hPa winds and absolute vorticity).**

**Schéma illustrant une forme particulière de "wind surge" (poussée de flux).**

**A specific case of wind surge**



**Schéma illustrant comment une "poussée de flux" relative, peut être générée par un amas nuageux se déplaçant vers l'ouest et pénétrant dans une ZCIT de mousson stationnaire.**

**Illustration of a westward moving cloud cluster (shaded) entering a stationary ITCZ monsoon trough, wherein the steady westerly winds on the equatorward of the trough act as an effective wind surge.**

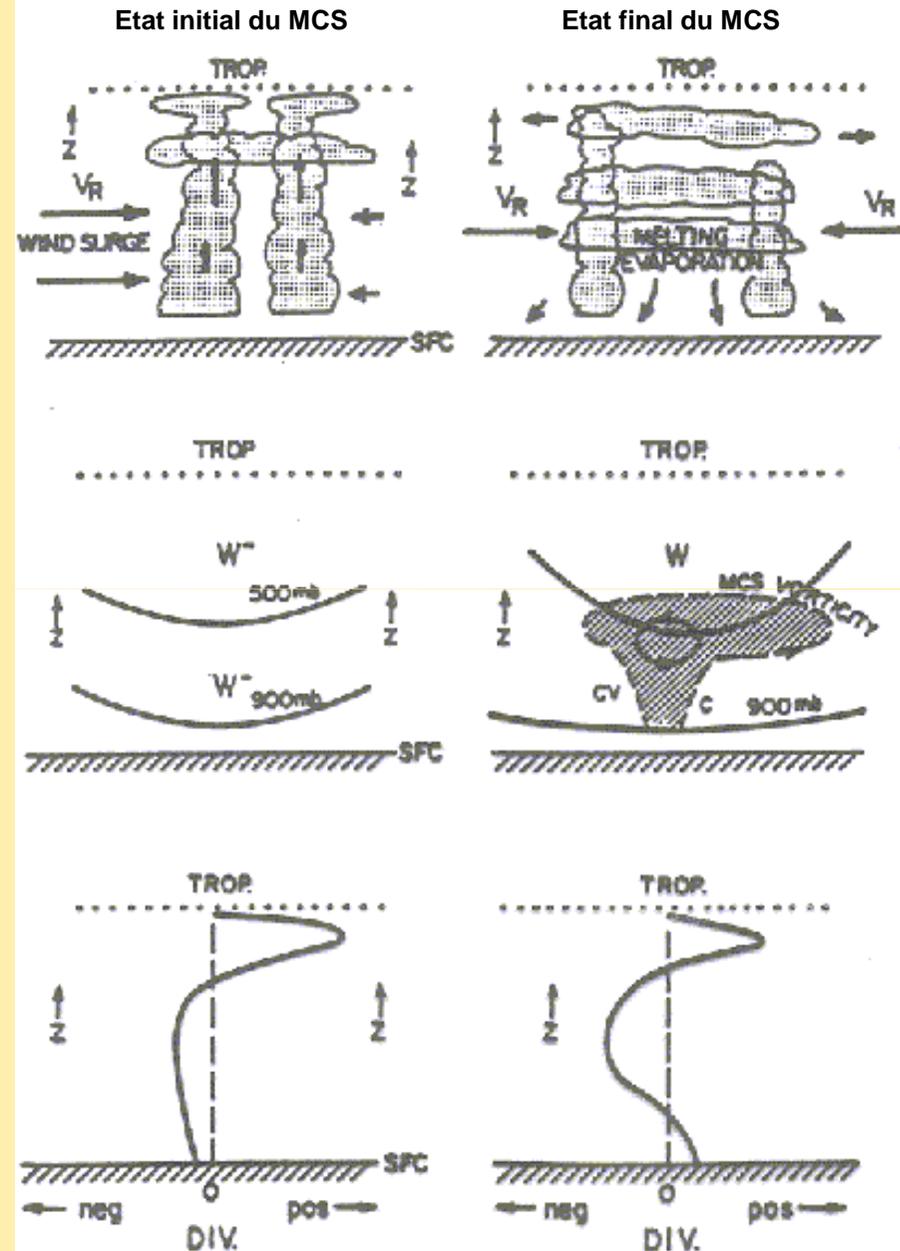
## Coupes verticales des processus idéalisés intervenant dans un Système Convectif de Méso-échelle (MCS) (1)

Processus idéalisés intervenant durant des forçages successifs liés à des poussées de flux dans l'environnement extérieur ("surges"), avec, de haut en bas, les nuages, les structures des surfaces isobares et des anomalies de température, et les profils de divergence.

Idealized vertical cross-sections of processes occurring with the early and late development stages of a MCS which is initiated by a wind surge.

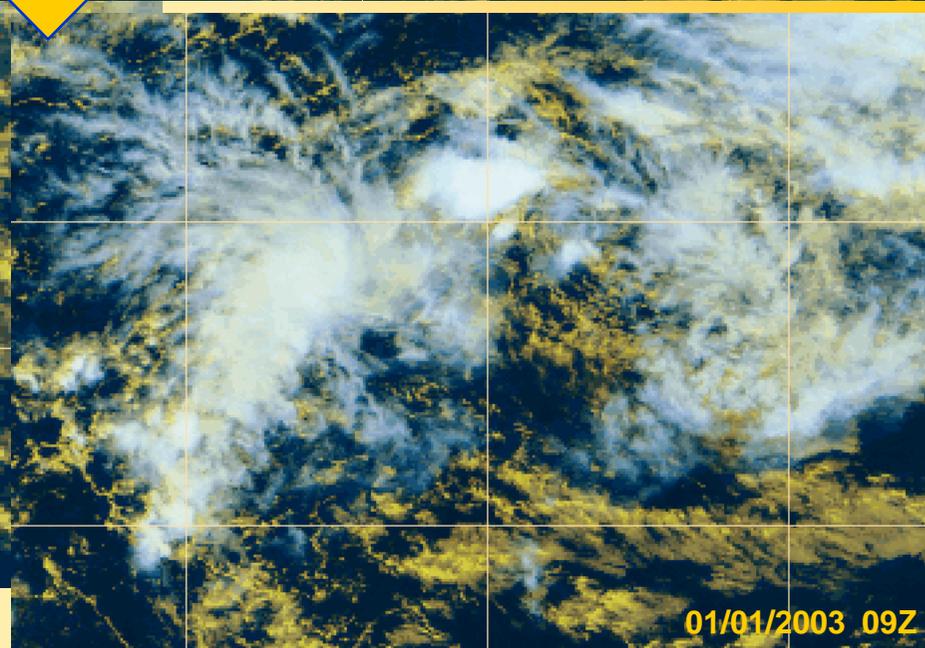
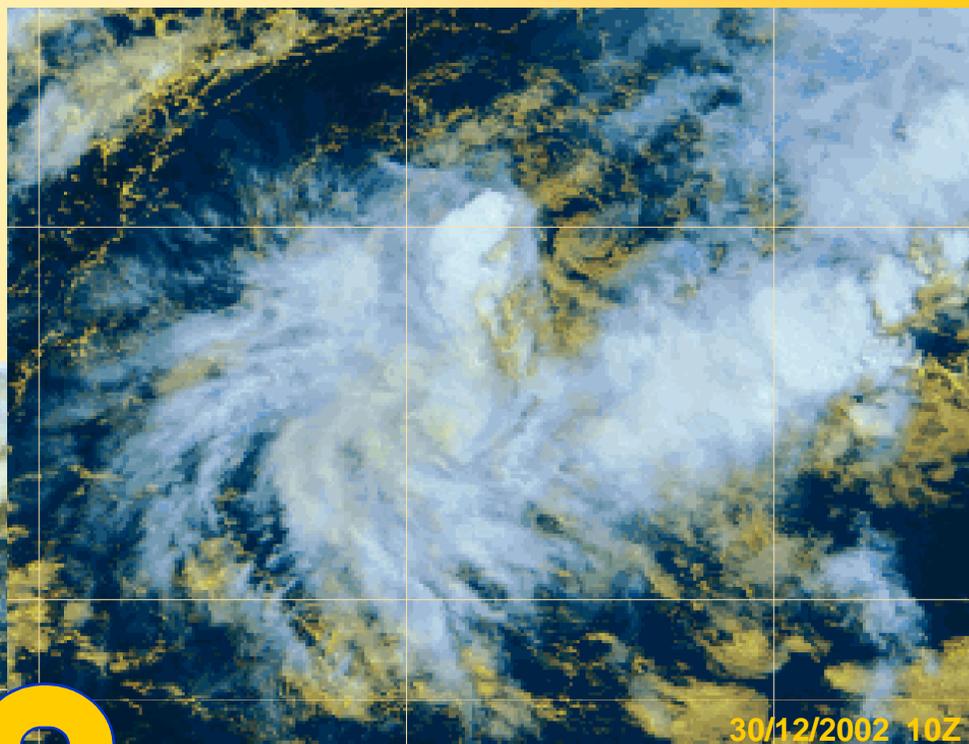
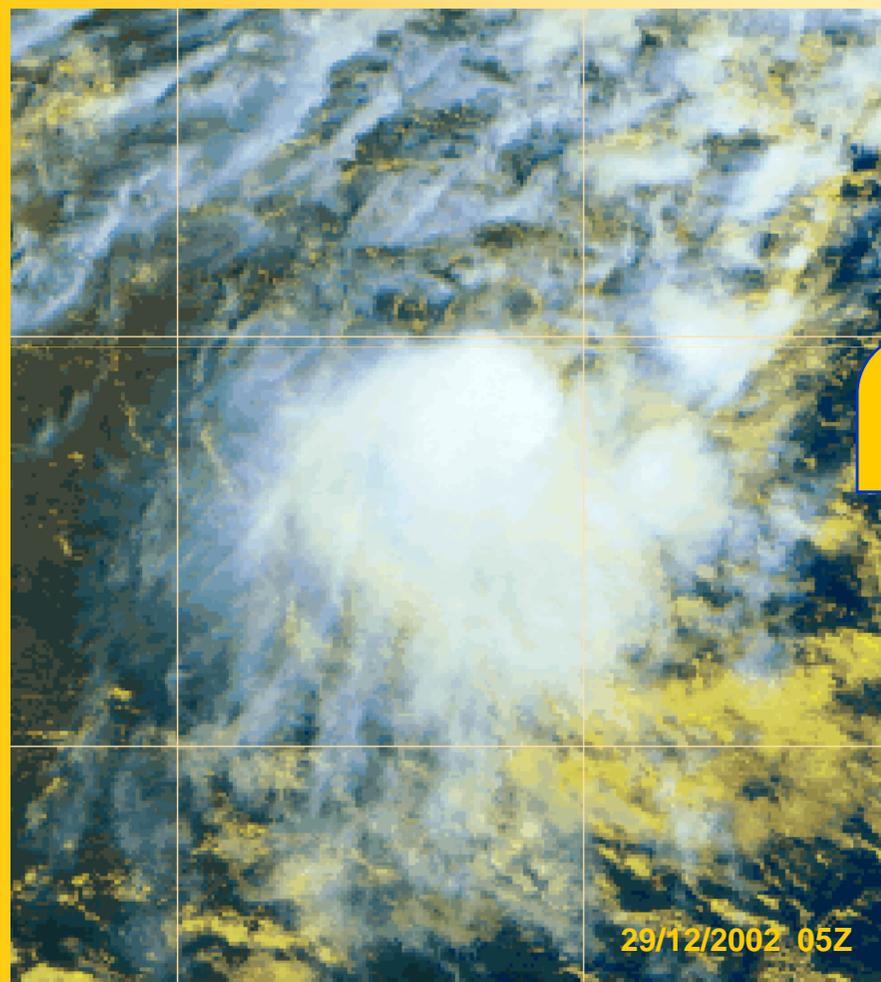
Diagrams show, from top to bottom, the cloudiness, the slope of pressure surfaces with temperature anomalies, and the typical divergence profiles.

### Première poussée de flux



# Evolution d'un Système Convectif de Mésos-échelle (MCS) sur 3 jours

3-days evolution of a Meso-scale Convective System (MCS)



## Coupes verticales des processus idéalisés intervenant dans un Système Convectif de Mésos-échelle (MCS) (2)

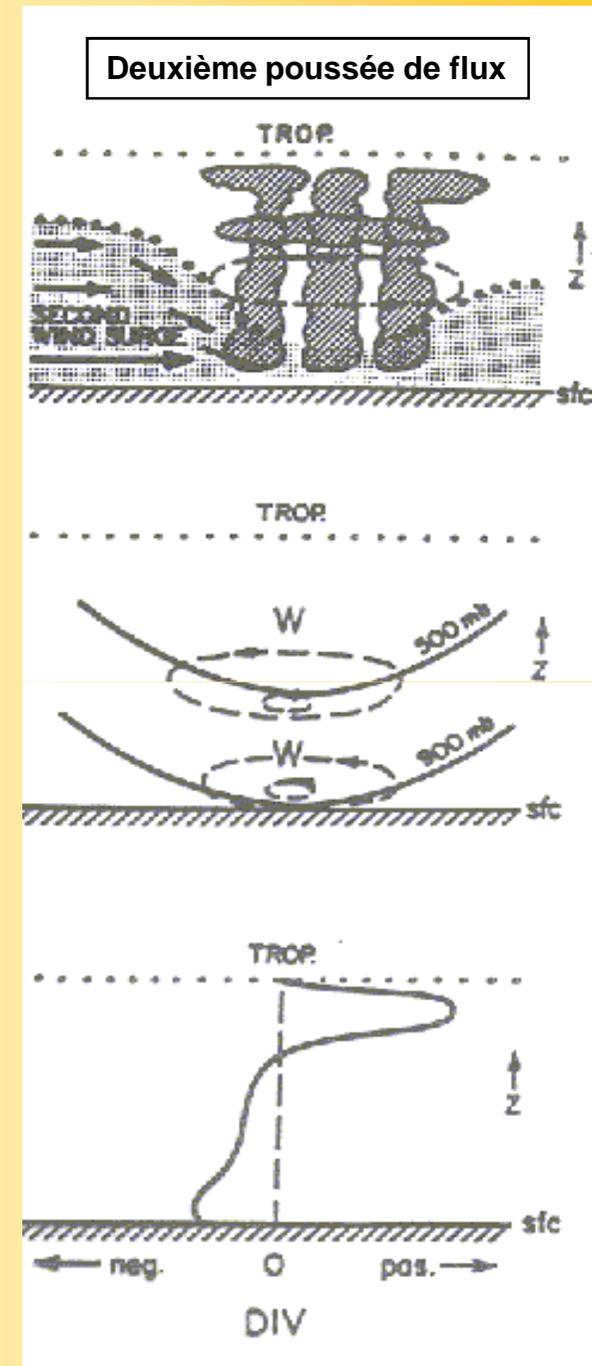
Après 1 à 3 jours

Une deuxième poussée de flux vient intéresser la région du MCS pré-existant.

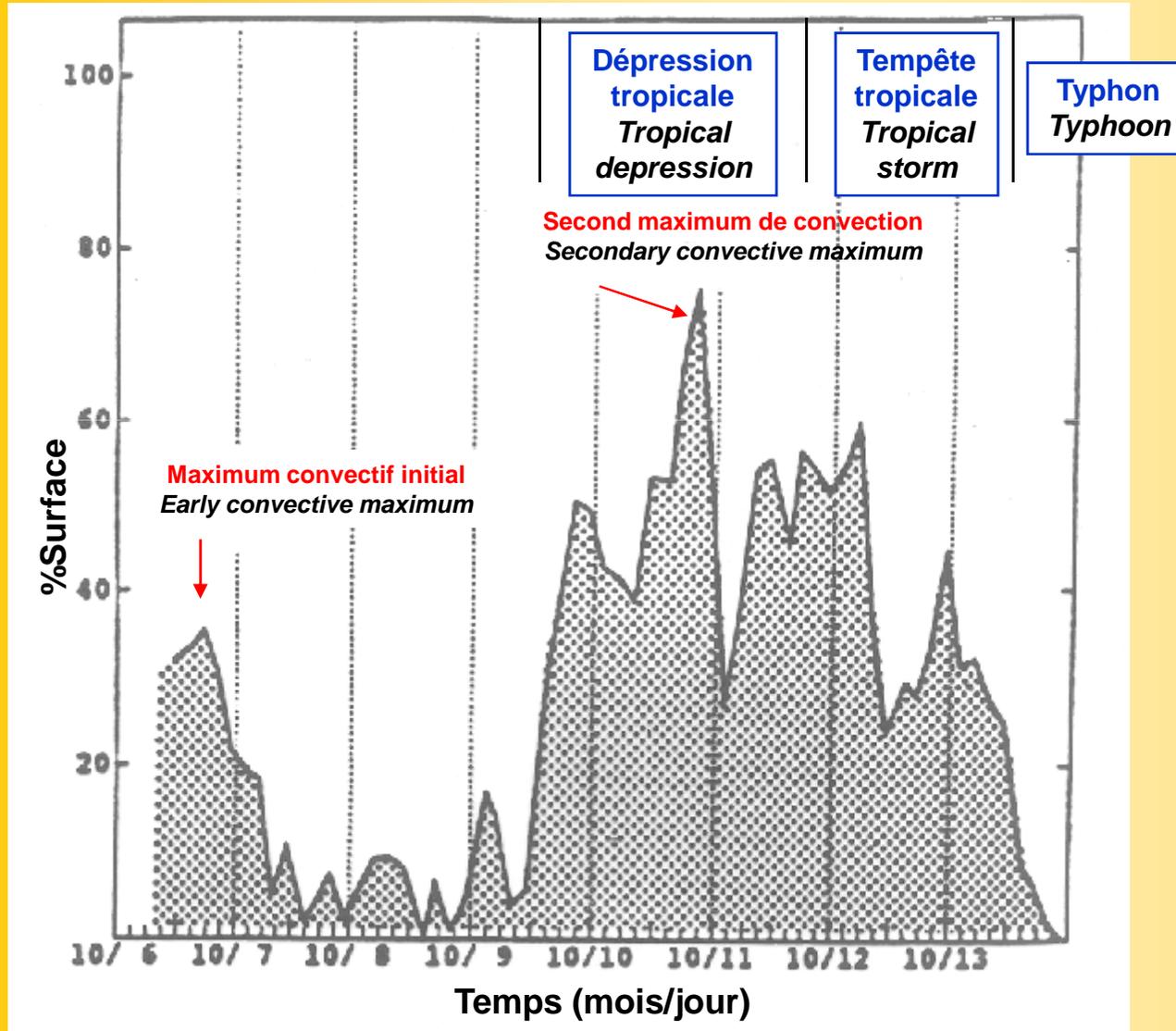
Du fait de la stabilité inertielle des couches moyennes, la poussée de flux vient se concentrer dans les basses couches.

Il en résulte un "spin-up" plus important des basses couches que des couches moyennes, et la mutation d'un système à cœur froid de basses couches en un système à cœur chaud.

During this stage, a second wind surge impinges on the region of a prior MCS. Inertial stability of the middle layers causes much of the deep layer wind surge to become concentrated at lower levels. This acts to spin-up the lower levels more than the mid-levels and to change the system from a low-level cold core to a warm core.



## Evolution temporelle de la convection profonde en phase de genèse



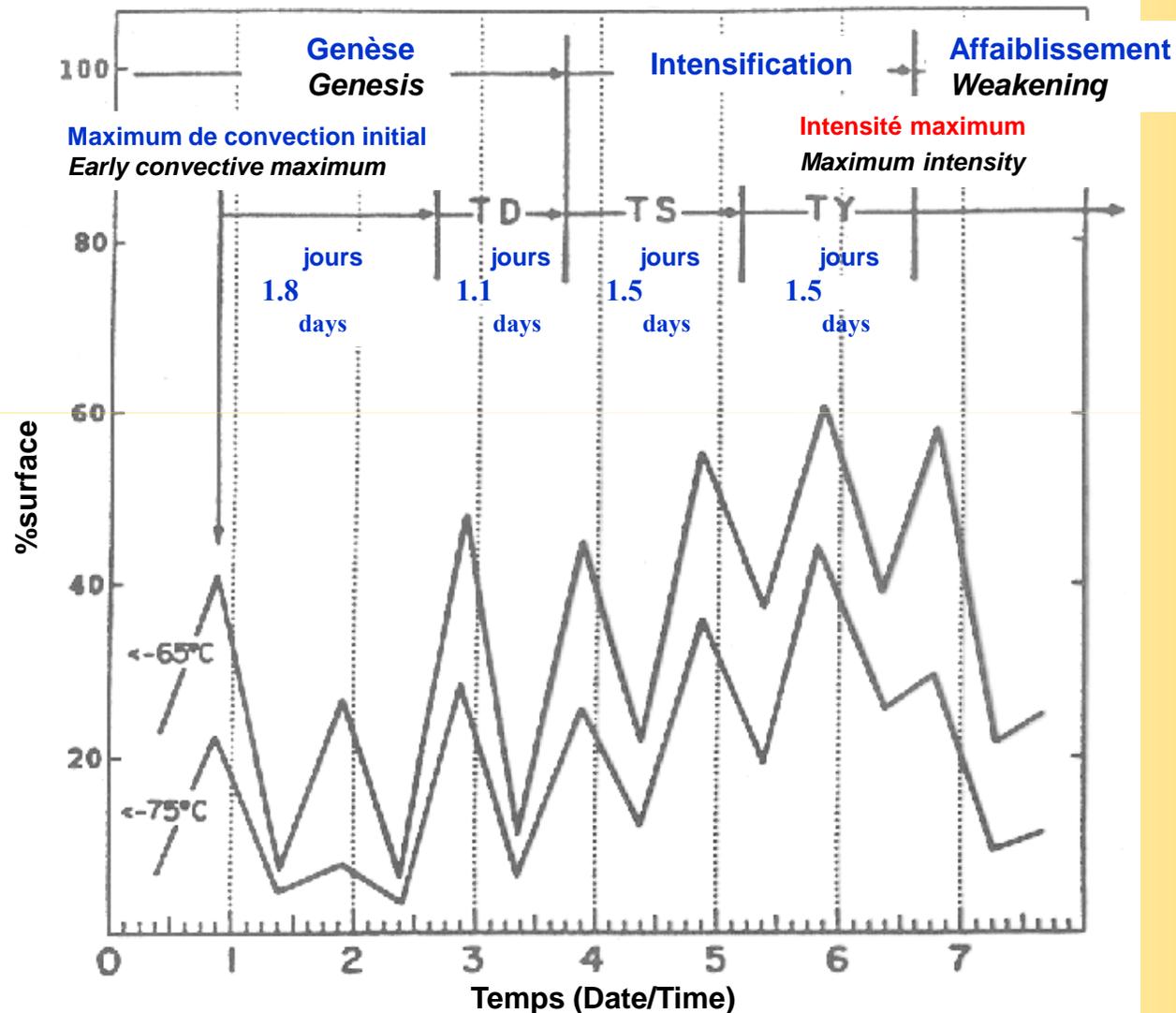
Pourcentage de la surface s'étendant jusqu'à 2° du centre de la future tempête tropicale JOE, couverte par les nuages présentant une température IR inférieure à -65°C.

**Exemple représentatif des poussées de convection observées 2/3 jours avant intensification et baptême d'un système (Zehr, 1992).**

Percent of the area extending out to 220 km (2°) radius from pre-tropical storm Joe wherein IR temperatures were less than -65°C.

