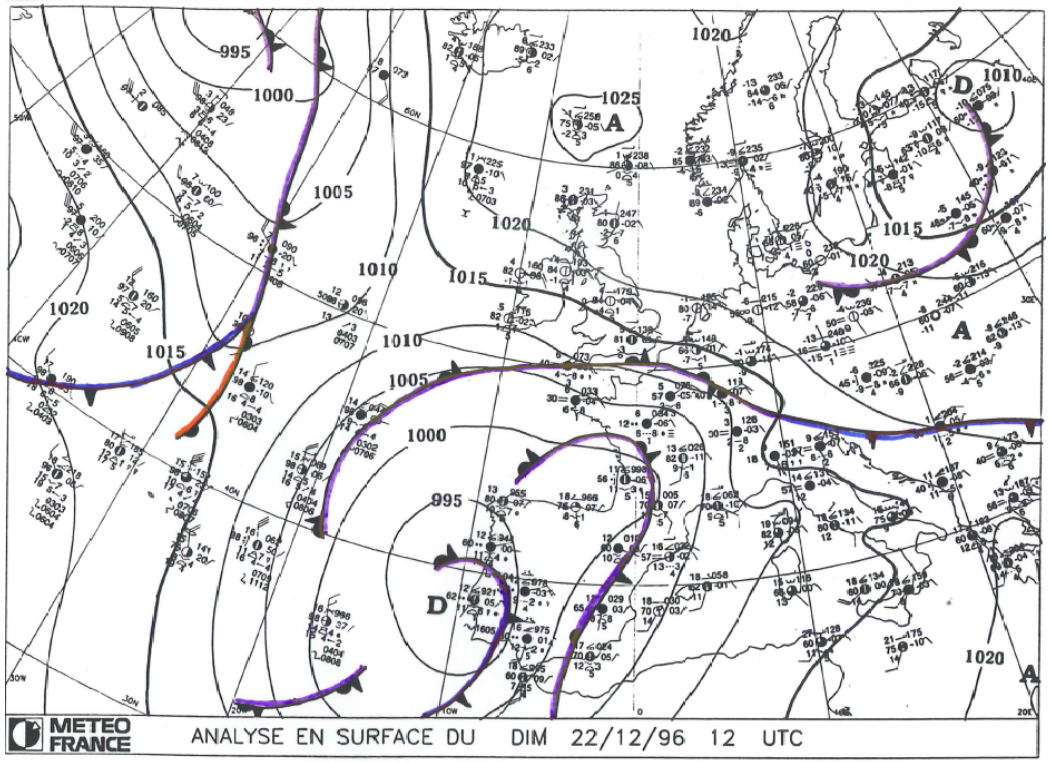
La modélisation des nuages et précipitations dans les modèles atmosphériques

La formation des nuages: les systèmes dépressionaires



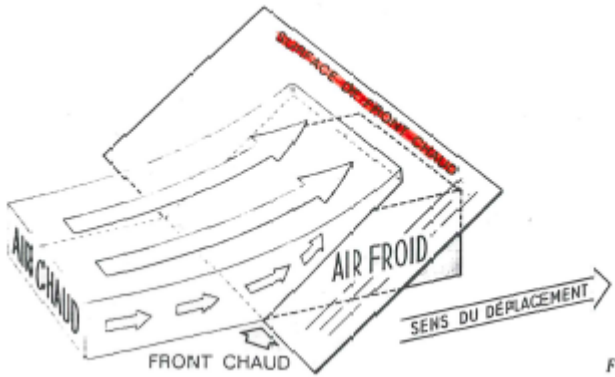


Fig. 11.8

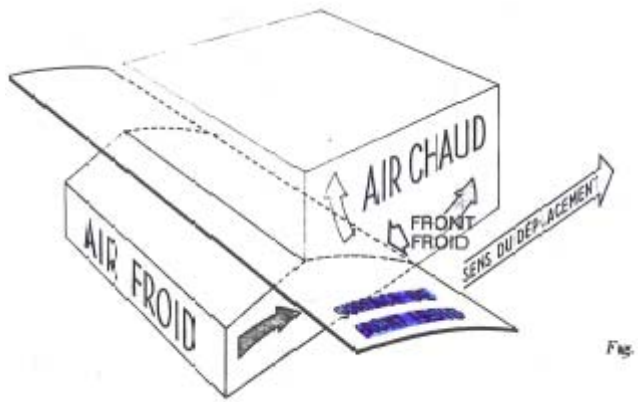
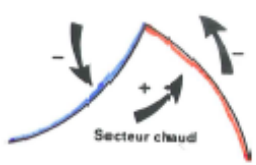
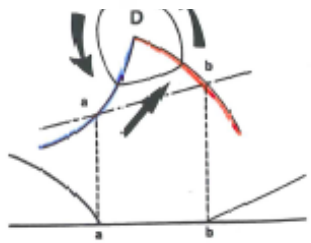