**This example is typical of many other pre-cyclone disturbances which exhibit blowups of deep convection 2-3 days before the intensification to named storm. (Zehr, 1992)**

## Evolution temporelle type de la convection profonde lors d'une perturbation tropicale au cours de son existence



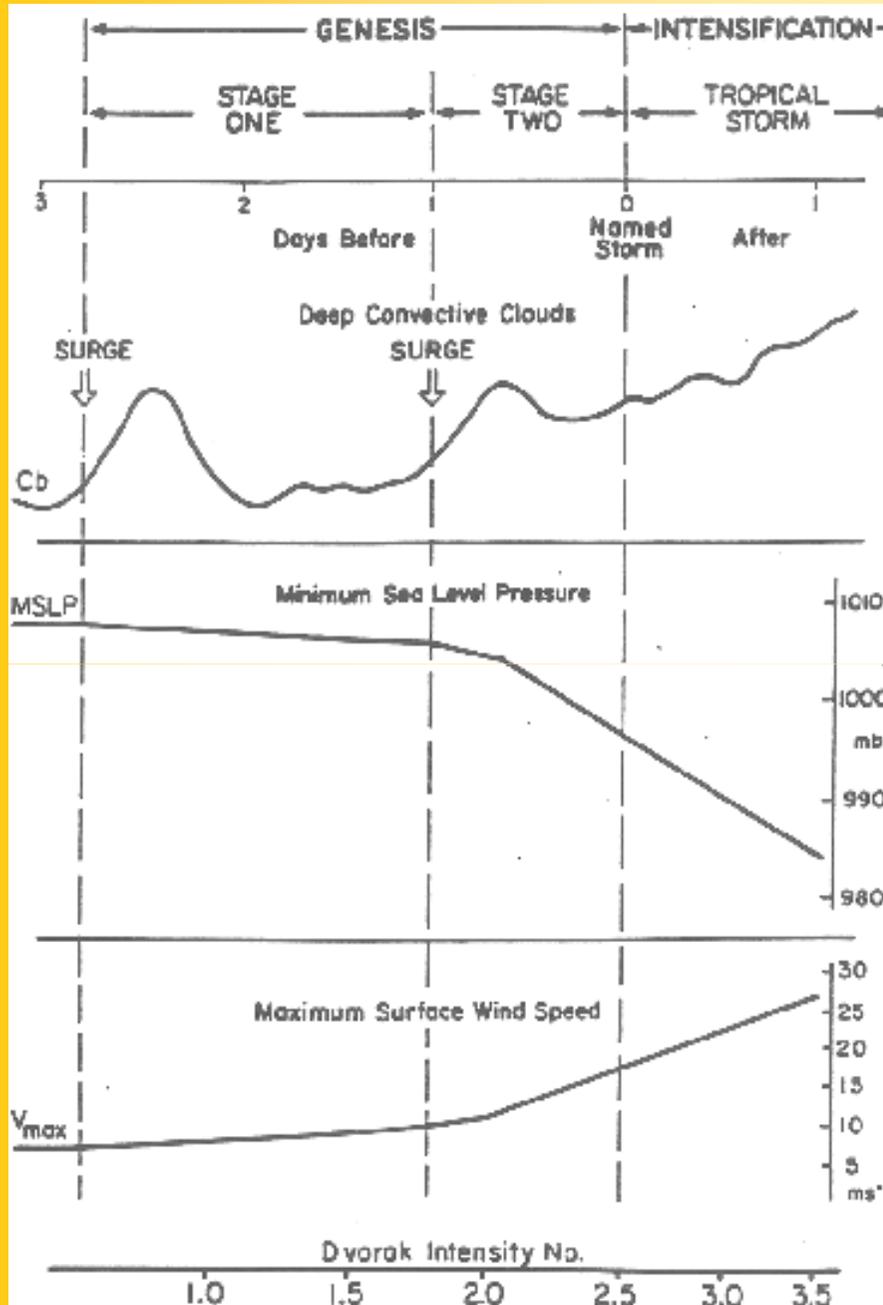
Chaque ligne verticale correspond à 10 h locales.

L' évolution de la convection profonde est représentée par l'évolution de la surface couverte, dans un rayon de 2° autour du centre, par les nuages à température IR les plus froides (d'après Zehr, 1992)

Typical time series of 0-2° radius cold IR areas during the life-cycle of a tropical cyclone.

Each vertical line is equivalent to 10 a.m. local time.

## Modèle conceptuel de la cyclogénèse



Ce schéma résume les modifications caractéristiques de convection (Cb), de minimum de pression (MSLP) et de vent maxi (V<sub>max</sub>), ainsi que leurs valeurs numériques approximatives respectives, durant la cyclogénèse d'un système dépressionnaire tropical. Les nombres T d'intensités Dvorak correspondantes sont également indiqués en bas.

Conceptual model of cyclogenesis summarizing the important changes of Cb, MSLP and V<sub>max</sub> during tropical cyclogenesis with estimates of the approximate numerical values. The associated Dvorak intensity T-numbers are also shown below.

# Modèle conceptuel de la cyclogénèse tropicale en deux phases (1)

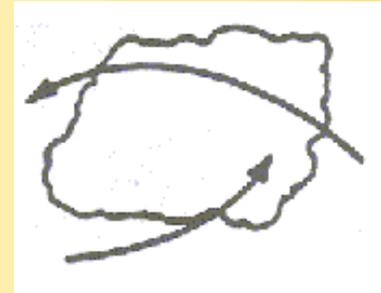
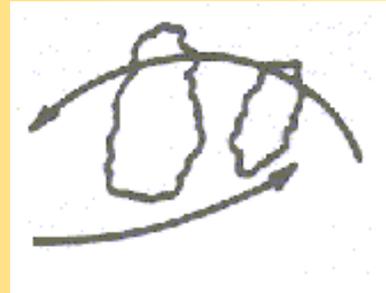
Avant  
Before

Maximum de convection  
Convective maximum

Après  
After

Première phase

Stage one



Perturbations d'échelle synoptique

Synoptic-scale disturbances

Circulation cyclonique large et/ou onde d'est  
Broad, cyclonic circulation and/or easterly wave

Amas nuageux de convection active et proéminente  
Prominent, active cloud cluster

Circulation cyclonique large et/ou onde d'est  
Broad, cyclonic circulation and/or easterly wave

Vortex de méso-échelle

Mesoscale vortex

Aucun  
None

Initiation

Faible, avec peu ou pas de convection profonde  
Weak, with little or no deep convection

Convection totale

Overall convection

Faible à modérée  
Weak to moderate

Importante  
Strong

Faible à modérée  
Weak to moderate

# Modèle conceptuel de la cyclogénèse tropicale en deux phases (2)

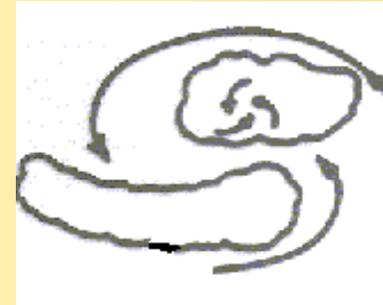
Avant  
Before

Maximum de convection  
Convective maximum

Après  
After

Deuxième phase

Stage two



Perturbations d'échelle synoptique

Synoptic-scale disturbances

Circulation cyclonique large et/ou onde d'est  
Broad, cyclonic circulation and/or easterly wave

Amas nuageux de convection active et proéminente, avec des bandes nuageuses de faible courbure  
Prominent, active cloud cluster with slightly curved cloud bands

Stade minimal de la tempête tropicale (vent moyen maximal de 34 kt)  
Minimal tropical storm  
Max winds 17.5 m/s

Vortex de méso-échelle

Mesoscale vortex

Faible, avec peu ou pas de convection profonde  
Weak, with little or no deep convection

Faible, avec de la convection profonde près du centre  
Weak, with deep convection near its centre

S'intensifiant  
Intensifying

Convection totale

Overall convection

Faible à modérée  
Weak to moderate

Importante  
Strong

Modérée à forte  
Moderate to strong

## Le rôle des "wind surges" (poussées de flux).

### The role of wind surges

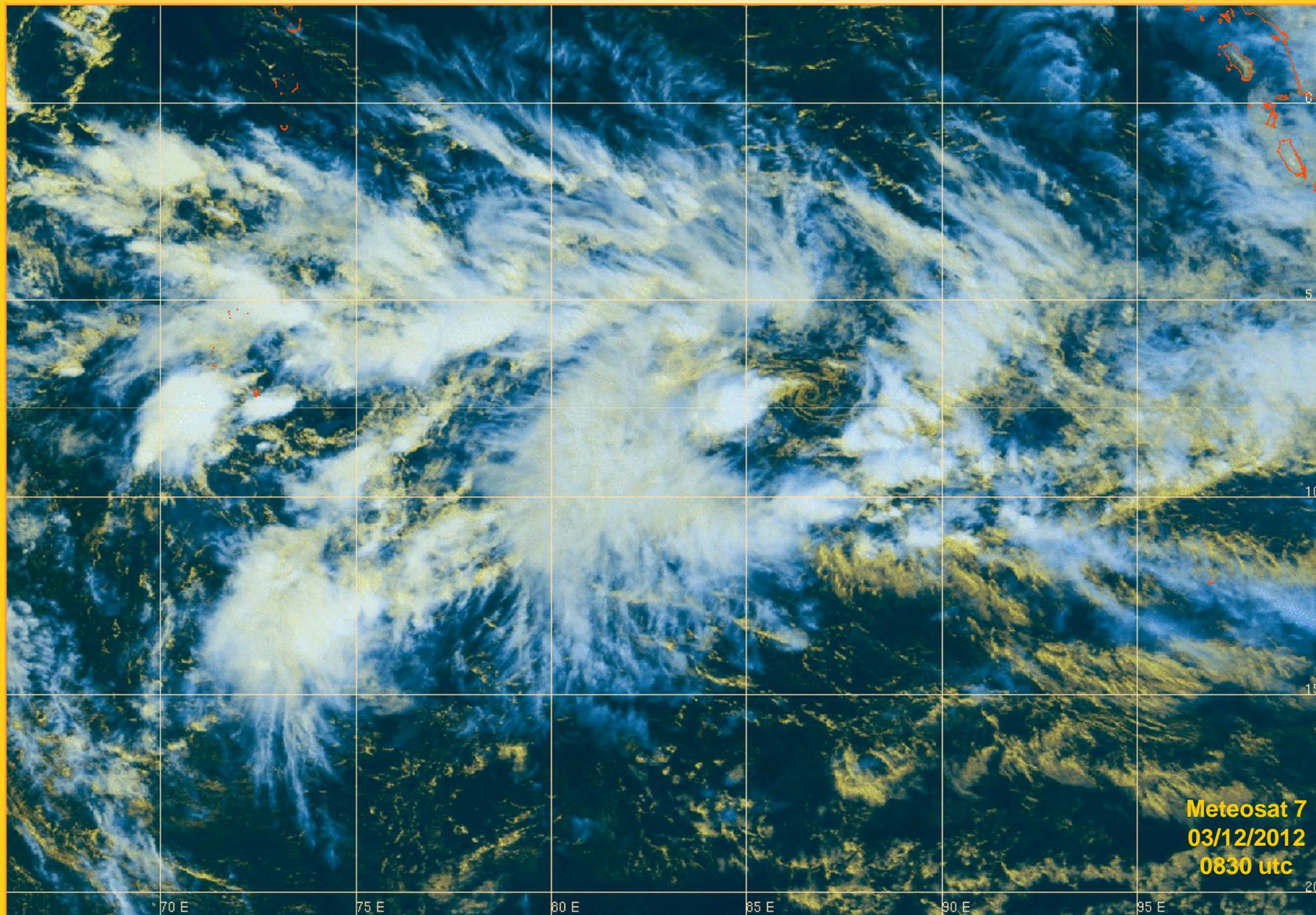
A crucial factor determining whether a system will develop or not is the presence or lack of concentrated wind convergence to the centre of the initial disturbance.

Environmentally driven asymmetrical wind surges are able to **trigger intense convective outbreaks at locations where previous MCS convection has established a concentration of high relative vorticity.**

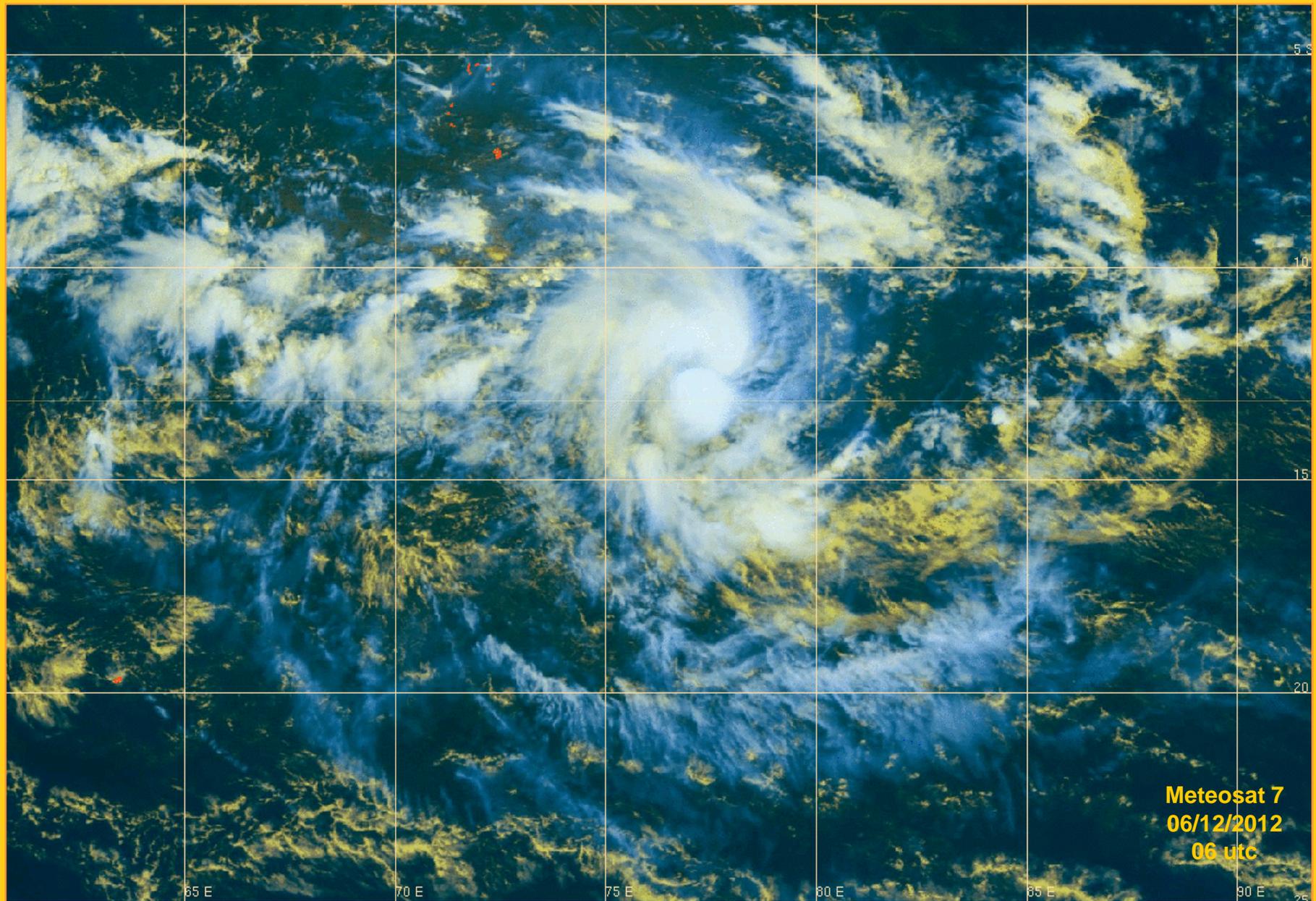
A tropical disturbance cannot and does not intensify over its entire domain. It is much more efficient if the initial intensification occurs over a small central area where strong vorticity increase takes place through externally forced convergence.

The rapid wind spin-up in this restricted area of convergence then spreads outward to larger radius.

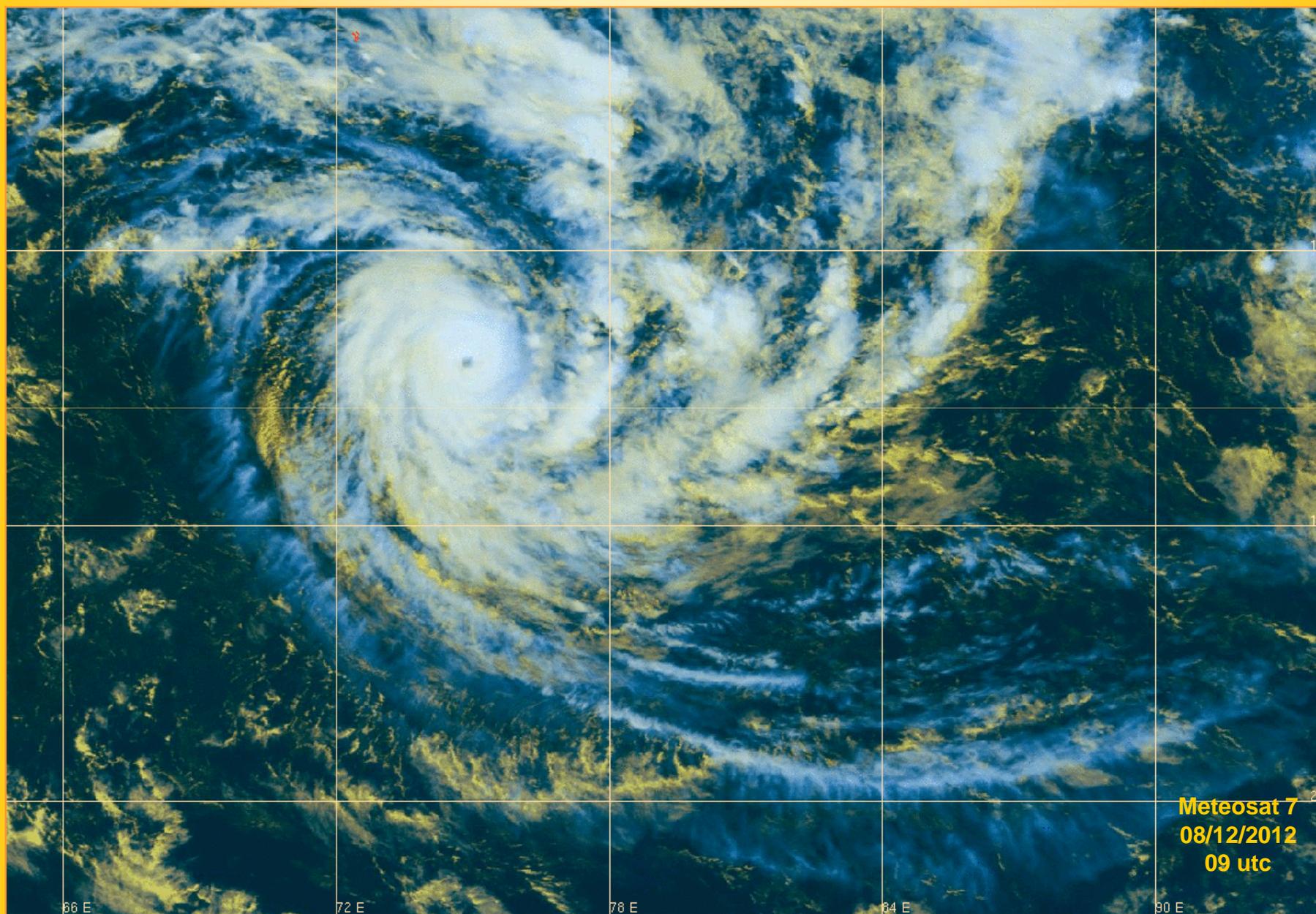
# MCV associated to pre-genesis of TC CLAUDIA



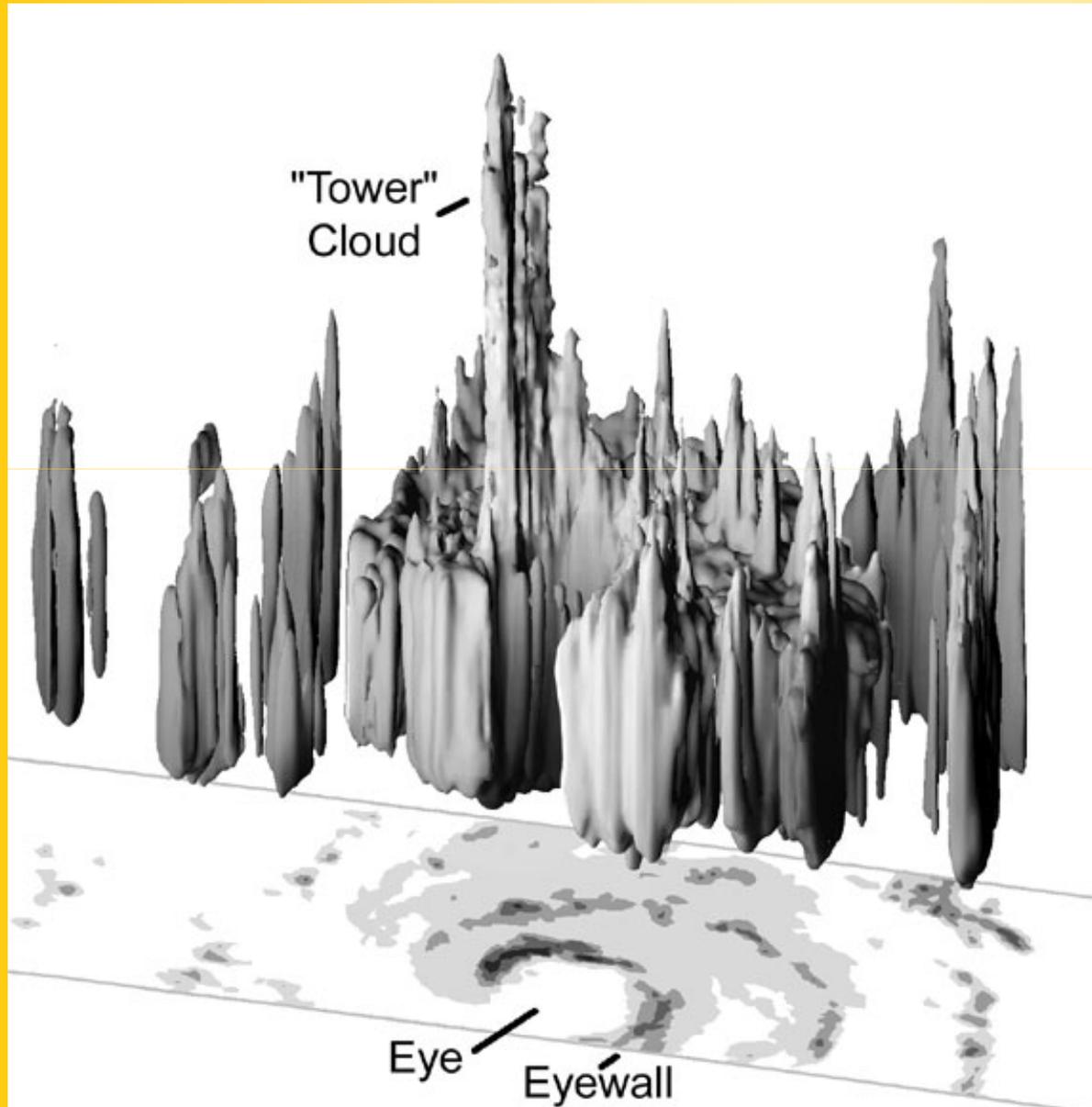
# Genesis of TC CLAUDIA



# Intensification of TC CLAUDIA



## Le concept de "tours chaudes"



Une "tour chaude" est un nuage convectif précipitant qui atteint ou dépasse la tropopause.

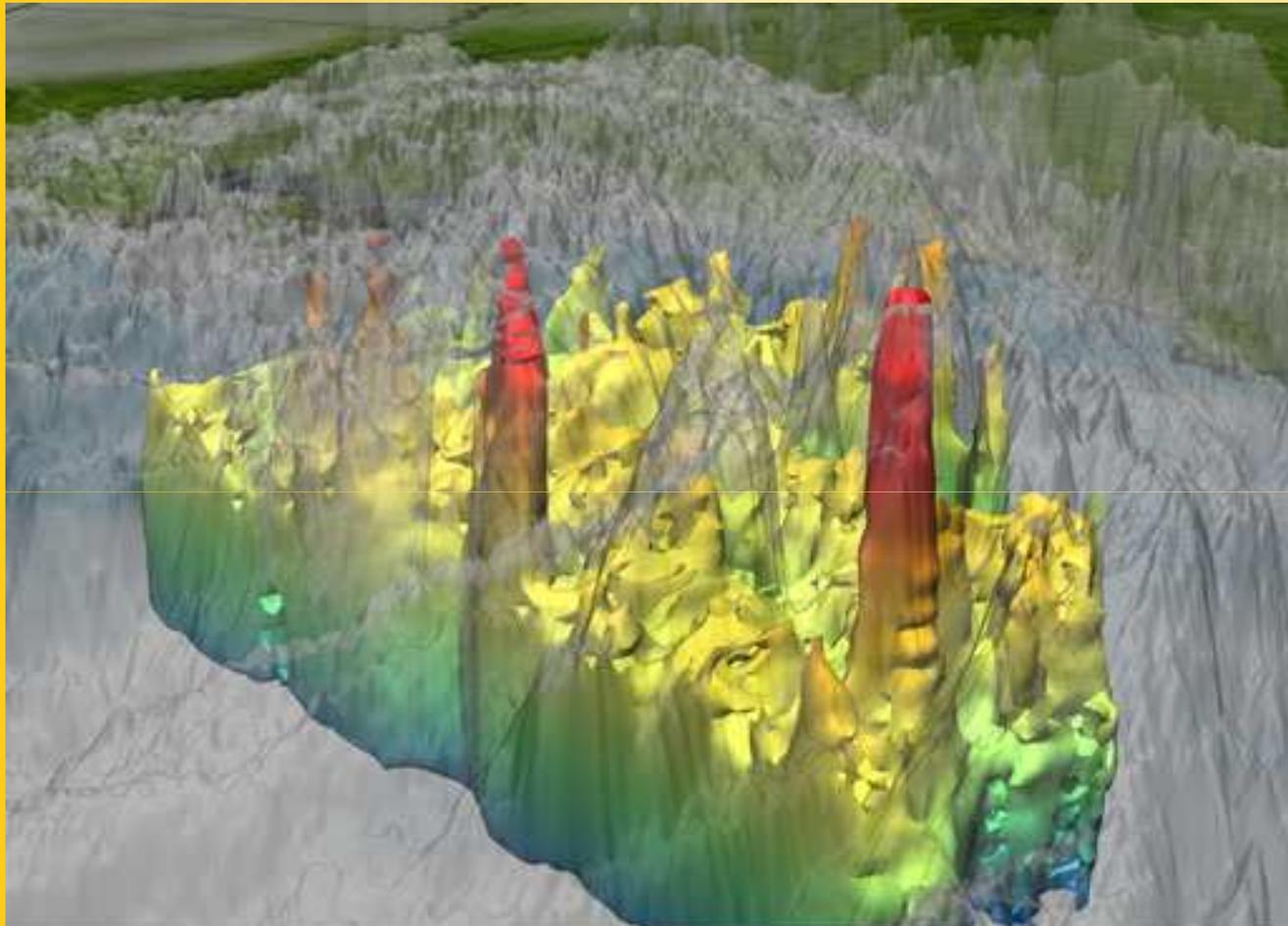
Quelques ordres de grandeur caractéristiques :

- échelle verticale : 15 à 18 km
- échelle horizontale : 5 à 10 km
- durée de vie : 1 h (jusqu'à 3h).

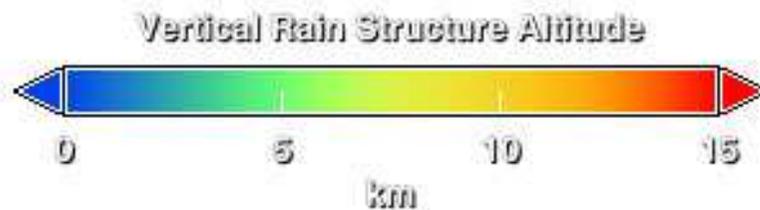
Ces cheminées nuageuses sont dites "chaudes" car elles produisent d'énormes quantités de chaleur latente par condensation.

J. Simpson referred to hot towers as "undilute or nearly undilute penetrative cumulonimbus clouds that carried high  $\theta_e$  air from the subcloud layer to the upper troposphere".

Que sont ces "tours chaudes" ?



**Tours chaudes  
dans l'ouragan  
Katrina**



Reconstitution du champ de précipitations 3D  
d'après données du radar de précipitations du  
satellite TRMM

1998 : la première "tour chaude" réellement observée et documentée

## Tropical Rainfall Measuring Mission

"Hurricane Bonnie 08/22/98"

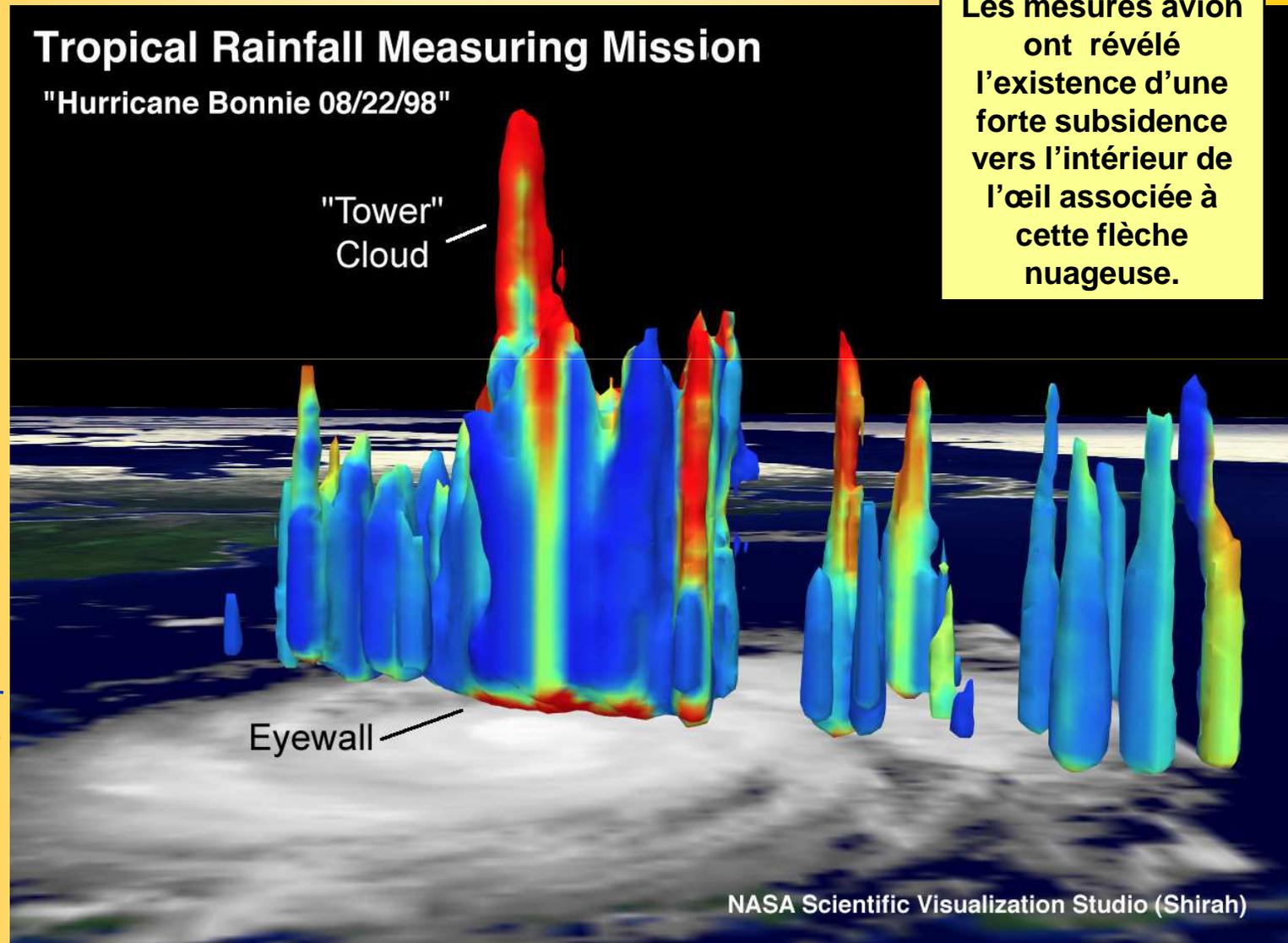
"Tower"  
Cloud

Eyewall

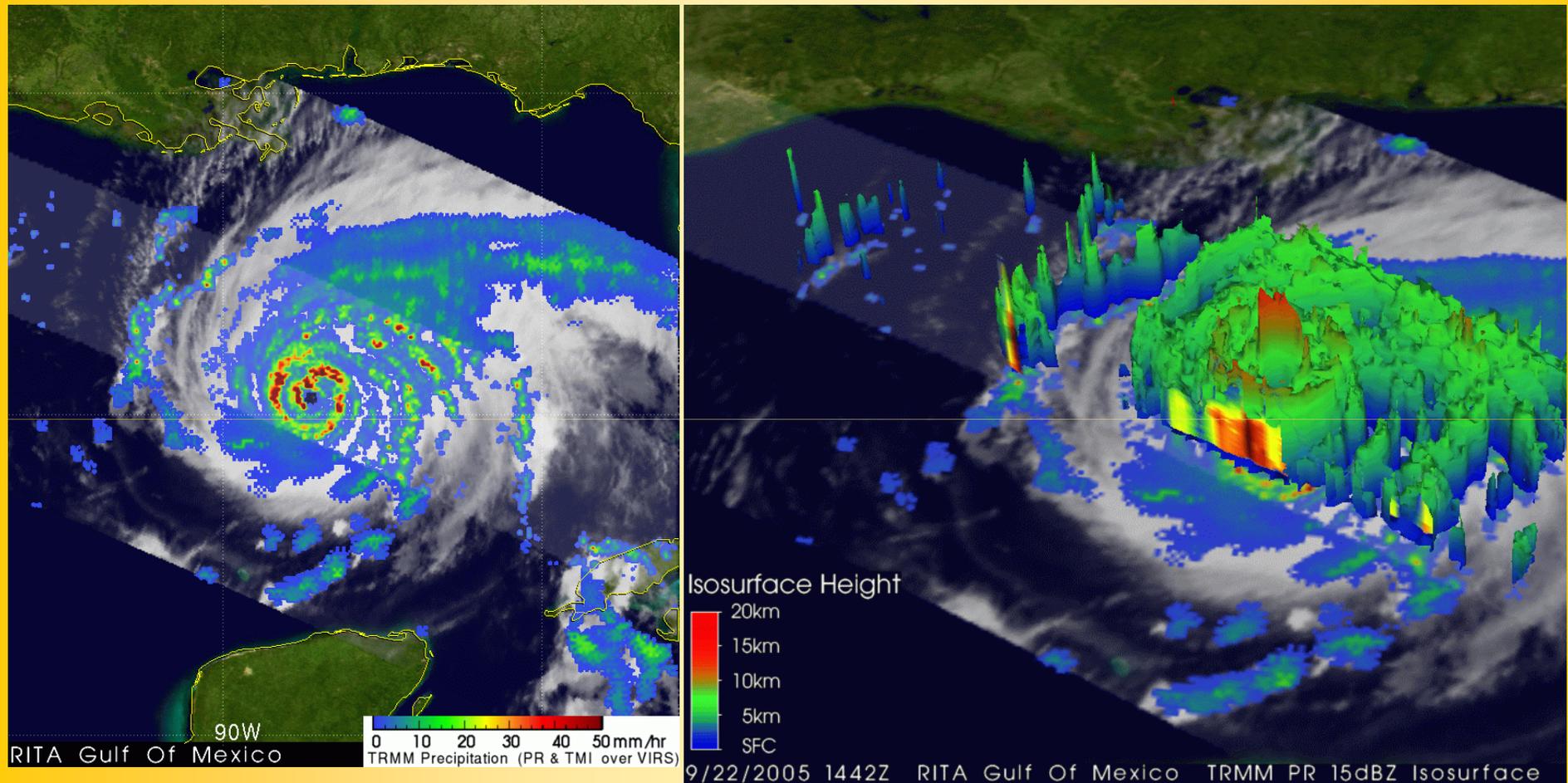
Les mesures avion  
ont révélé  
l'existence d'une  
forte subsidence  
vers l'intérieur de  
l'œil associée à  
cette flèche  
nuageuse.

Heymsfield et al.  
ER-2 Doppler Radar  
Investigations of the  
Eyewall of  
Hurricane Bonnie  
During CAMEX-3,  
*Journal of Applied  
Meteorology* 2001

NASA Scientific Visualization Studio (Shirah)



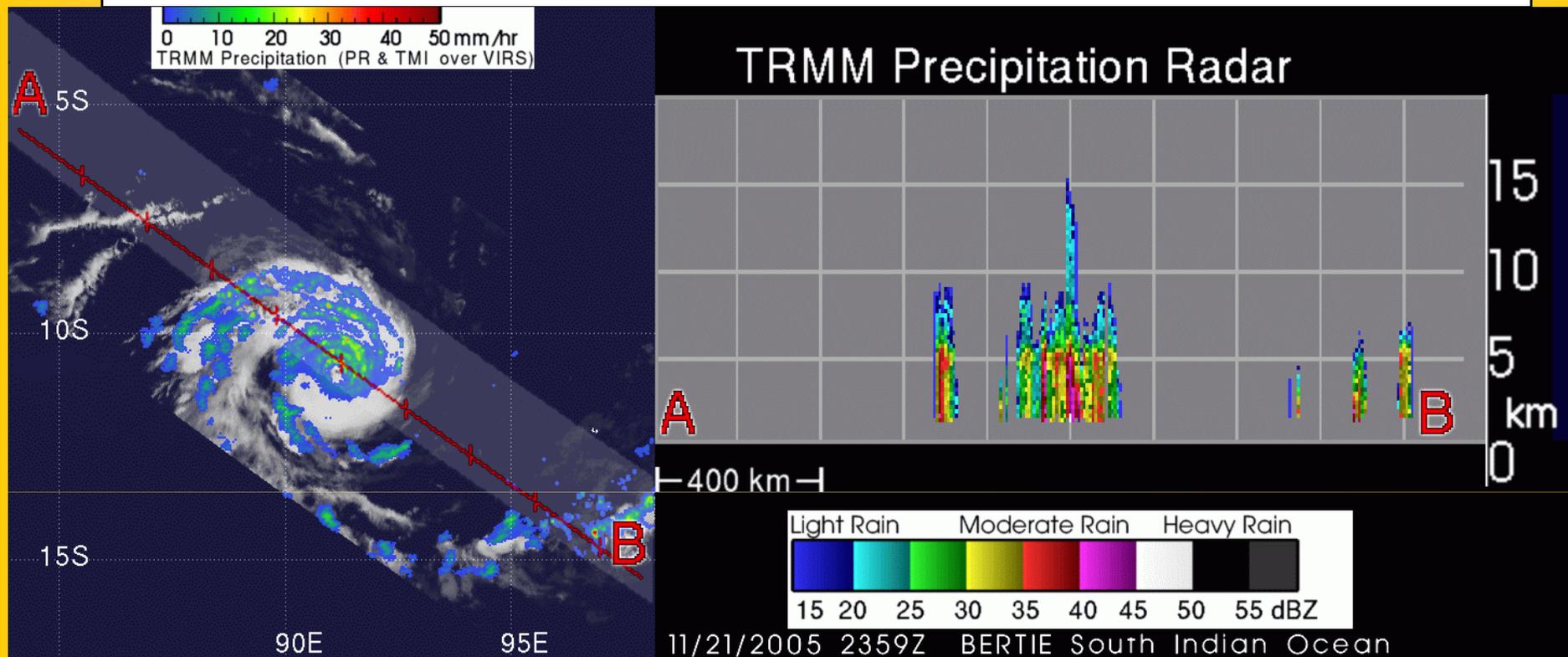
## Un lien clair entre "tours chaudes" et intensification des cyclones



**Un cyclone avec présence d'une tour chaude au voisinage du mur de l'œil a deux fois plus de chances de s'intensifier dans les 6h suivantes qu'un cyclone sans tour chaude.**

Kelley and Stout : "Convective towers in eyewalls of tropical cyclones observed by the TRMM precipitation radar in 1998-2001",  
*AMS, janvier 2004, Seattle.*

## Un lien clair entre "tours chaudes" et intensification des cyclones

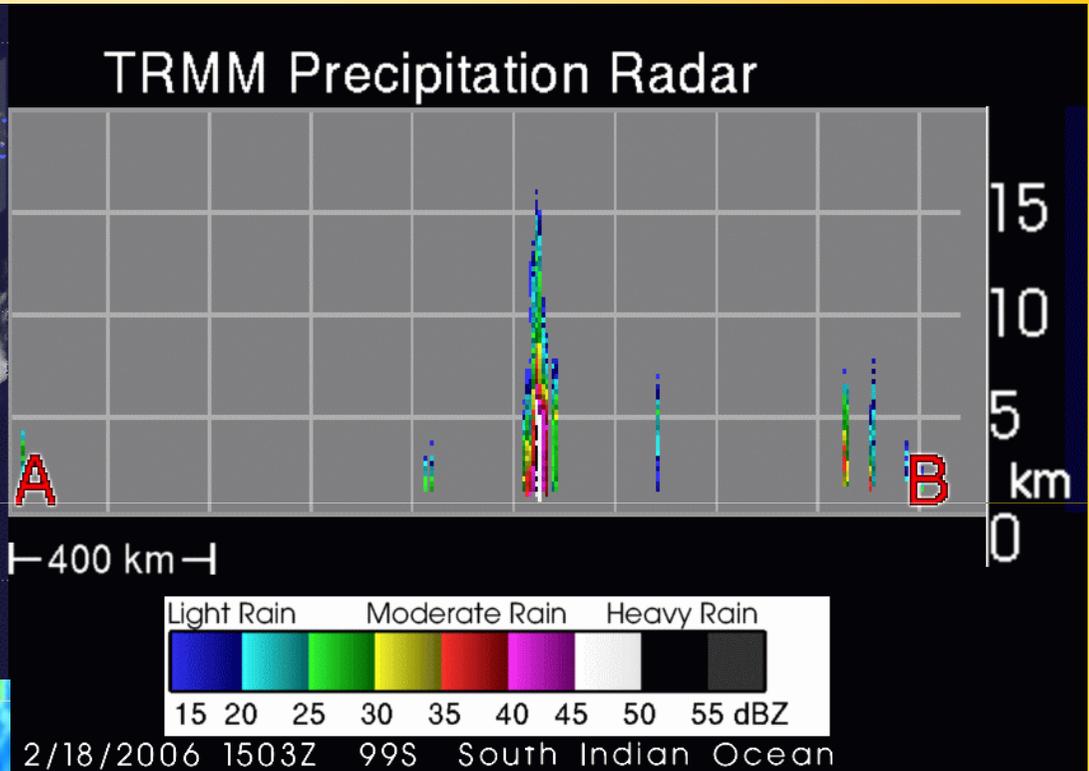
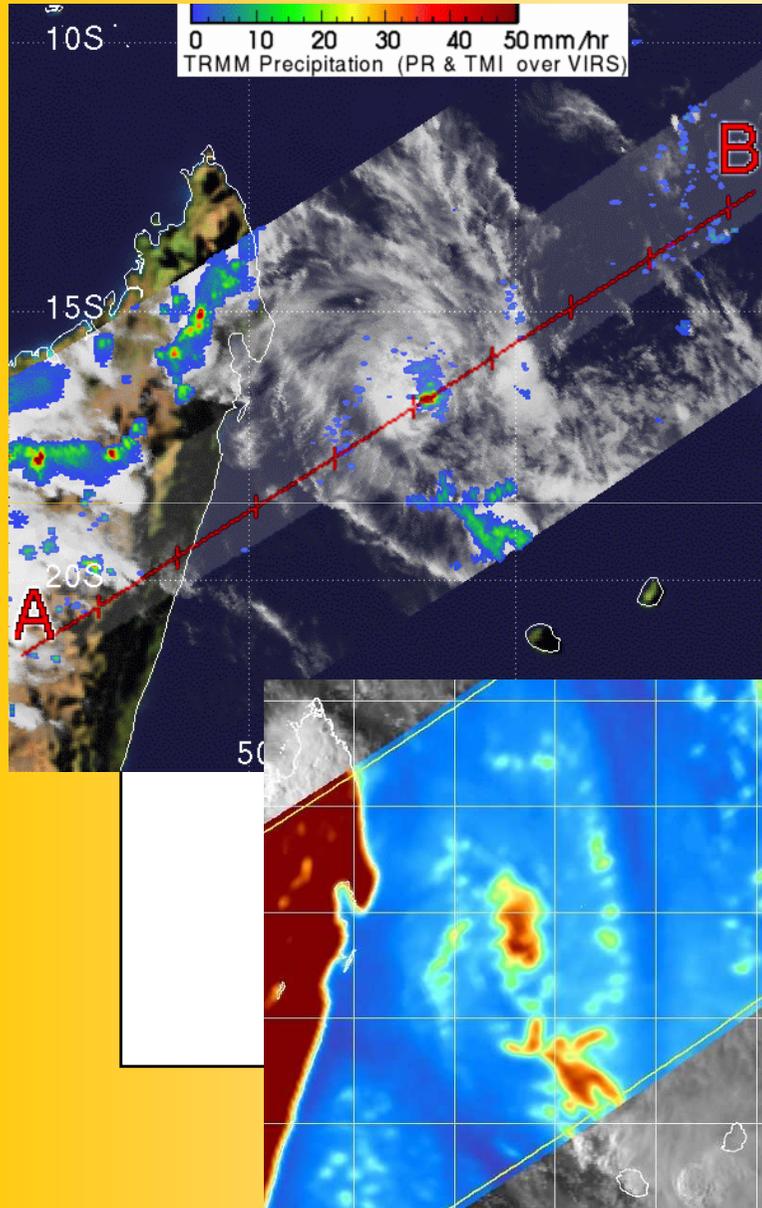


Une unique tour chaude n'indique rien en soi, mais une succession rapide de plusieurs tours chaudes suggère que quelque chose de spécial est en train de se passer au cœur du cyclone : la probabilité d'une intensification imminente devient alors très importante.

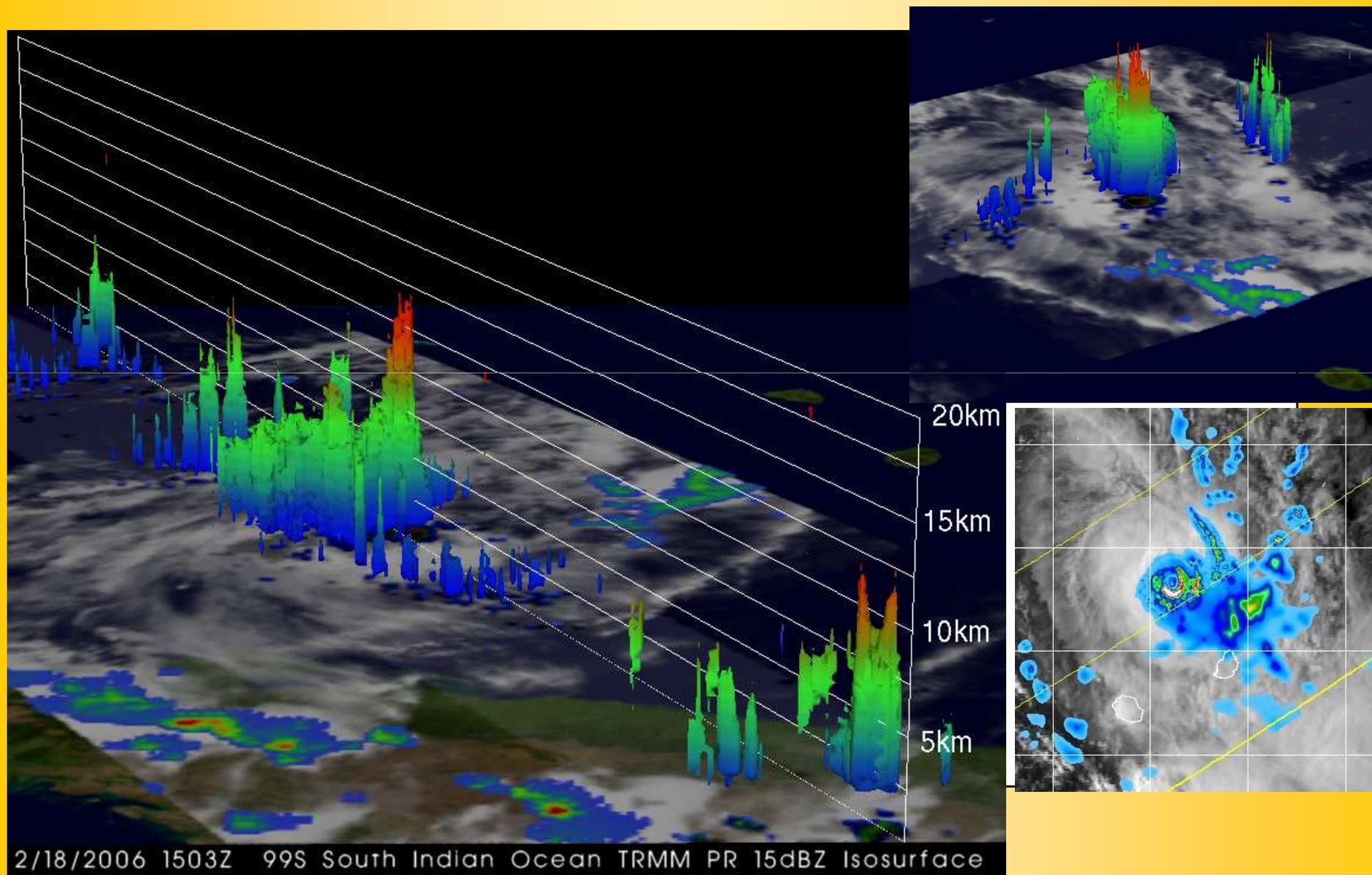
Une étude statistique a trouvé que si sur une période de 3h, des tours chaudes étaient présentes dans le mur de l'oeil durant au moins 1/3 du temps, les vents en surface associés au cyclone mature avaient 82% de chances de se renforcer. Cette probabilité d'intensification chute à 17% sinon.

Kelley, Stout, and Halverson : "Tall precipitation cells in tropical cyclone eyewalls are associated with tropical cyclone intensification". *Geophys. Res. Lett.*, Vol 31, 2004

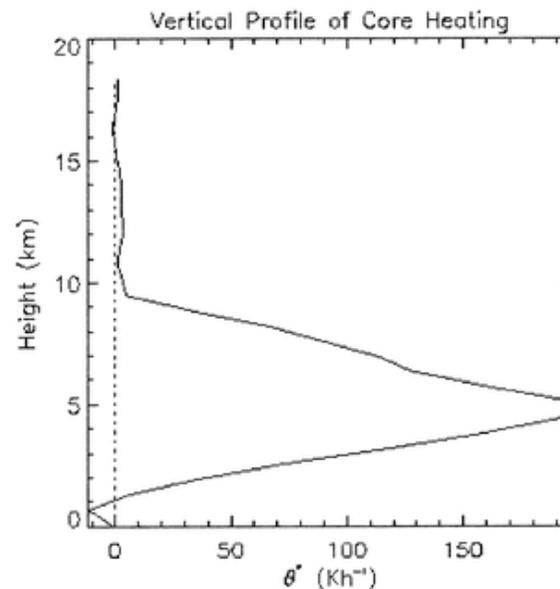
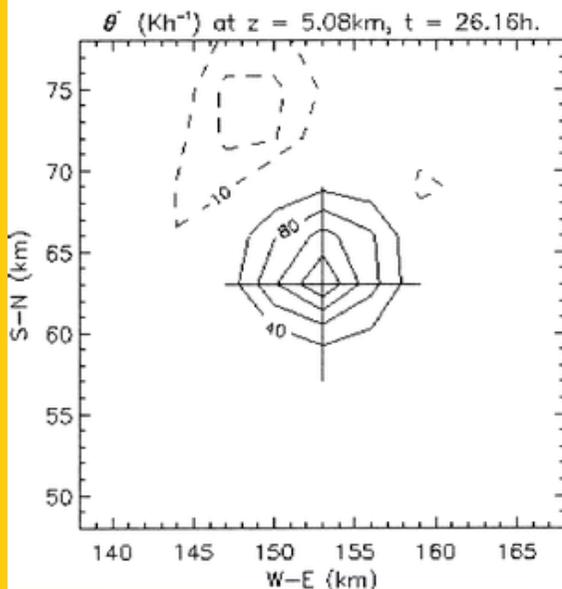
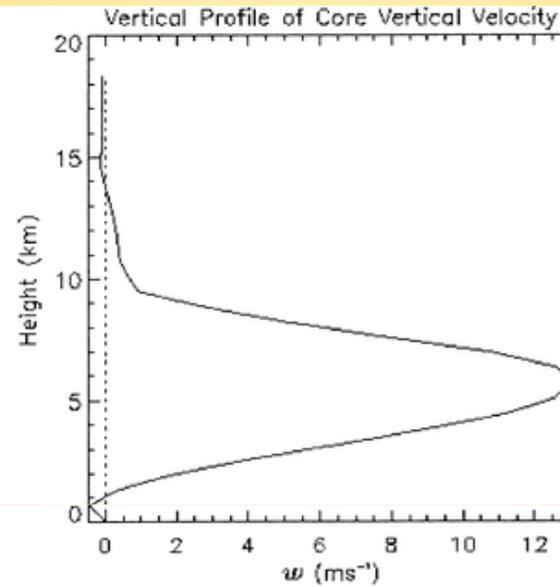
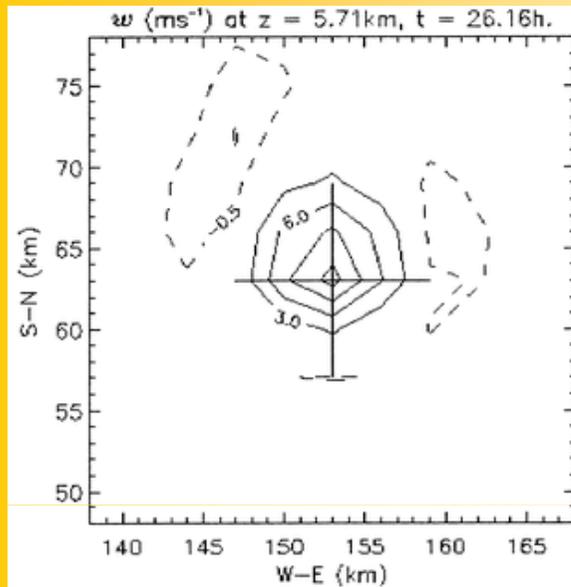
# Tour chaude lors de la pré-genèse de la tempête tropicale 09 (fév 2006)



# Tour chaude lors de la pré-genèse de la tempête tropicale 09 (fév 2006)



# La structure des "tours chaudes" vue par la simulation numérique

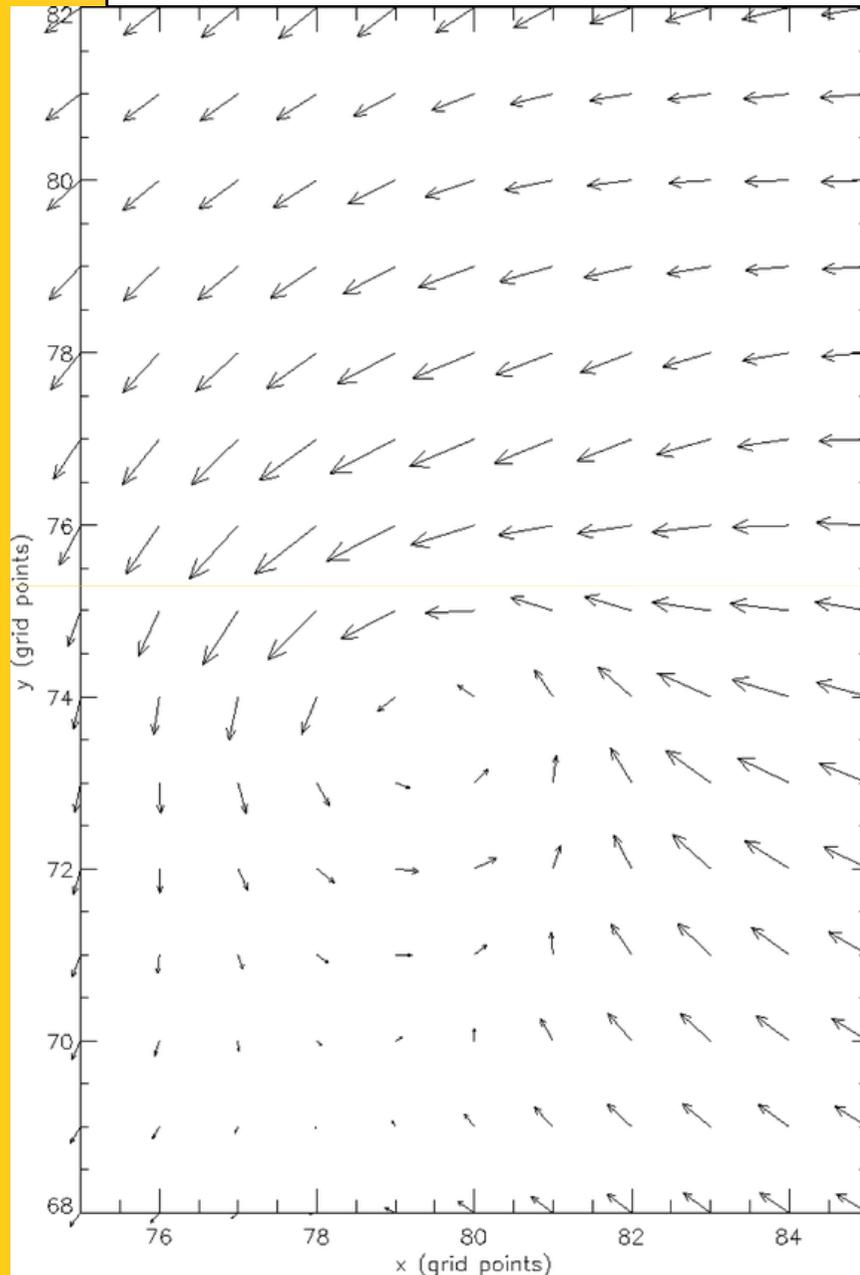


Une bonne proportion des ascendances générées dans les simulations développent des caractéristiques de type "tours chaudes" durant de brèves périodes de leur cycle de vie et ce parfois à plusieurs reprises.

- Taille caractéristique : 5 - 10 km
- Vitesse verticale :  $\approx 10$  m/s
- Taux de réchauffage diabatique max :  $\approx 150$  K/h
- Durée de vie :  $\approx 1$  h (mais occasionnellement jusqu'à 3h)

The Role of "Vortical" Hot Towers in the Formation of Tropical Cyclone Diana (1984)  
*Hendricks et al. J.A.S, Vol 61, 2004.*

## La structure des "tours chaudes" vue par la simulation numérique

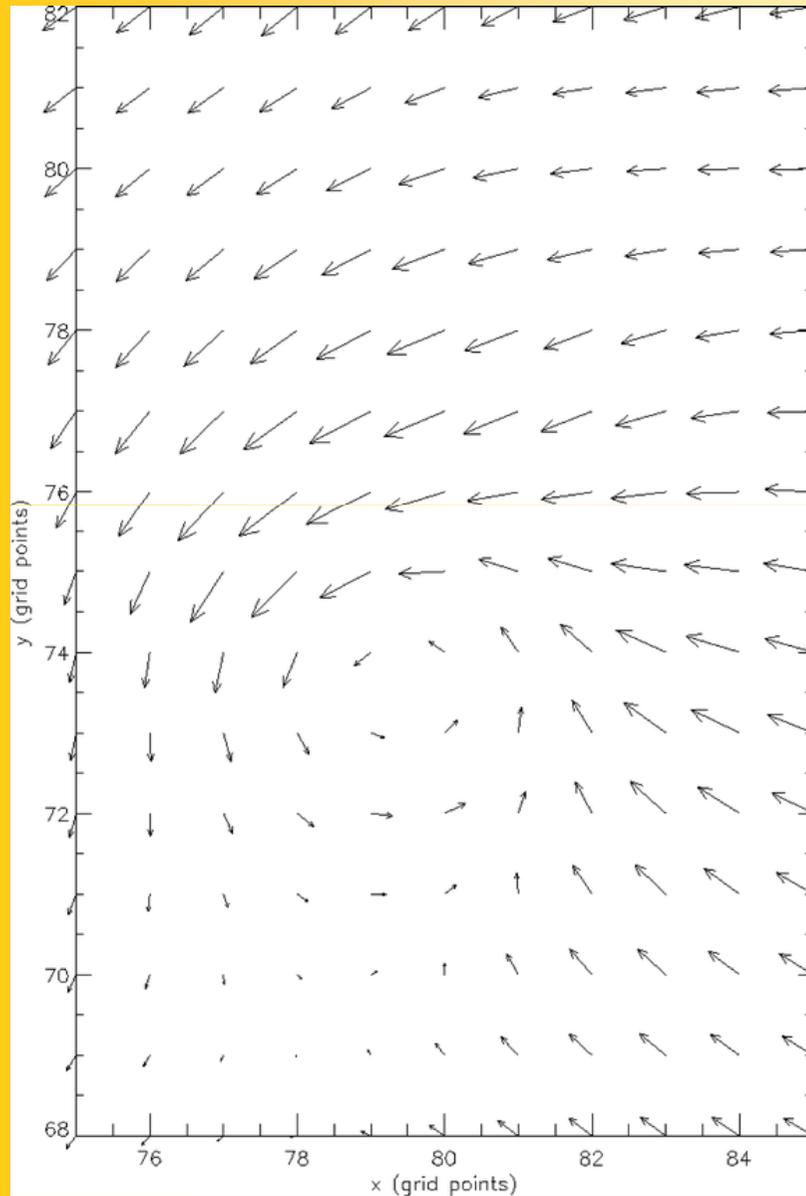


**Les "Vortical Hot Towers" (VHT) constituent le mode préférentiel d'organisation de la convection et se distinguent de la convection profonde classique tropicale par l'existence d'une forte vorticité associ e.**

Les anomalies de tourbillon cyclonique associ es aux VHT sont significativement plus importantes que la vorticité ambiante pré-existante dans l'environnement local des ascendances qui les ont g n r es (de 3   100 fois plus fortes en valeur absolue).

Champ de vent horizontal typique d'une VHT (ici vent   0.67 km d'altitude) : le mini vortex de 10-20 km d'échelle horizontale est associé   une forte circulation tangentielle (maximum de 18 m/s du côté nord et de 8 m/s du côté sud). *Hendricks et al.*

# La structure des "tours chaudes" vue par la simulation numérique



**La forte vorticité associée aux "Vortical Hot Towers" (VHT) inhibe l'entraînement latéral et rend de fait la convection plus efficace.**

L'évolution du tourbillon potentiel  $\psi$  est pilotée par le gradient vertical de réchauffage diabatique :

$$\frac{D(\text{PV})}{Dt} \approx \frac{f + \zeta \frac{\partial \theta}{\partial z}}{\rho}$$

$\approx 64 \text{ PVU/h}$

(1 PVU =  $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ )

$\approx 45 \text{ K/h/km}$   
dans la tranche  
0-5 km

From a vorticity dynamics perspective, the strong updrafts in the hot towers converge and stretch existing low-level vertical vorticity into intense small-scale vortex tubes. (*Hendricks et al.*)

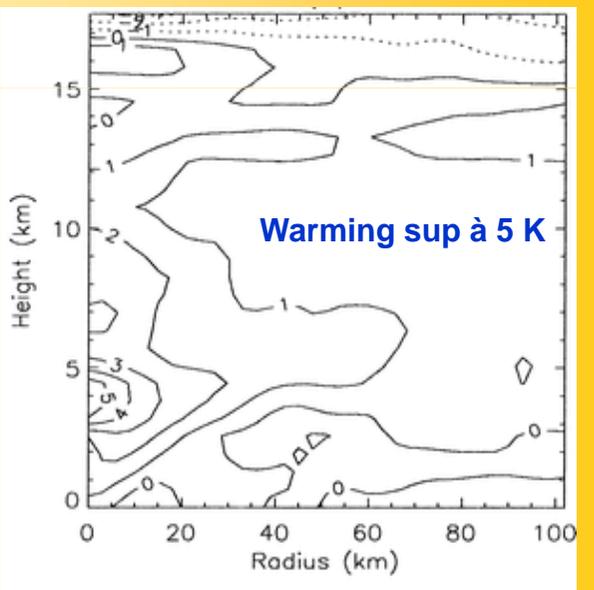
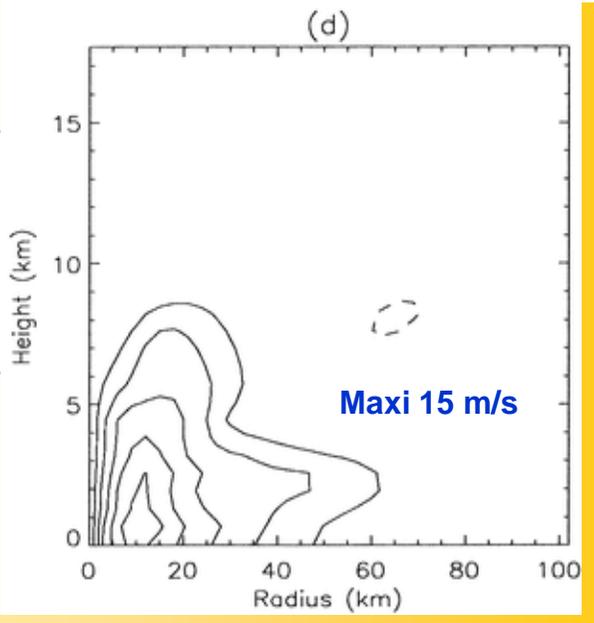
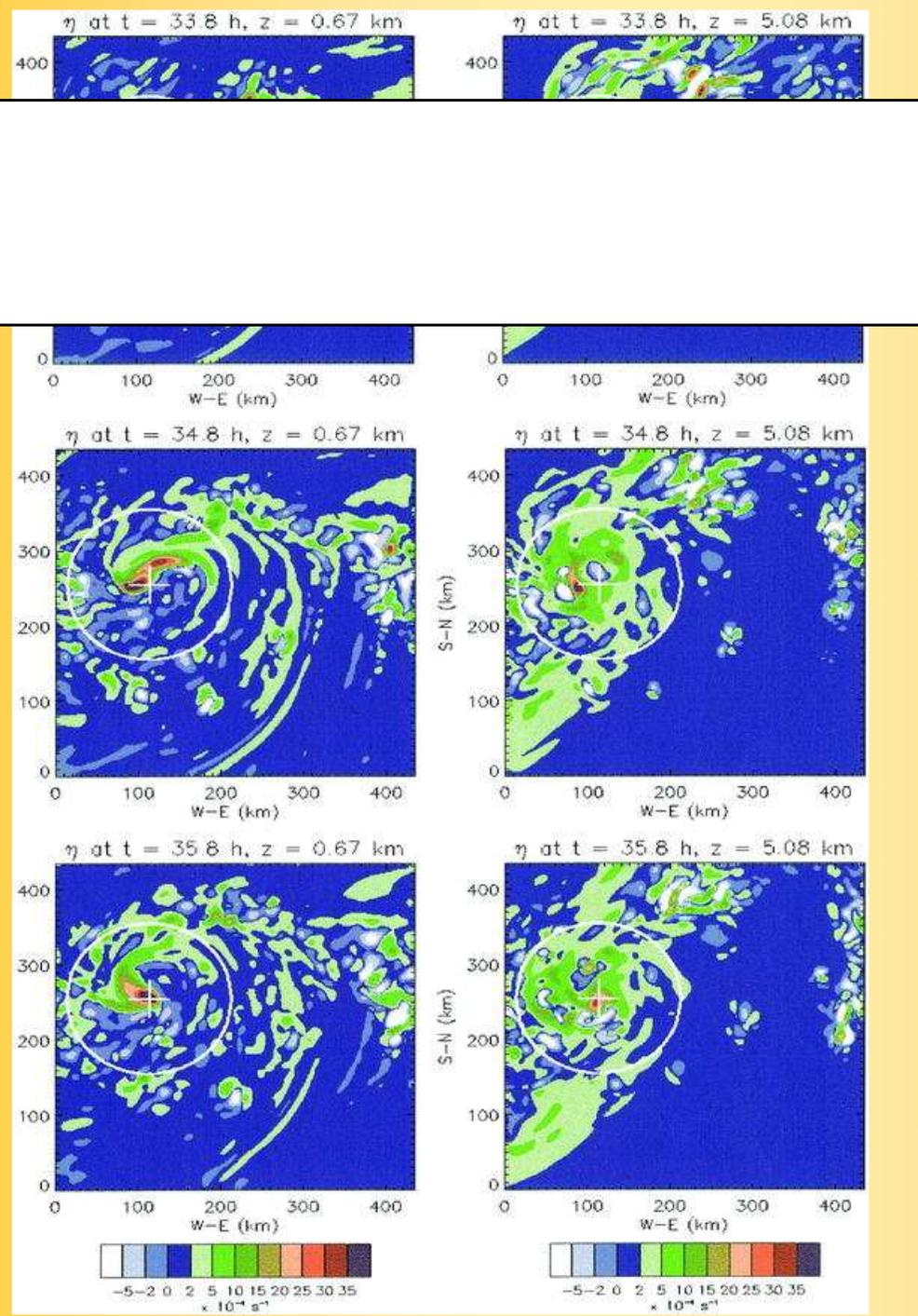
## La structure des "tours chaudes" vue par la simulation numérique

**"Vortical Hot Towers" (VHT) = cores of deep cumulonimbus convection possessing strong vertical vorticity, that arise from buoyancy-induced stretching of local absolute vertical vorticity in a vorticity-rich pre-hurricane environment \*.**

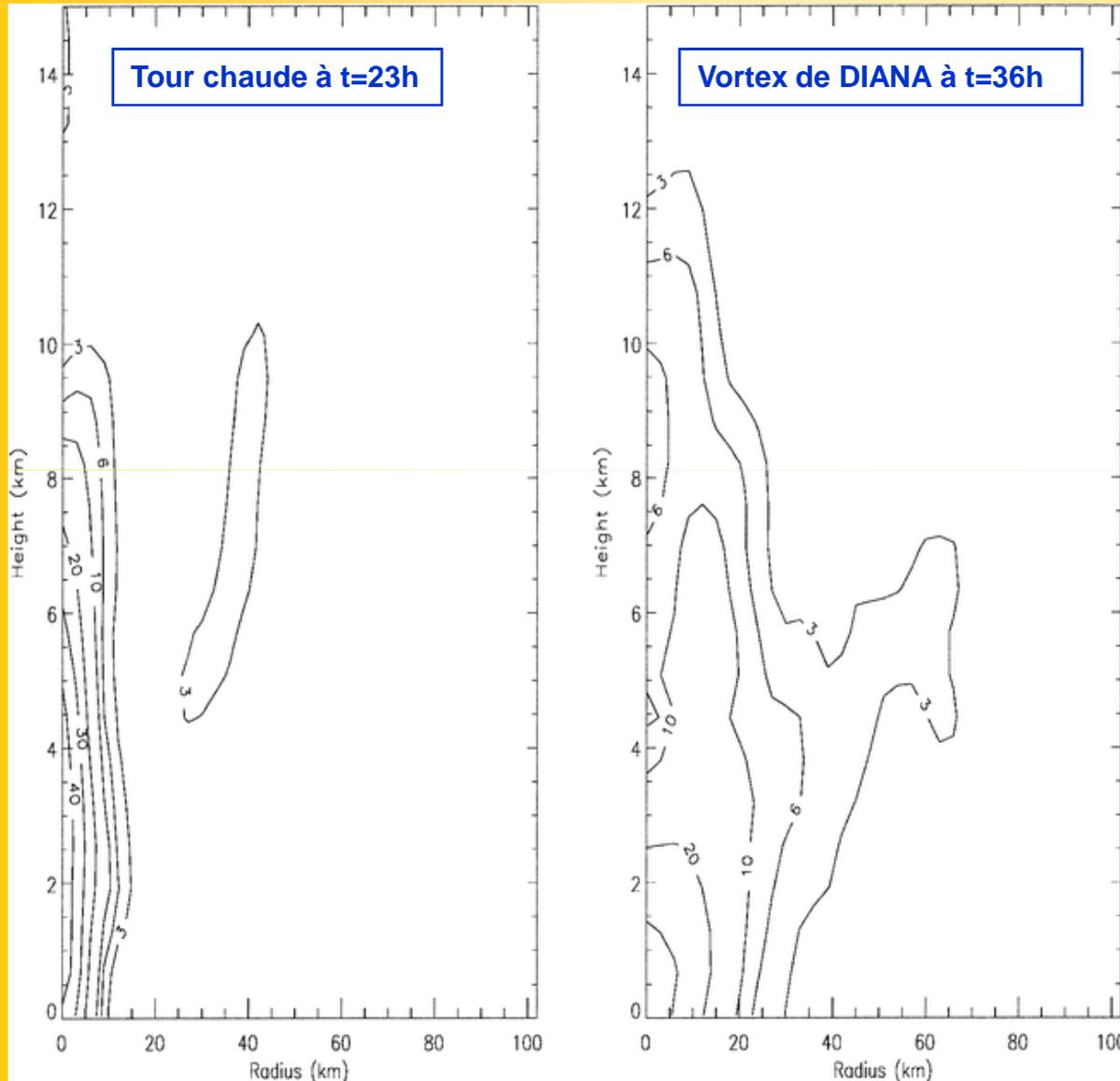
- \* un pré-requis à la formation de VHTs par les processus de convection profonde est donc que l'environnement de pré-genèse soit associé à une CAPE suffisante et à l'existence d'un tourbillon relatif cyclonique déjà significatif dans les basses couches.



Évolution du champ de tourbillon absolu, montrant la fusion de deux tubes de vorticit   aboutissant    la gen  se de DIANA.



# Le nouveau paradigme de la cyclogenèse par les "tours chaudes".



Moyennes azimuthales du tourbillon relatif (unité :  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ )

Le processus évolutif en deux étapes évoqué précédemment (qui s'est opéré en conjonction avec une convergence de moment angulaire relatif en basses couches – produit par le chauffage diabatique de l'ensemble des tours chaudes), permet de faire grossir en cascade le tourbillon vertical, de l'échelle de la tour chaude jusqu'à celle de la dépression tropicale.

**Cyclogenesis through an upscale growth mechanism where small-scale vortical hot towers are the building blocks.**

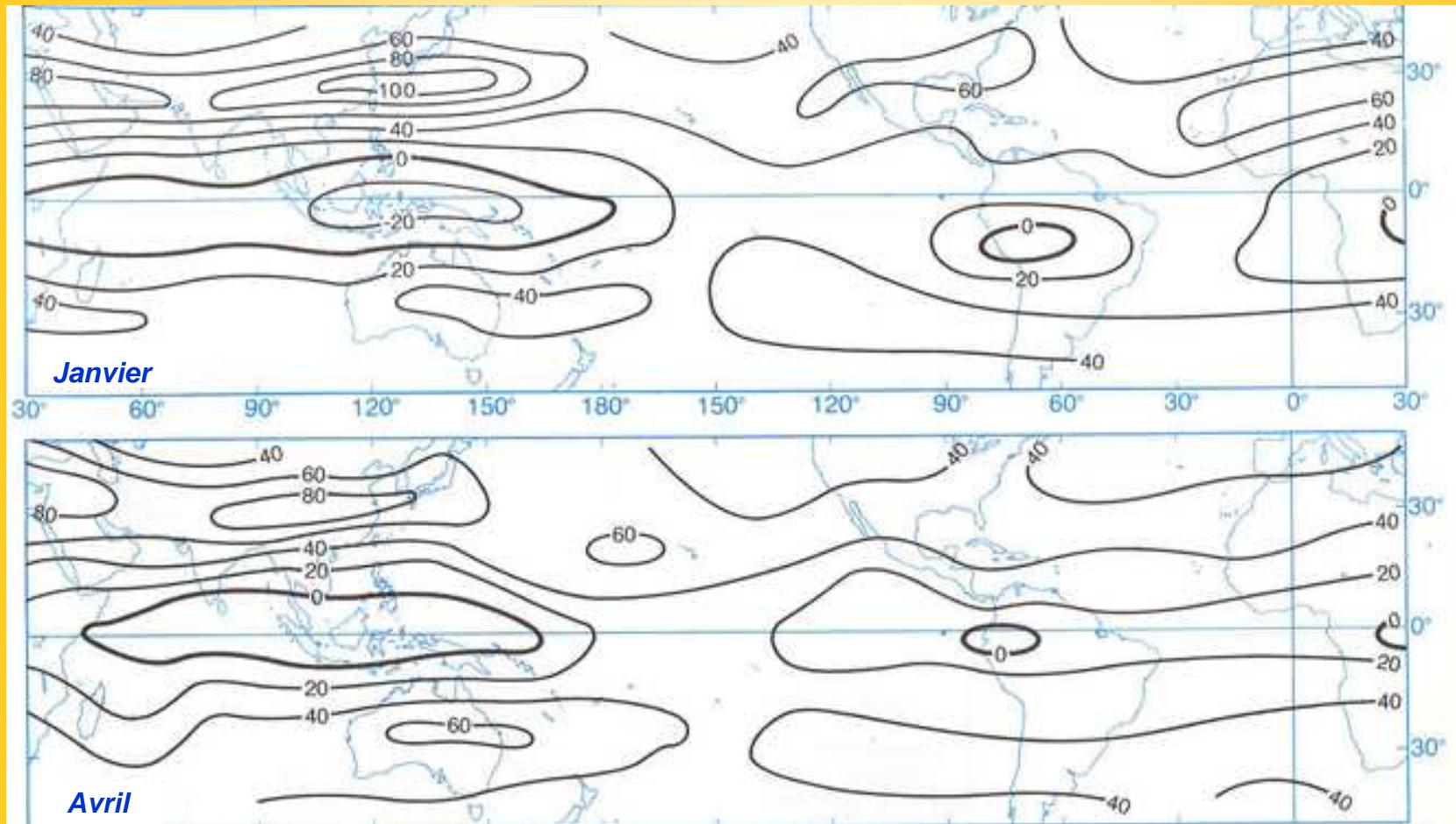
## La cyclogenèse par les "tours chaudes"

**Montgomery et al. dans "A Vortical Hot Tower route to Tropical Cyclogenesis" (J.A.S., Vol 63, Janvier 2006 ), se sont intéressés à la formation d'une dépression à cœur chaud à partir d'un MCV et ont retrouvé des résultats similaires, montrant que les VHTs y jouent un rôle primordial, fabriquant ainsi en un délai réaliste de 1 à 2 jours une dépression tropicale.**

MCV can undergo a metamorphosis to a tropical depression vortex on meteorologically realistic (order 1–2 days) time scales.

The metamorphosis is demonstrated to occur in association with the generation of intense VHTs within the cyclonic vorticity-rich environment of the initial MCV, mid-to-upper-level moistening by the VHTs, diabatic mergers between VHTs, and the near-surface and mid- to upper-level inflow on the system scale that is induced by the ensemble of VHTs.

The initial MCV provides an environment rich in horizontal and vertical vorticity. As the first updraft forms, it tilts ambient horizontal vorticity into the vertical while at the same time stretching MCV-generated vertical vorticity. As the updraft intensifies to become a hot tower, both ambient and tilting-generated vertical vorticity is stretched even more, leading to a strong convectively generated vertical vorticity anomaly. At later times in the simulation(s) the convergence/stretching of near surface ( $0 < z < 2$  km) vorticity by the convective plumes dominates the generation of vorticity by tilting processes.

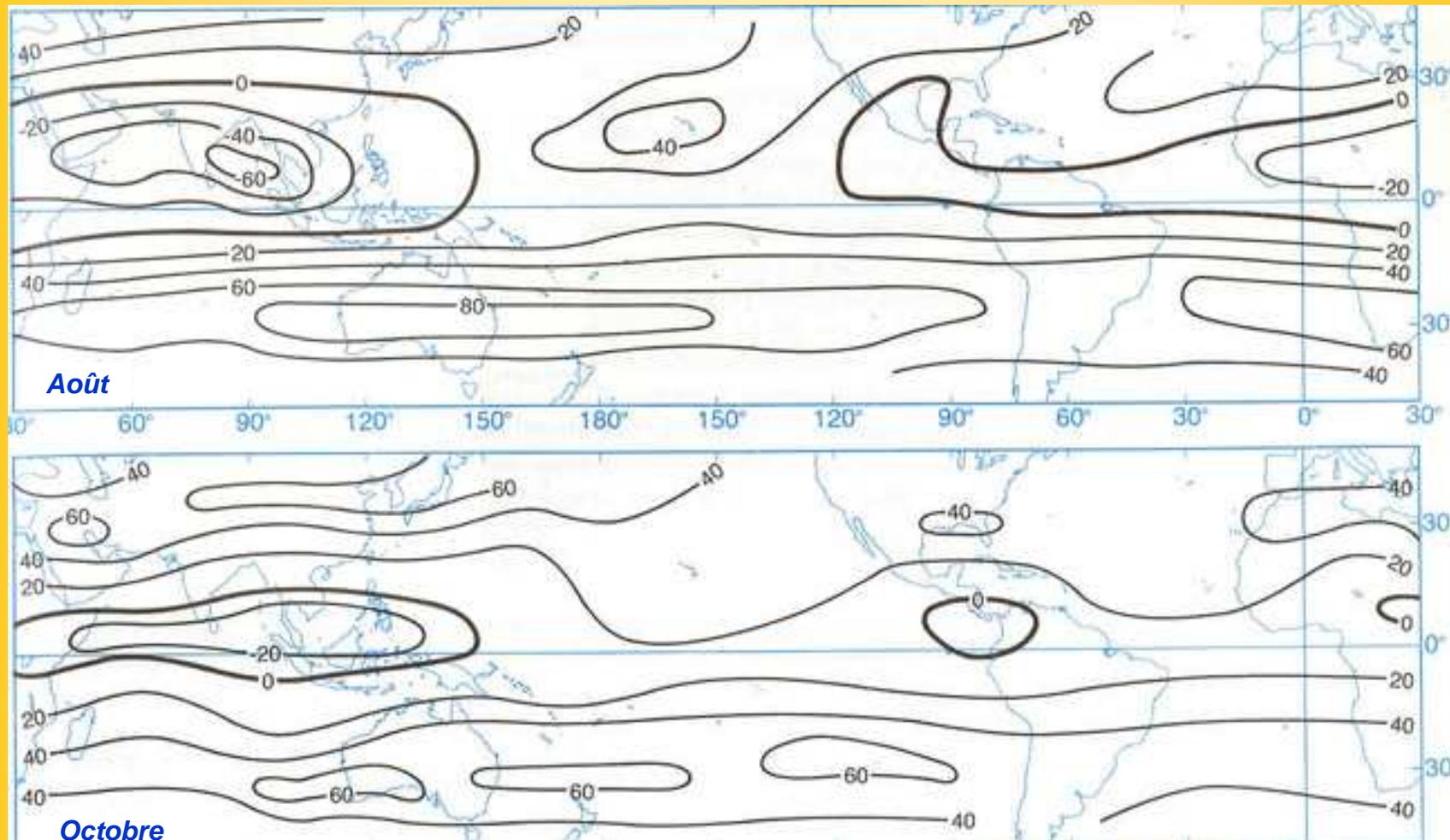


**Cartes moyennes du cisaillement troposphérique du vent zonal**

$$\Delta U = U_{200} - U_{850}$$

Unité = kt

**Mean vertical wind shear of the zonal wind (January and April).**



**Cartes moyennes du cisaillement troposphérique du vent zonal**

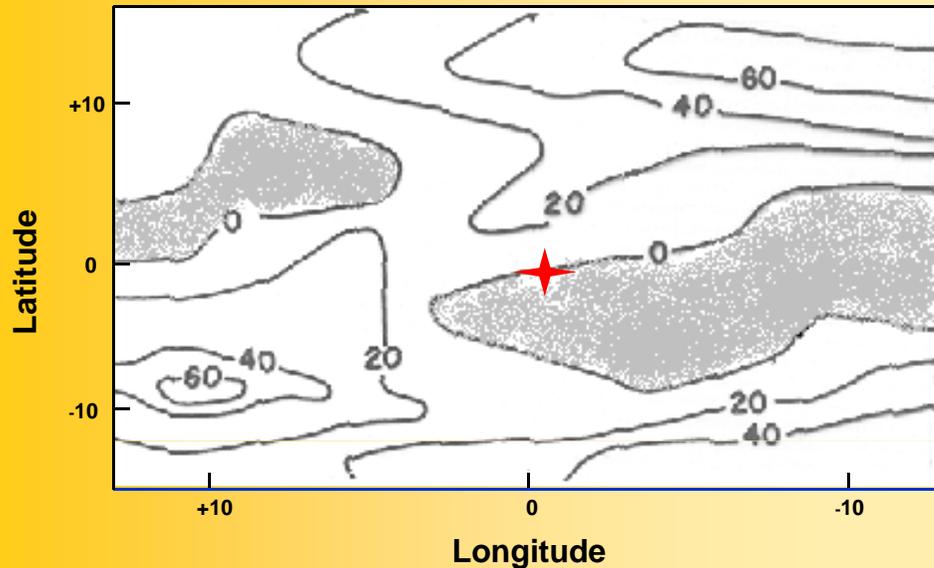
$$\Delta U = U_{200} - U_{850}$$

Unité = kt

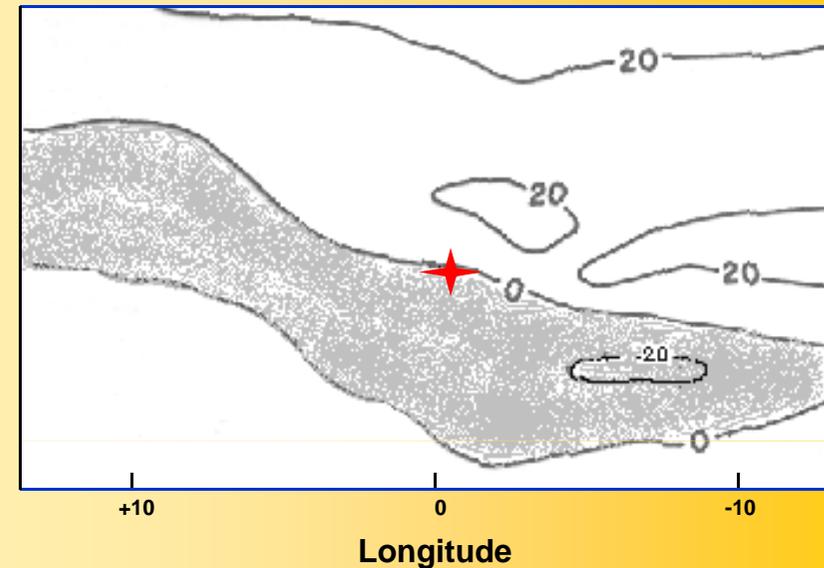
**Mean vertical wind shear of the zonal wind (August and October).**

## Cisaillement vertical du vent zonal entre 200 et 900 hPa observé pour 2 systèmes du bassin Atlantique, lors de la saison cyclonique 1975.

*AMY (26/06/1975)*



*BLANCHE (24/07/1975)*



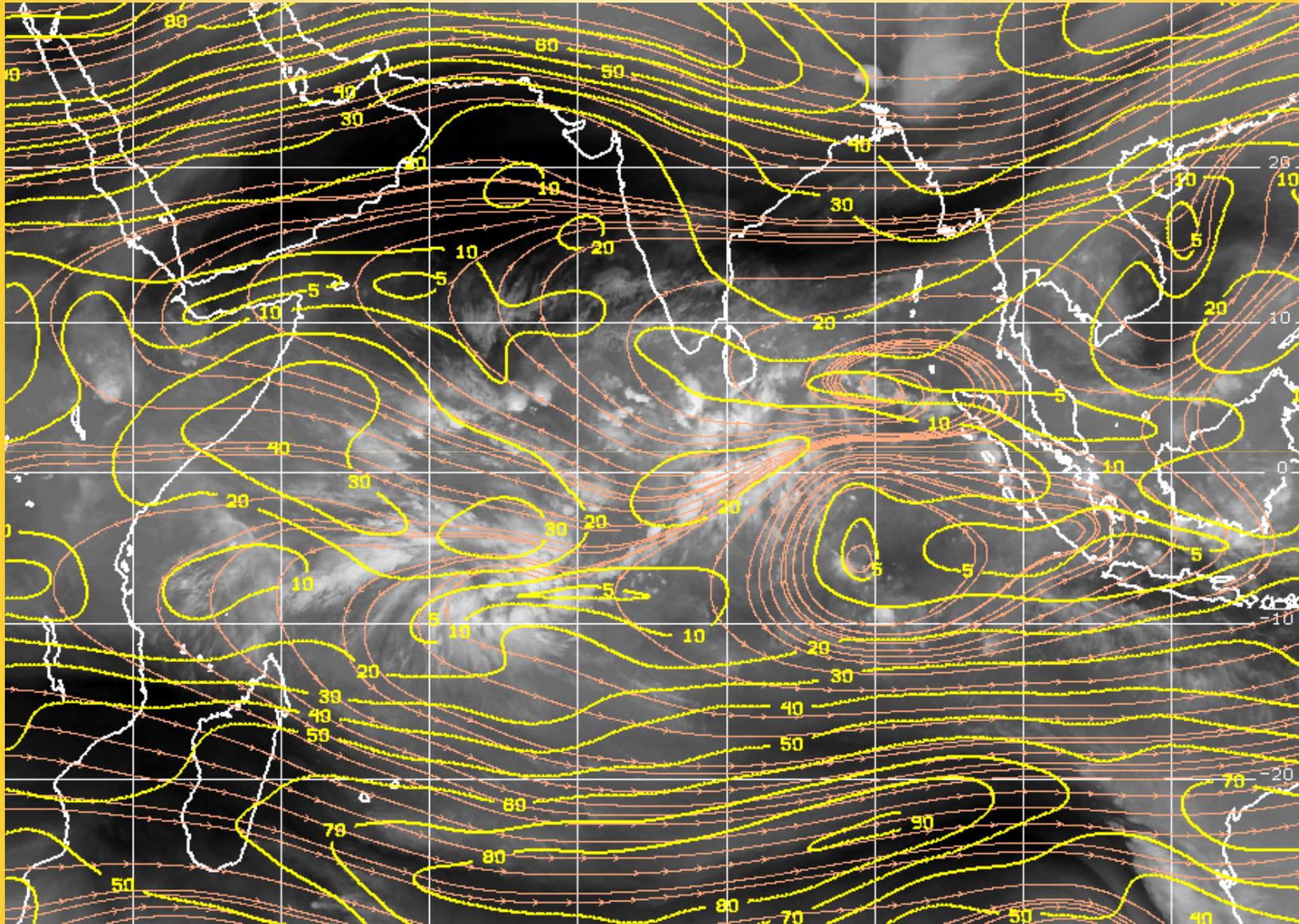
**Perturbations initiales des futures AMY et BLANCHE, 60 h avant leur formation.**

Les régions de cisaillement d'Est sont en grisé. Les systèmes de coordonnées sont centrés sur les positions des perturbations (repérées par les croix). Cisaillement vertical du vent zonal en nœuds.

**Vertical shear of the zonal wind (kt) between 200 hPa and approximately 900hPa for pre-tropical cyclone disturbances in the Atlantic Ocean.**

Maps are 60h prior to formation of AMY and BLANCHE during 1975. Easterly wind shear regions are shaded and storm positions are indicated by crosses at the origin of coordinate system.

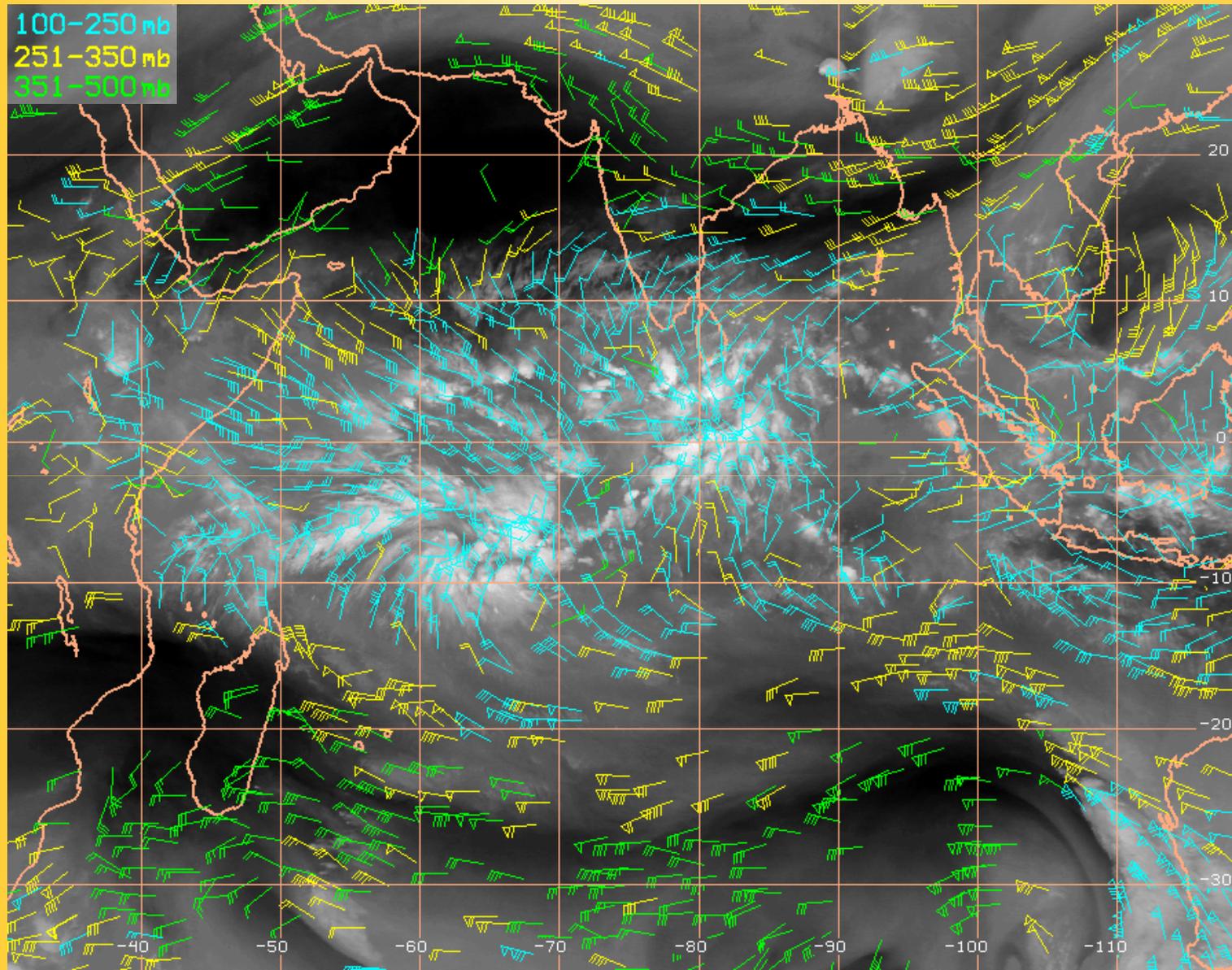
## Cisaillement de vent et cyclogenèse



Pre-genèse de Kesiny (02/05/2002 à 03 UTC).

Vertical wind shear and cyclogenesis

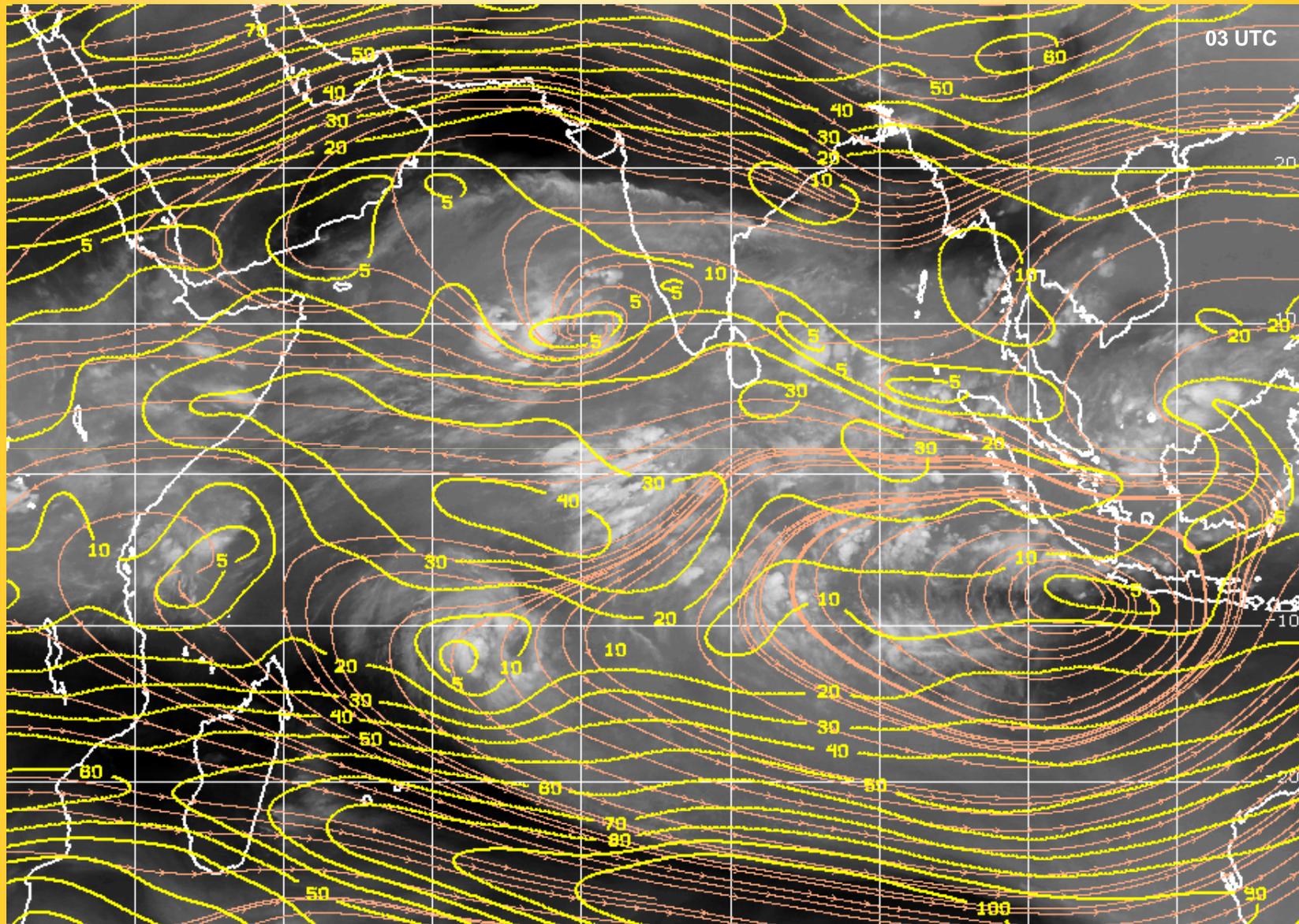
## Cisaillement de vent et cyclogenèse



Pre-genèse de Kesiny (02/05/2002 à 03 UTC).

Vertical wind shear and cyclogenesis

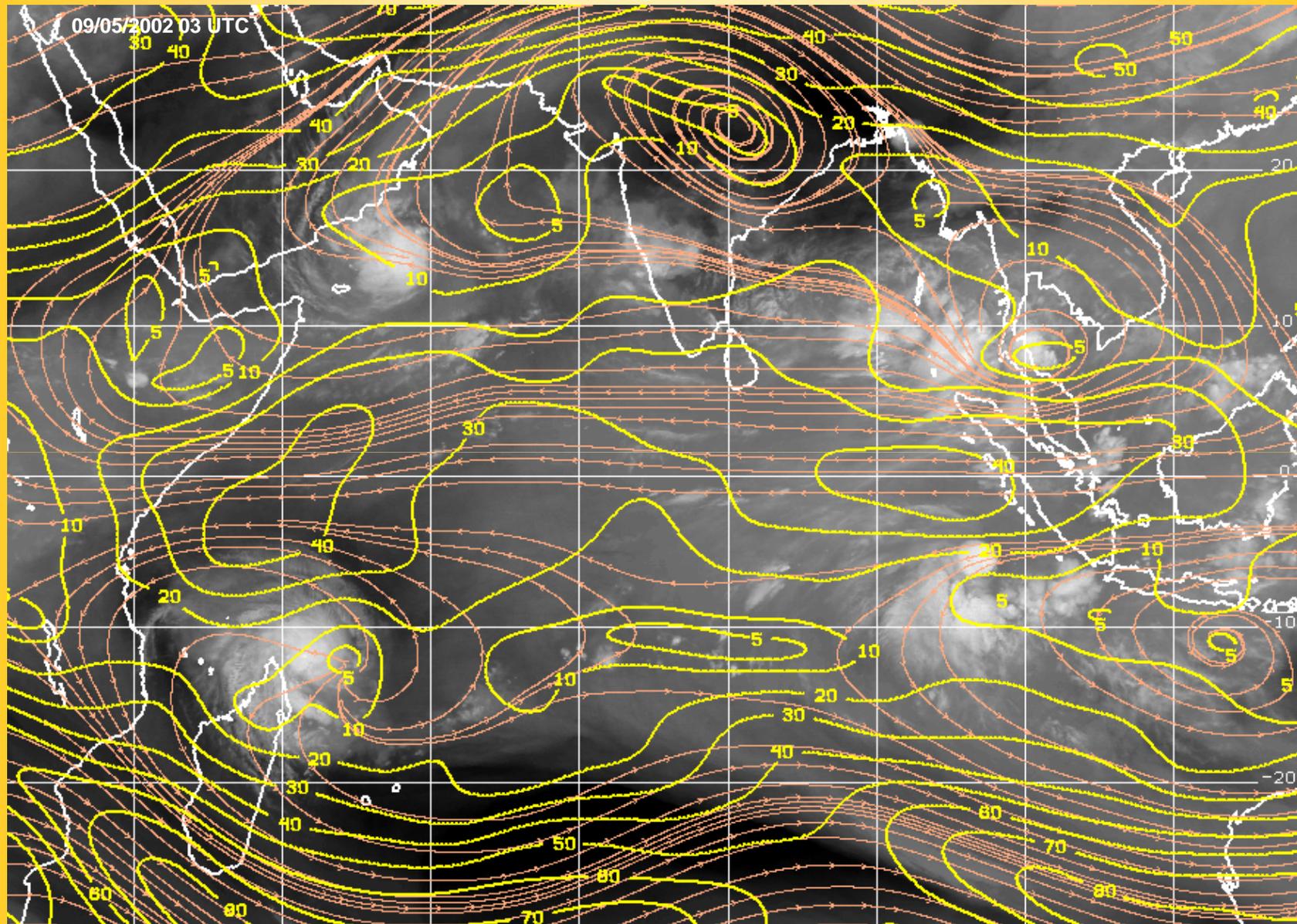
## Cisaillement de vent et cyclogenèse



Kesiny 3.0 et pre-genese mer d'Arabie (05/05/2002).

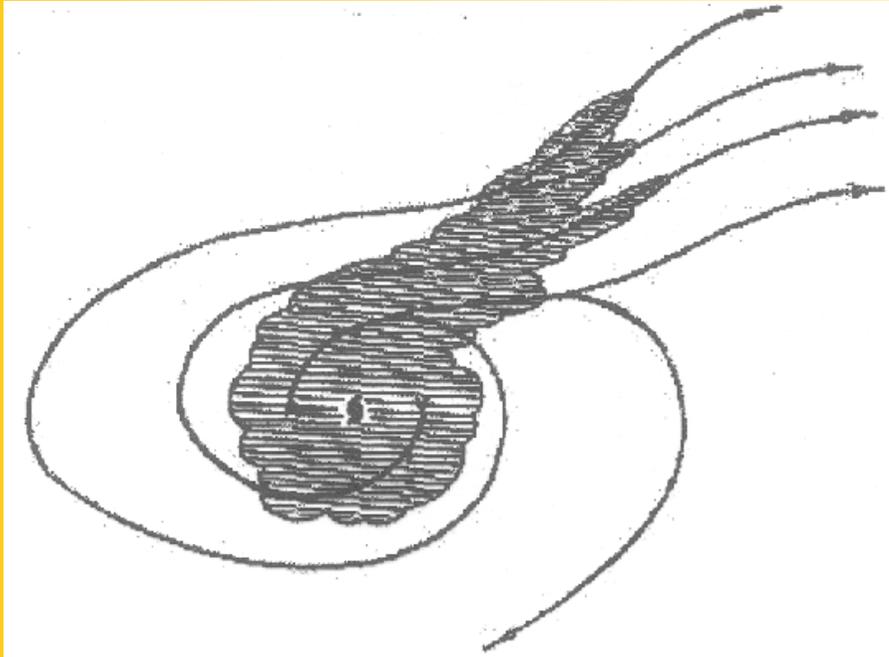
Vertical wind shear and cyclogenesis

## Cisaillement de vent et cyclogenèse



Kesiny 4.0 et jumeau mer d'Arabie + pre-gense Errol

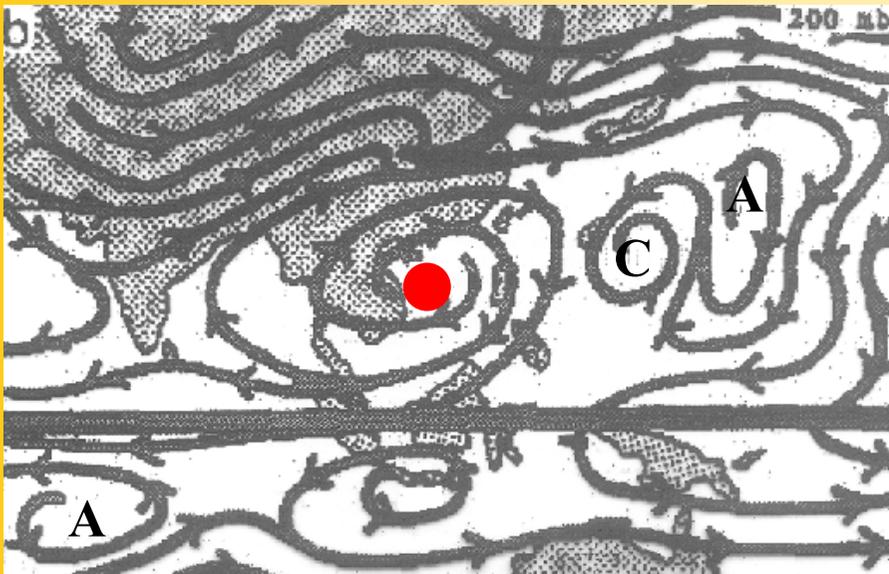
Vertical wind shear and cyclogenesis



## La divergence d'altitude (1) Single-channel poleward outflow

Schéma idéalisé d'un flux sortant d'altitude associé à un seul canal d'évacuation côté polaire, avec le centre anticyclonique d'altitude (200 hPa) directement positionné au dessus du centre du cyclone.

Idealized sketch of a single 200 mb poleward outflow channel with the 200 mb anticyclone centre located directly over the cyclone centre, like for tropical storm NANCY (18 Sept 1979).



Lignes de flux à 200 hPa le 18 sept 1979 pour la tempête tropicale NANCY qui présentait alors ce type de structure.

E

## La divergence d'altitude (2) Single-channel equatorward outflow

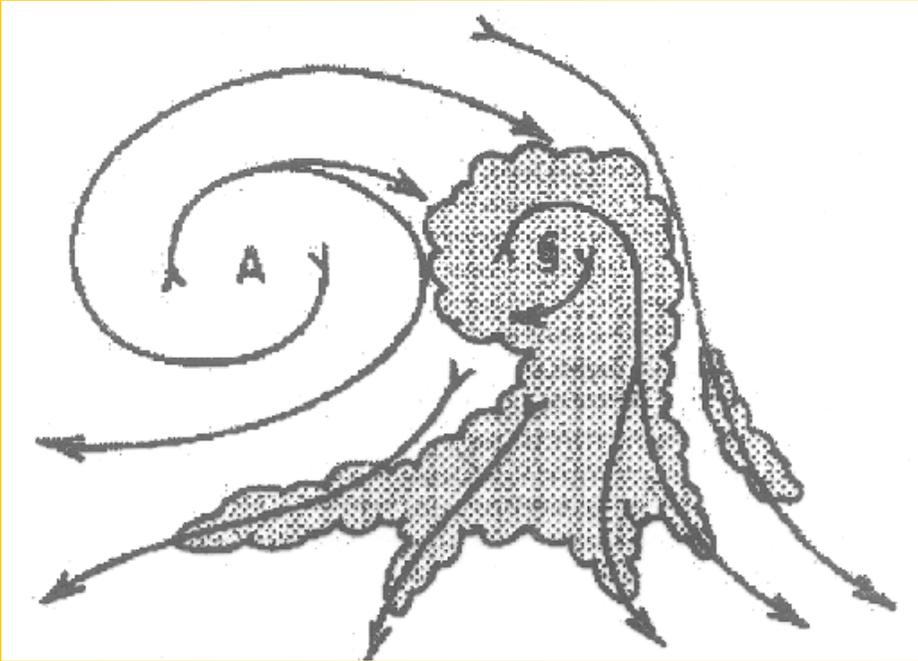
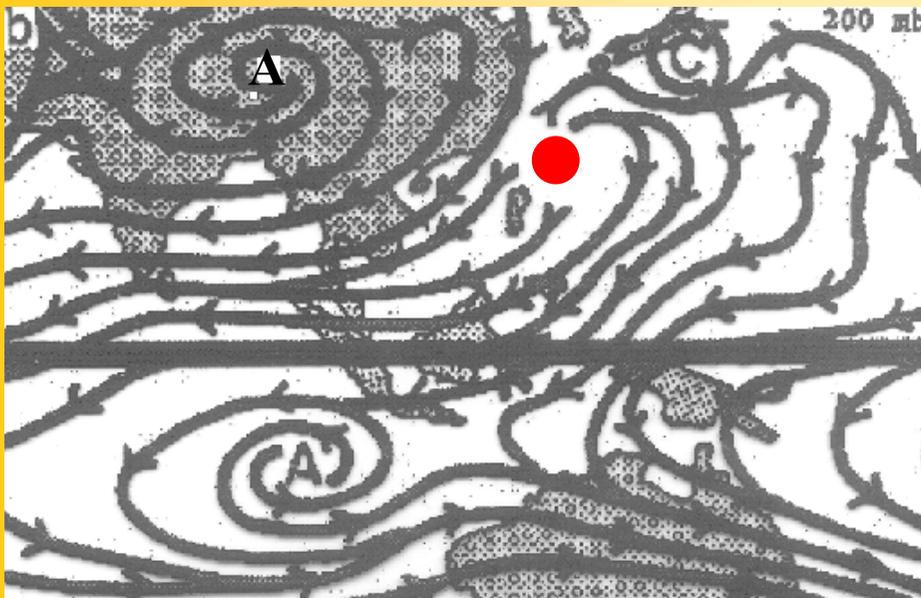


Schéma idéalisé d'un flux sortant d'altitude associé à un seul canal d'évacuation vers l'équateur, pour un centre de la dépression situé dans l'Est du centre anticyclonique d'altitude.

Idealized sketch of a single equatorward outflow channel for a cyclone centre to the east of the 200 hPa anticyclone centre.



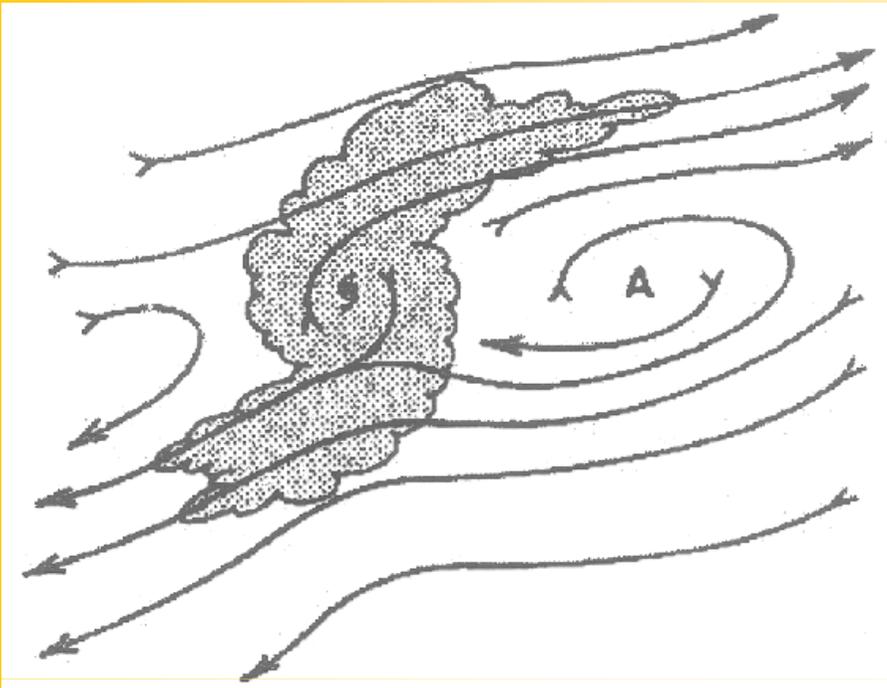
Lignes de flux à 200 hPa le 13 août 1979 pour le Typhon IRVING, présentant alors cette configuration.

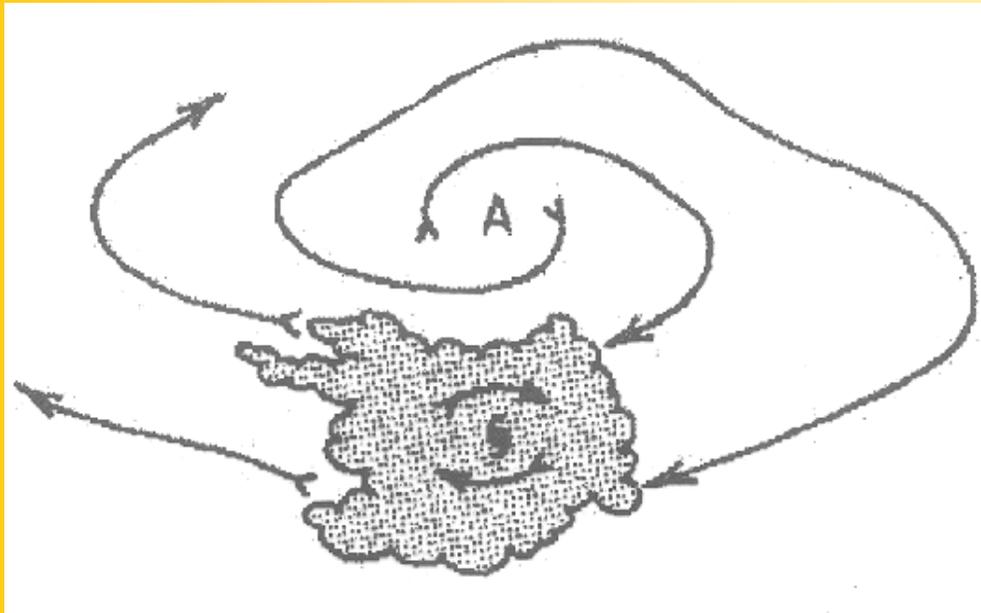
### La divergence d'altitude (3) Dual-channel outflow

Schéma idéalisé d'un flux sortant d'altitude présentant deux canaux d'évacuation, avec le centre du cyclone positionné à l'Ouest du centre anticyclonique d'altitude.

Idealized sketch of a dual outflow channel with the cyclone centre to the west of the anticyclone centre.

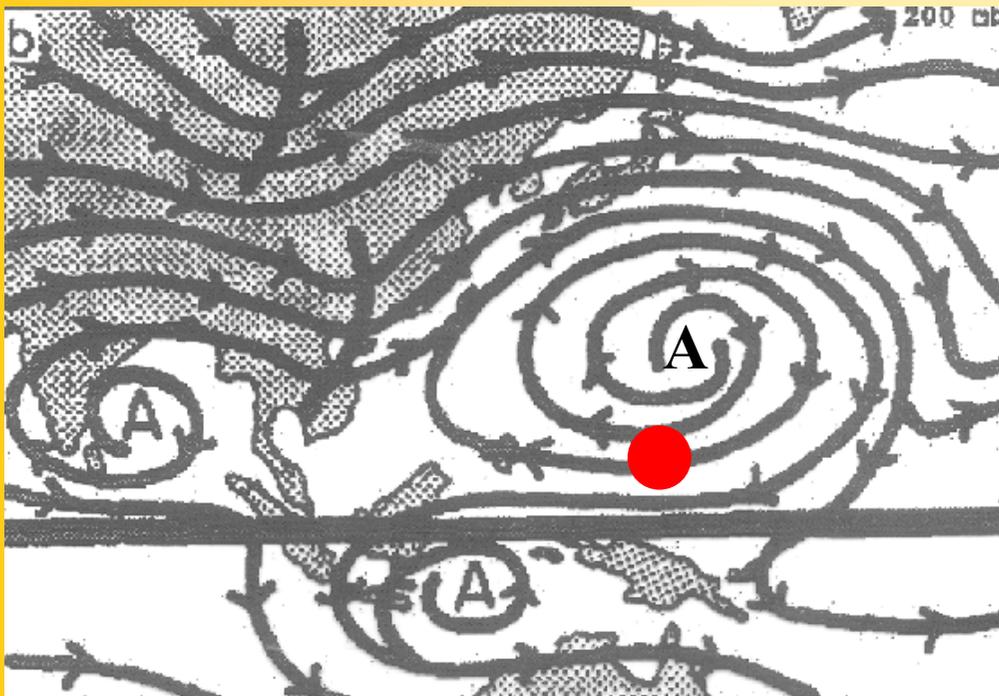
Lignes de flux à 200 hPa le 16 septembre 1979 pour le futur ouragan HENRI, qui présentait alors ce type de configuration.





## La divergence d'altitude (4) No outflow channel

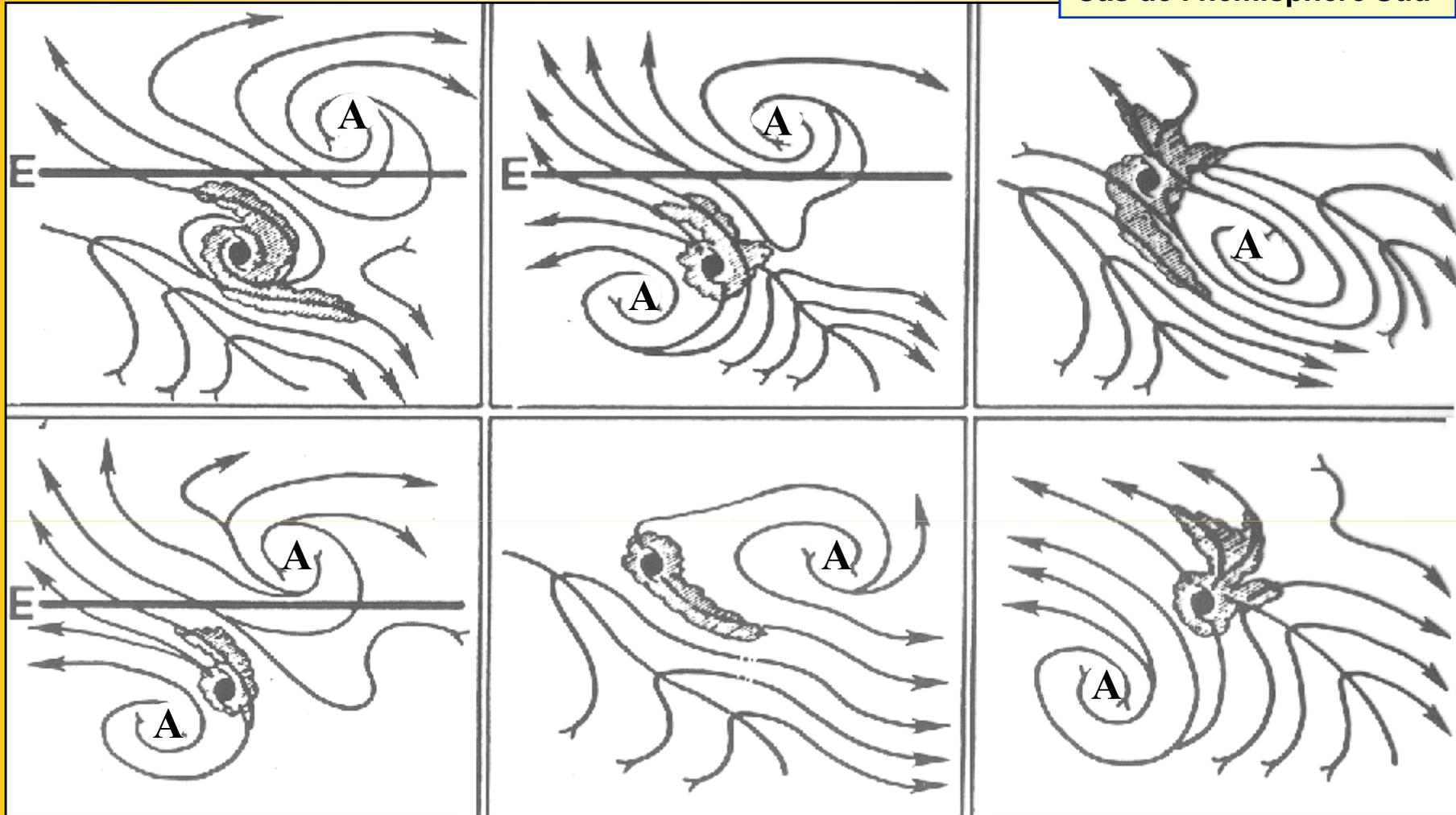
Schéma idéalisé d'un flux sortant d'altitude présentant un canal d'évacuation limité avec le centre du cyclone positionné dans le Sud de l'anticyclone d'altitude.



Idealized sketch with little outflow channel and with the cyclone centre south of the 200 hPa anticyclone.

Lignes de flux à 200 hPa le 3 novembre 1979 pour le typhon VERA, qui présentait alors ce type de configuration.

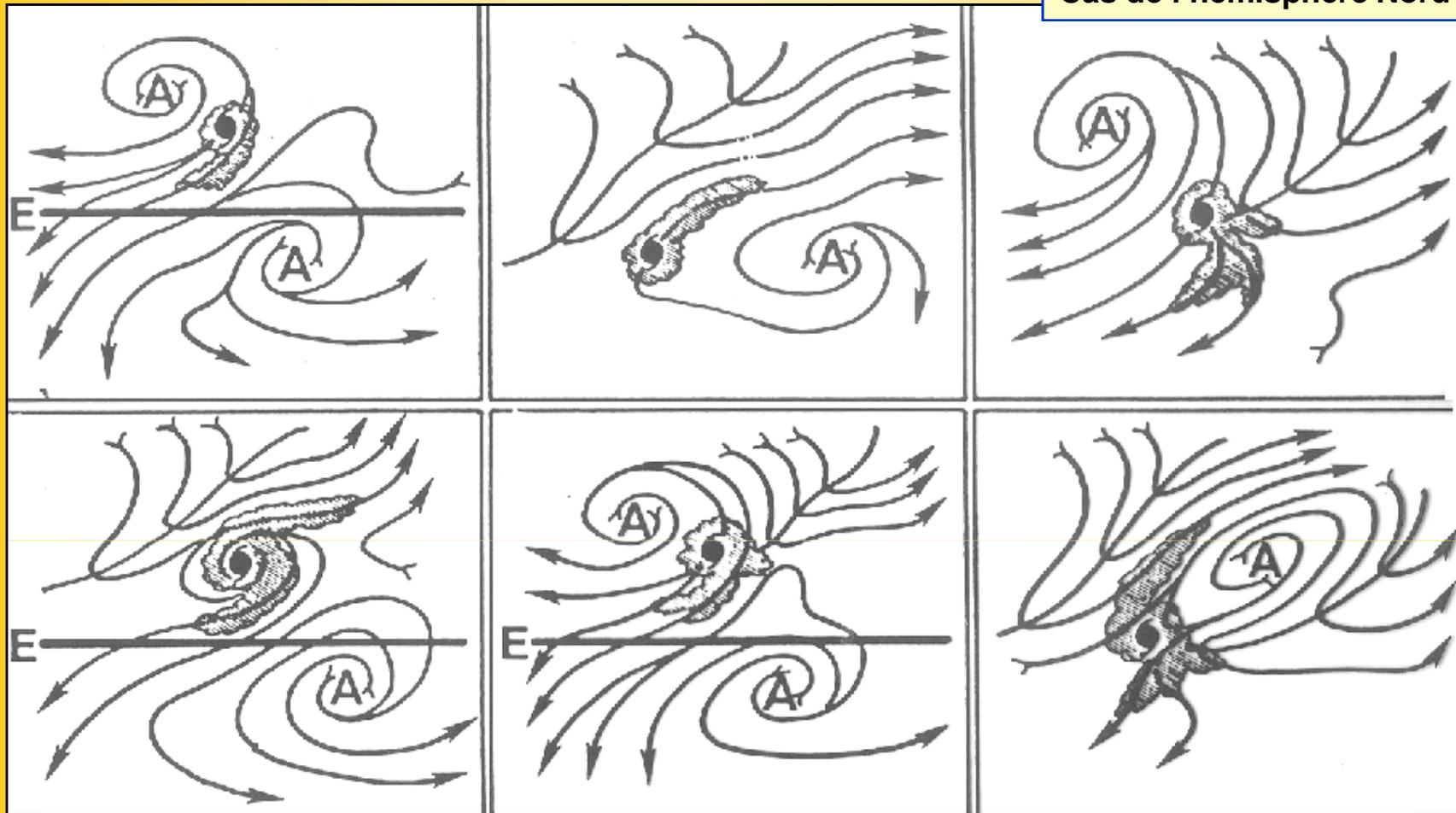
Cas de l'hémisphère Sud



Six situations types d'interaction entre la circulation divergente d'altitude d'un système dépressionnaire tropical et la circulation synoptique environnante.

Six types of upper-level interaction between a tropical cyclone (dark centre) and the surrounding circulations (southern hemisphere).

Cas de l'hémisphère Nord

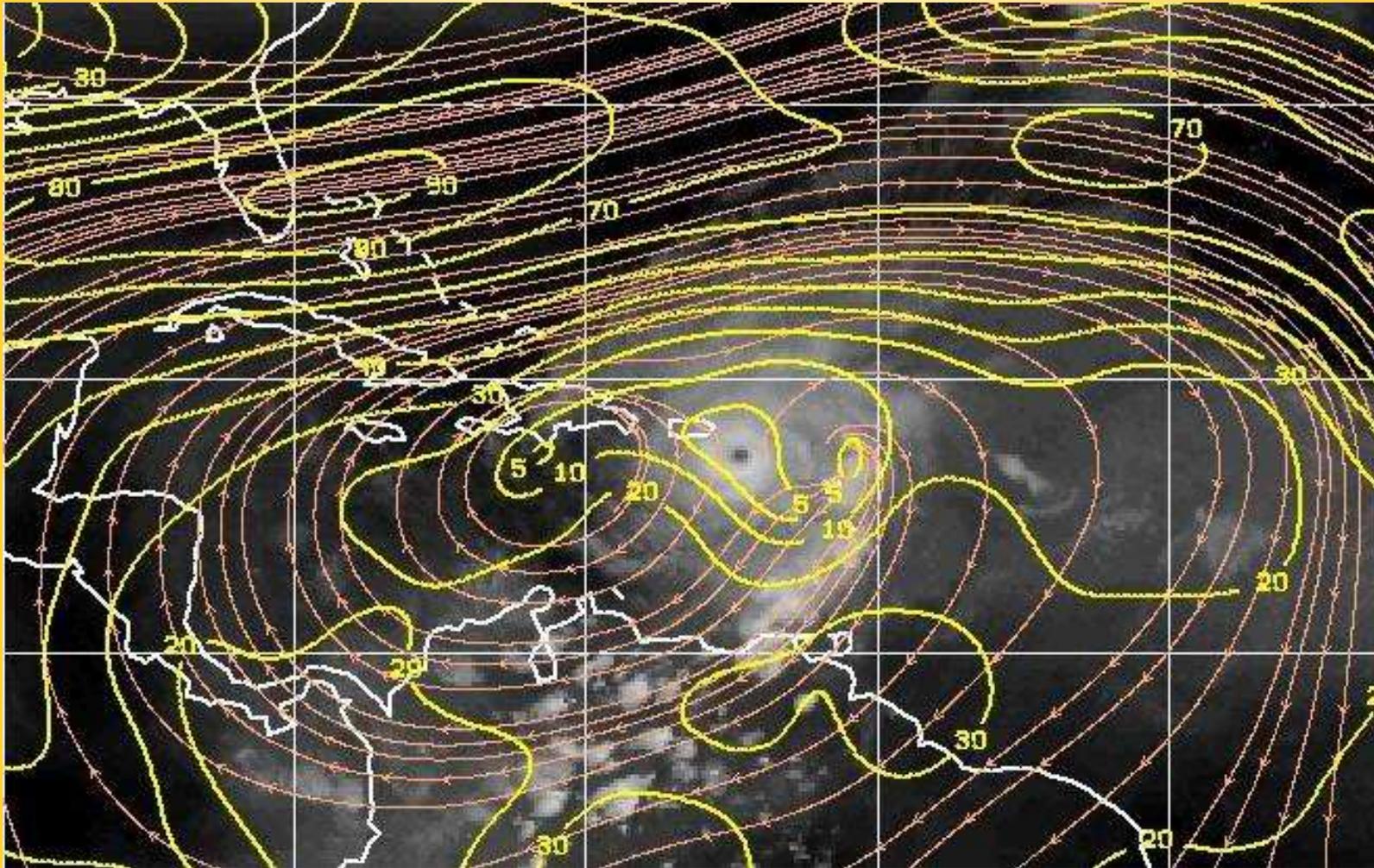


Six situations types d'interaction entre la circulation divergente d'altitude d'un système dépressionnaire tropical et la circulation synoptique environnante.

Six types of upper-level interaction between a tropical cyclone (dark centre) and the surrounding circulations (northern hemisphere).

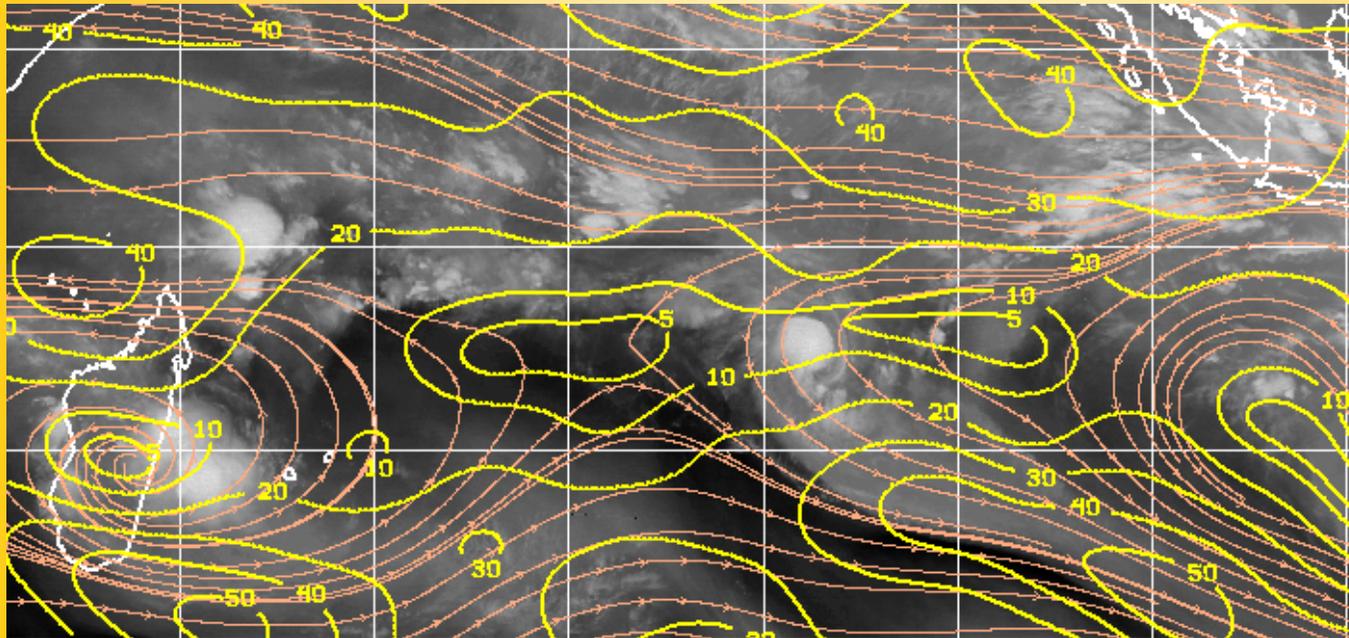
## Flux sortant d'altitude

### Exemple de configuration avec deux canaux d'évacuation



Ouragan LENNY, le 17 novembre 1999 à 18 utc.  
(Carte de cisaillement de vent).

Dual outflow channel (Hurricane Lenny).

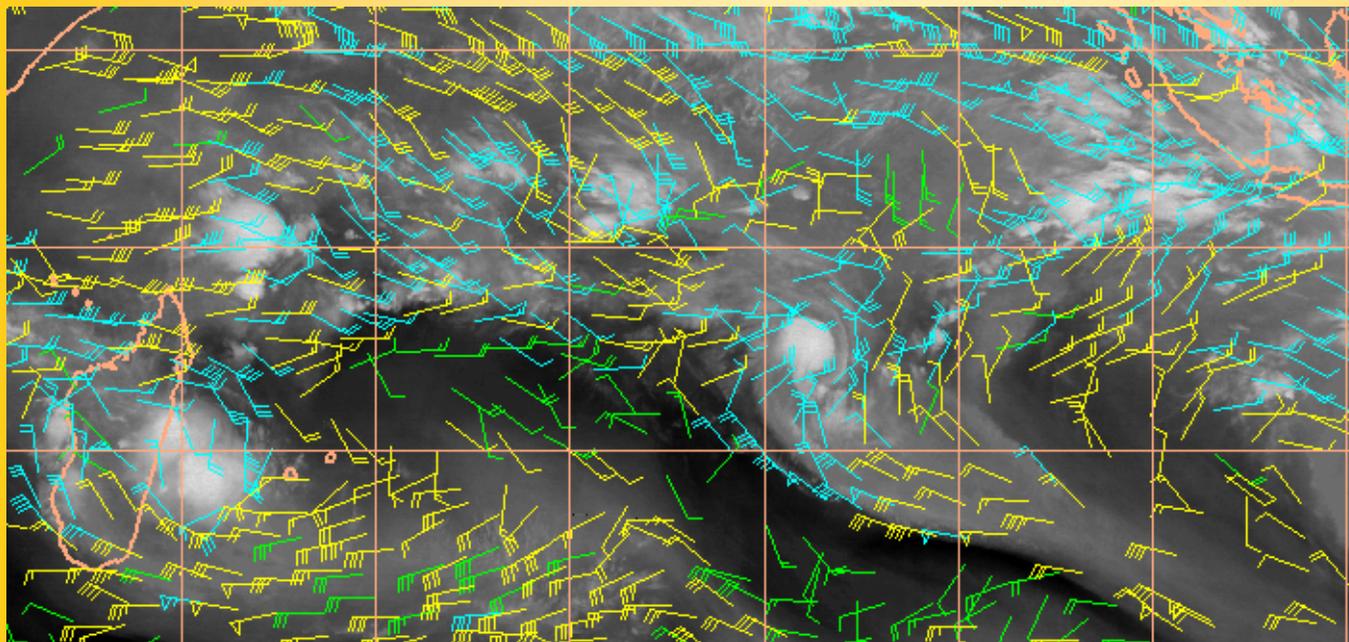


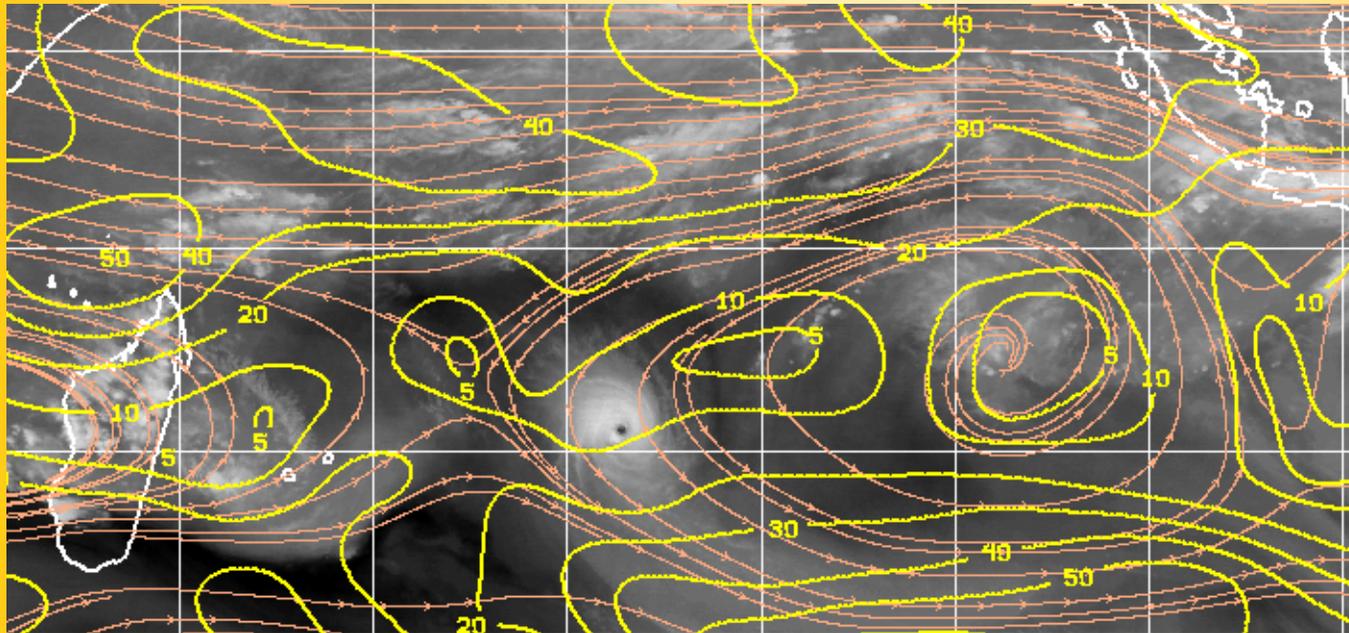
## Flux sortant d'altitude

Exemple de  
configuration  
avec un canal  
d'évacuation

Single  
outflow  
channel  
(TC Charly)

Cyclone CHARLY,  
le 20 janvier 2001  
à 03 utc



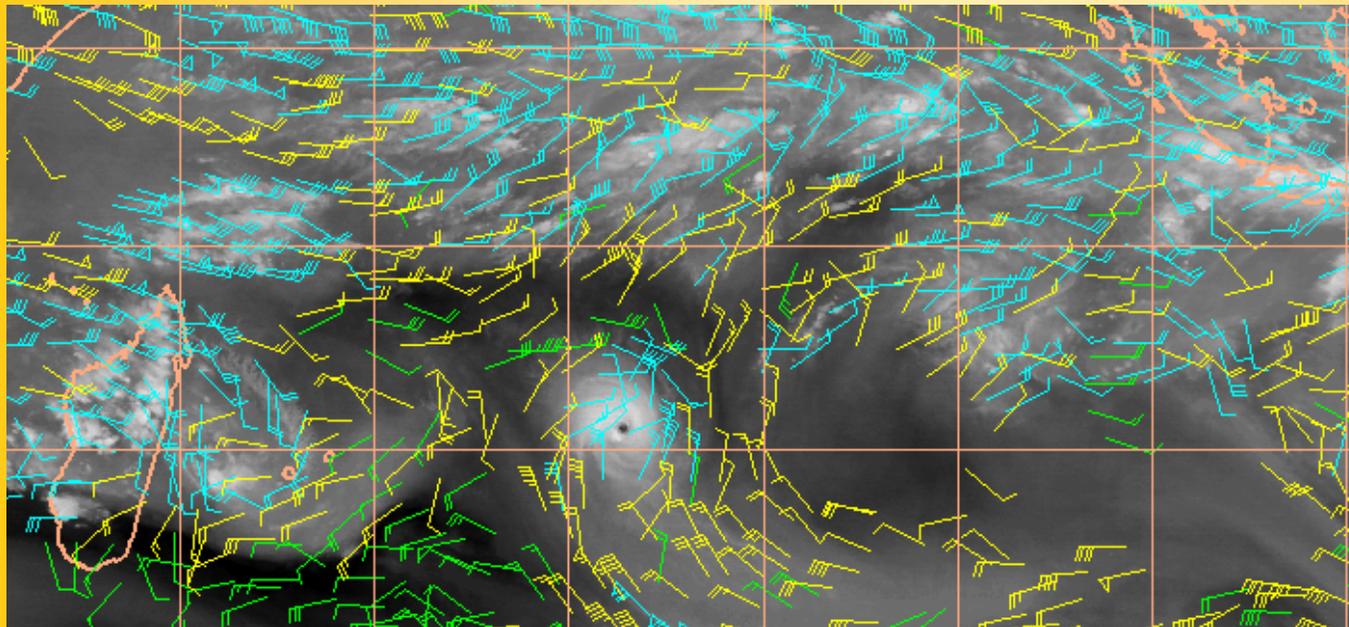


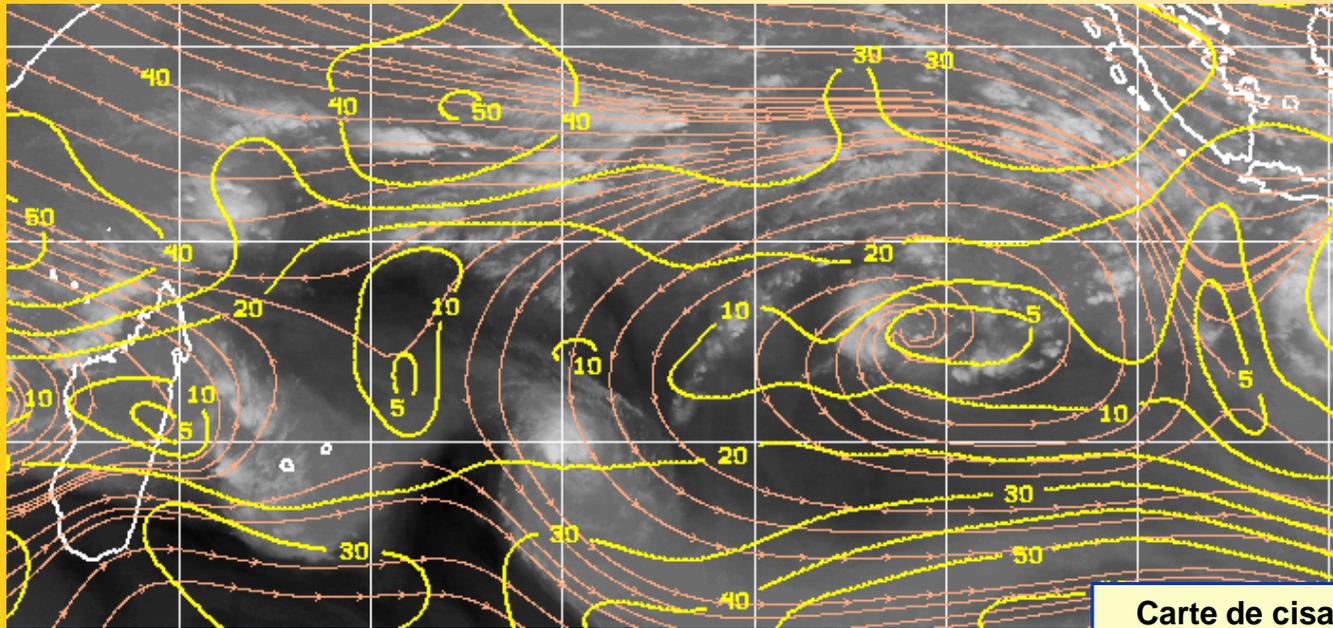
## Flux sortant d'altitude

Exemple de  
configuration  
avec un canal  
d'évacuation

Single  
outflow  
channel  
(TC Charly)

Cyclone CHARLY,  
le 22 janvier 2001  
à 15 utc

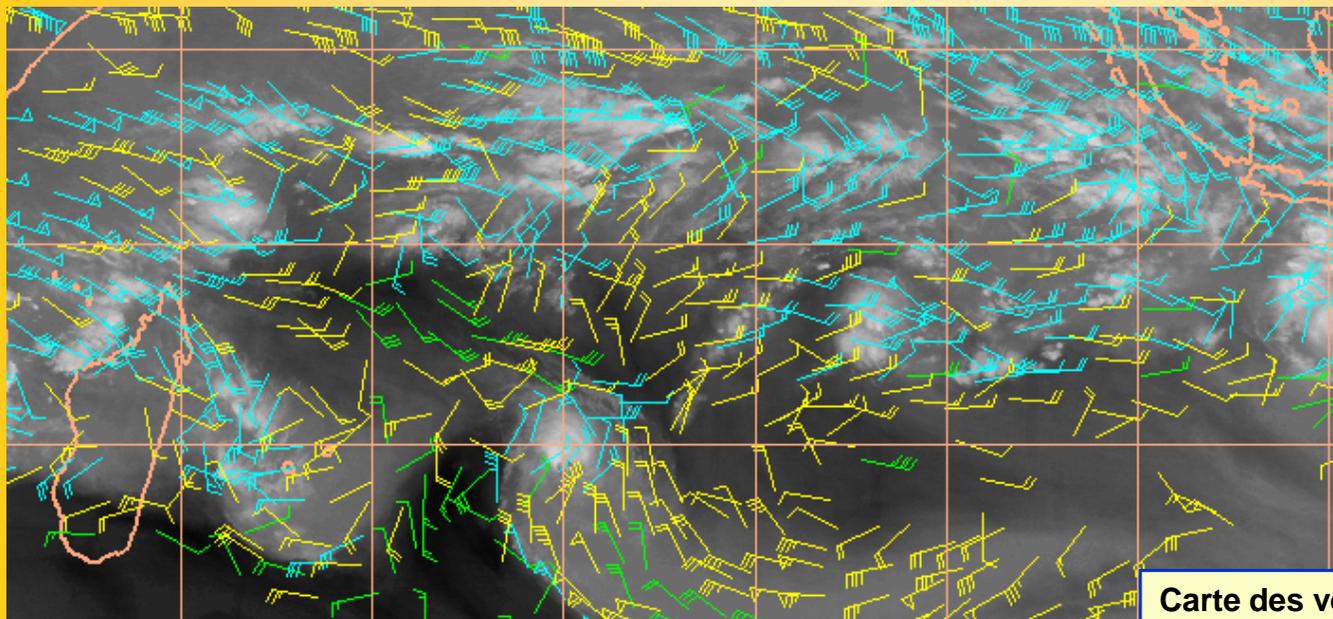




Carte de cisaillement de vent

**Flux sortant  
d'altitude**

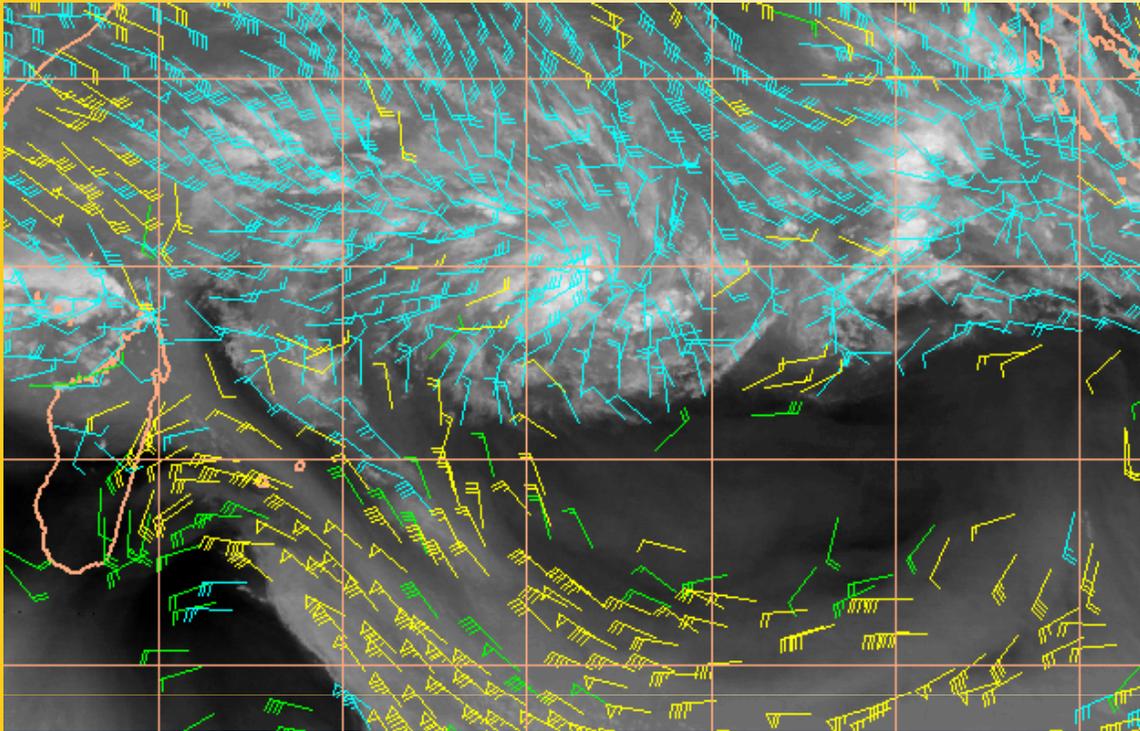
**Exemple de  
configuration  
avec un canal  
d'évacuation**



Carte des vents d'altitude

**Cyclone CHARLY,  
le 23 janvier 2001  
à 06 utc**

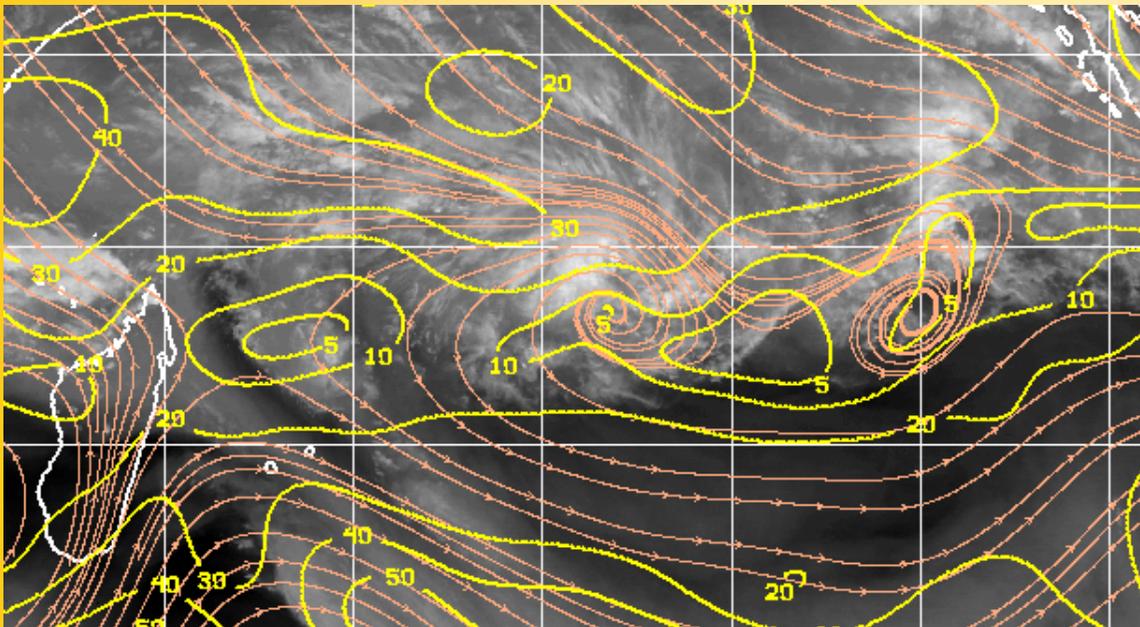
**Single  
outflow  
channel  
(TC Charly)**



**Flux sortant  
d'altitude**

**No outflow  
channel**

Carte des vents d'altitude



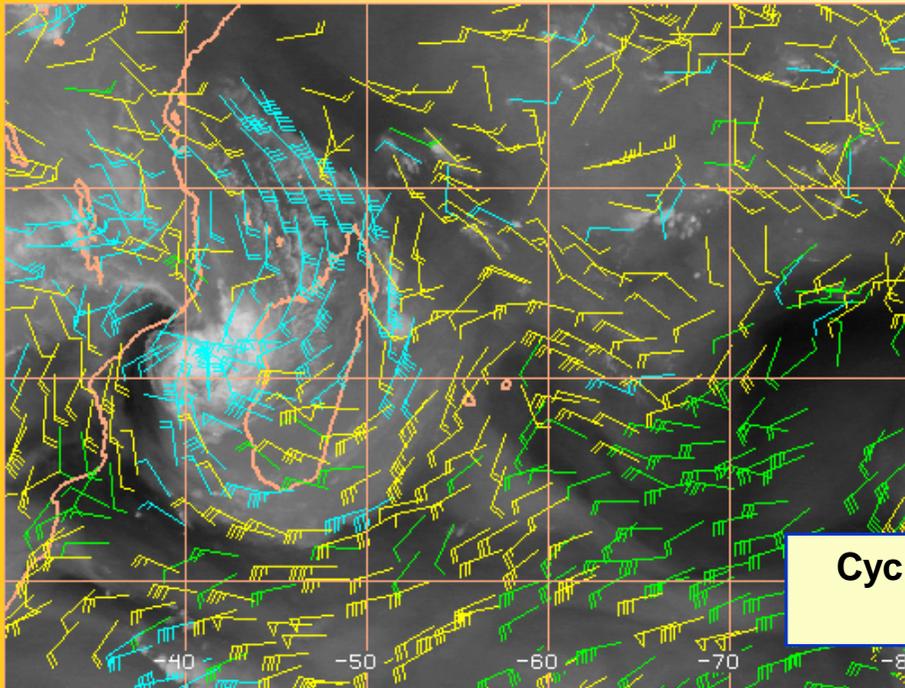
**Cyclone DINA, le 17  
janvier 2002 à 12 utc**

**No outflow channel  
(TC Dina)**

Carte de cisaillement de vent

## Flux sortant d'altitude

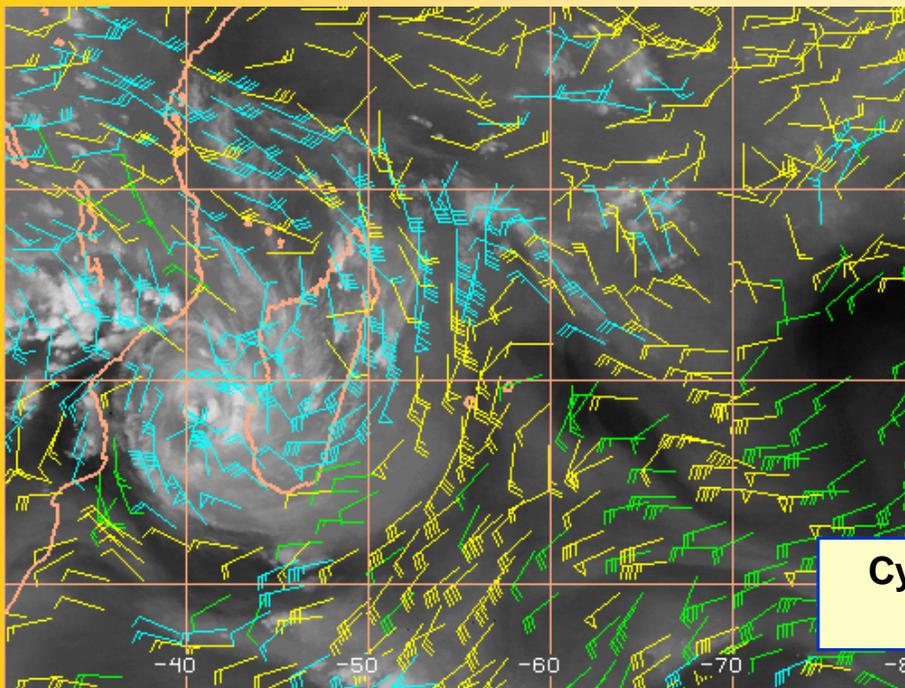
Exemple de configuration  
avec un canal principal  
d'évacuation



Cyclone DERA, le 9 mars  
2001 à 03 utc

Single  
outflow  
channel  
(TC Dera)

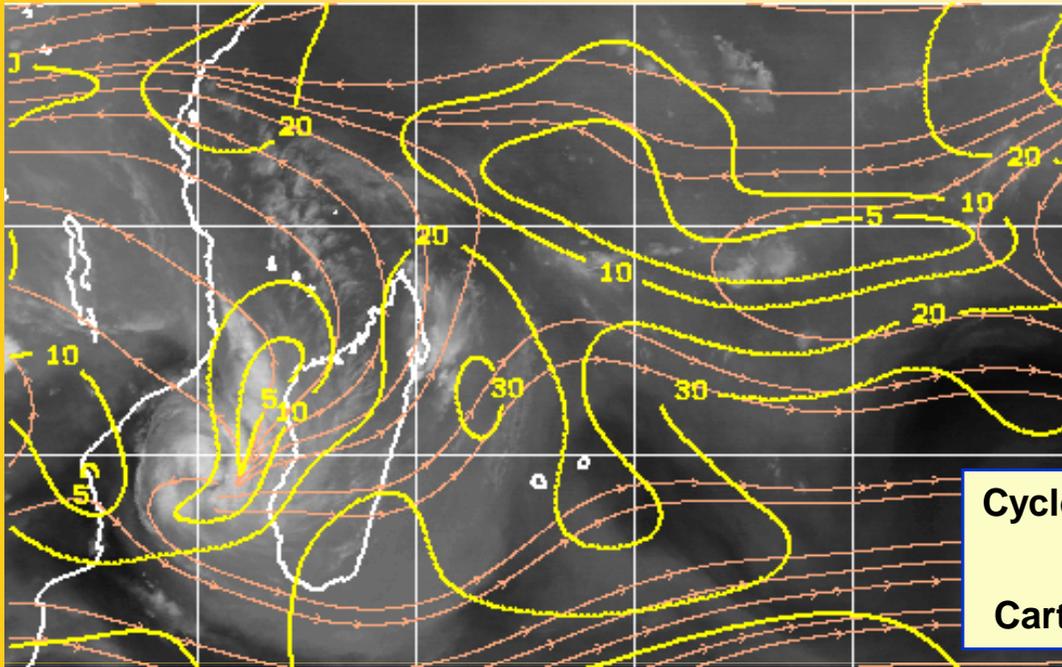
Cartes des vents d'altitude



Cyclone DERA, le 9 mars  
2001 à 15 utc

## Flux sortant d'altitude

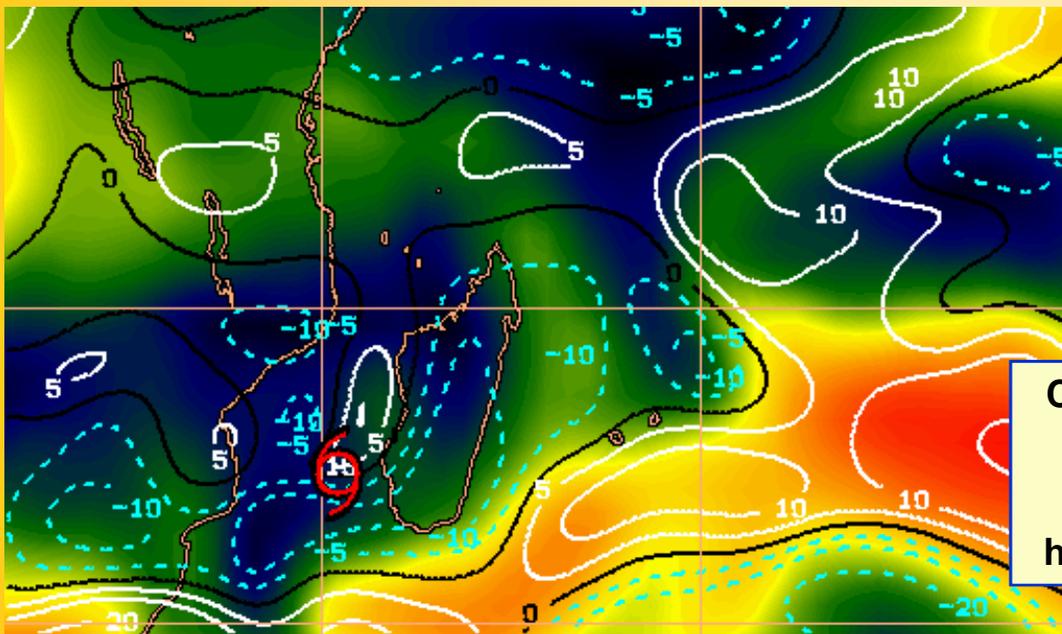
Exemple de configuration  
avec un canal principal  
d'évacuation



Cyclone DERA, le 9 mars 2001  
à 03 utc

Carte de cisaillement de vent

Single  
outflow  
channel  
(TC Dera)

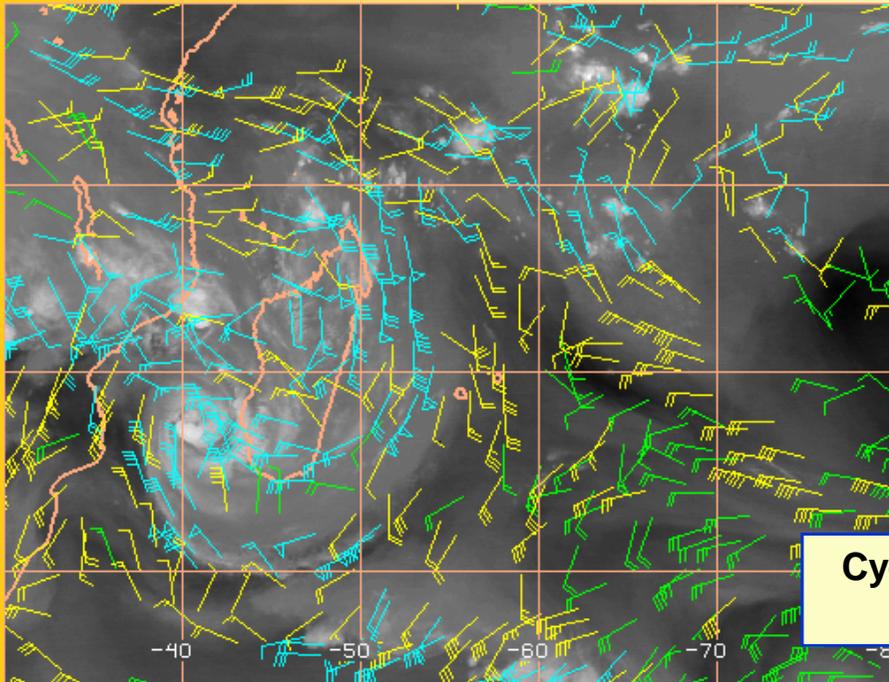


Cyclone DERA, le 9 mars 2001  
à 15 utc.

Carte de tendance sur 24  
heures du cisaillement de vent

## Flux sortant d'altitude

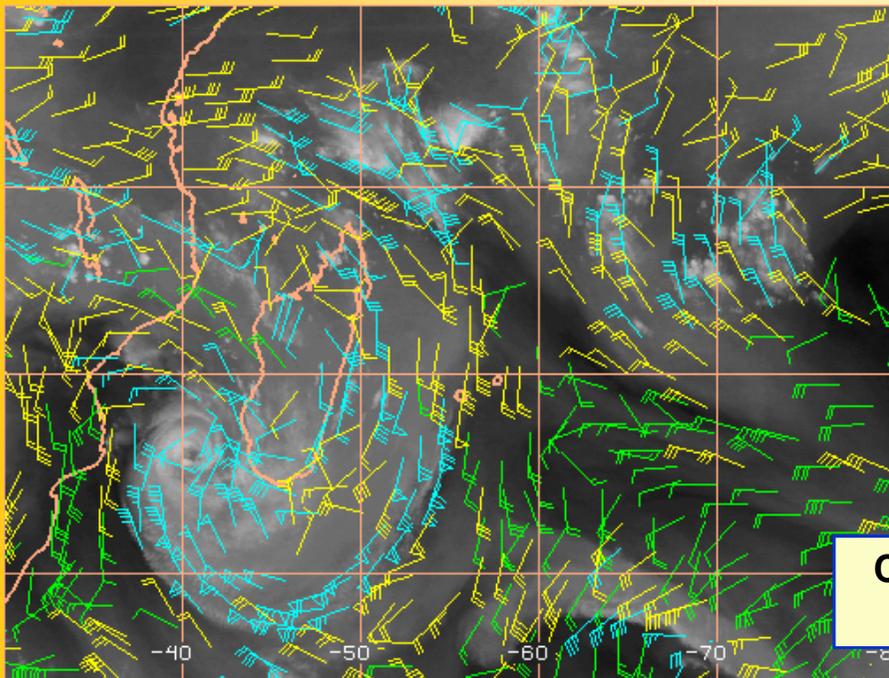
Exemple de configuration  
avec un canal principal  
d'évacuation



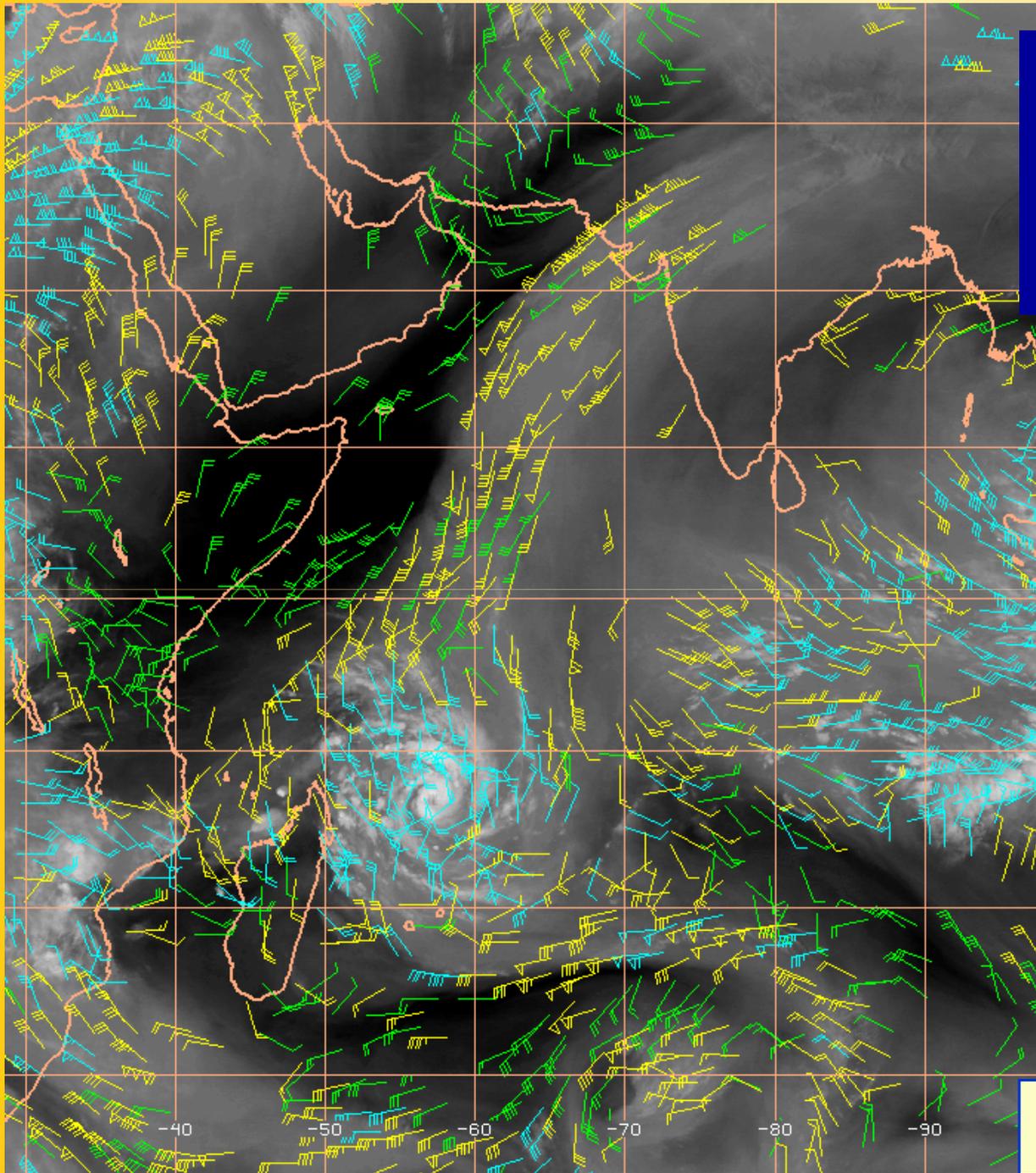
Cyclone DERA, le 10 mars  
2001 à 00 utc

Single  
outflow  
channel  
(TC Dera)

Cartes des vents d'altitude



Cyclone DERA, le 10 mars  
2001 à 12 utc



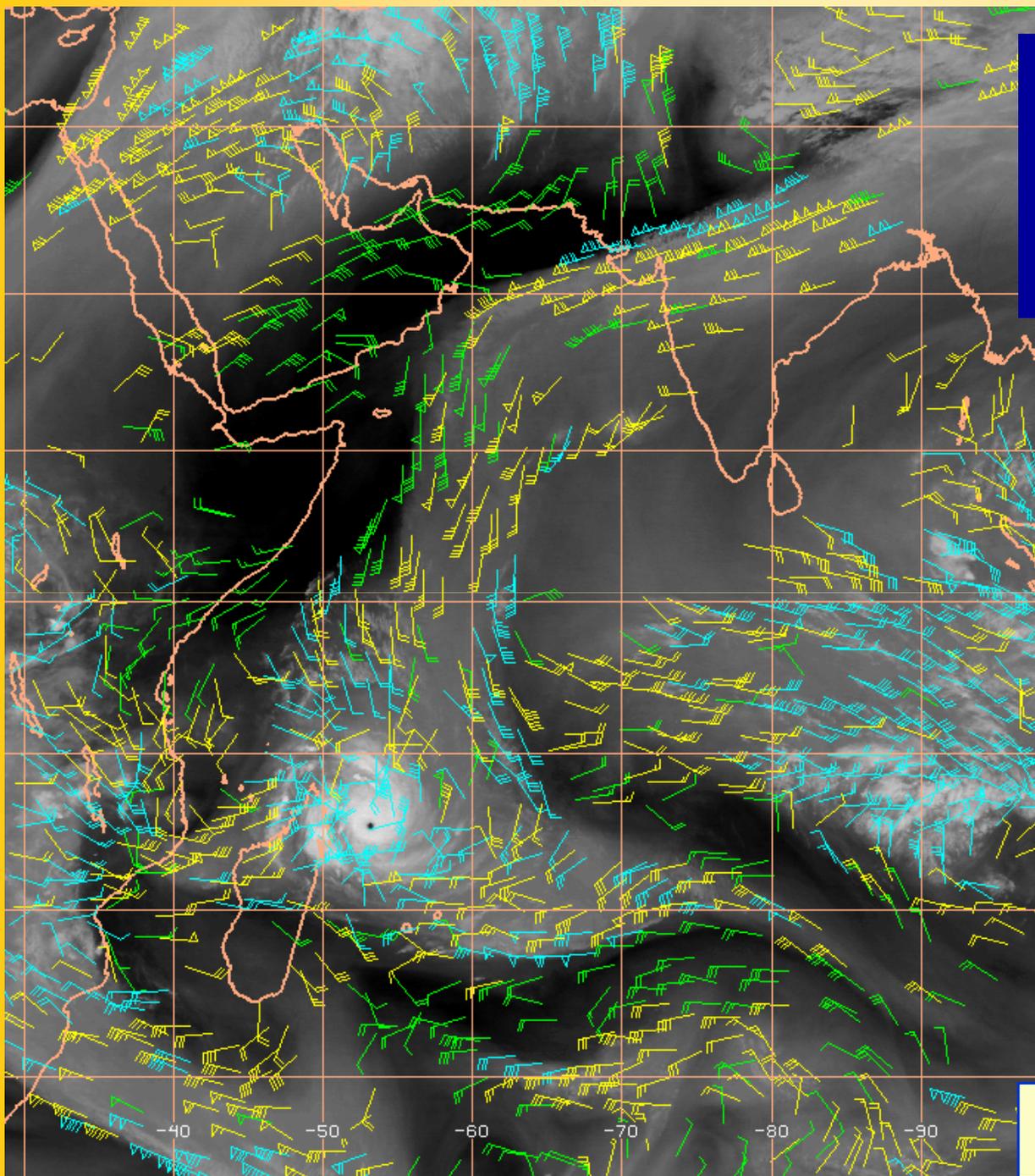
## Flux sortant d'altitude

Exemple de configuration  
avec deux canaux  
d'évacuation

dual  
outflow  
channel  
(TC Gafilo)

Cartes des vents d'altitude

Cyclone GAFILO, le 5 mars  
2004 à 03 utc



## Flux sortant d'altitude

Exemple de configuration  
avec trois canaux  
d'évacuation

triple  
outflow  
channel  
(TC Gafilo)

Cartes des vents d'altitude

**Creusement estimé de  
60 hPa en 24h**  
(de 960 hPa le 5 mars à  
06 utc à 900 hPa le 6  
mars à 06 utc).

**Cyclone GAFILO, le 6 mars  
2004 à 09 utc**

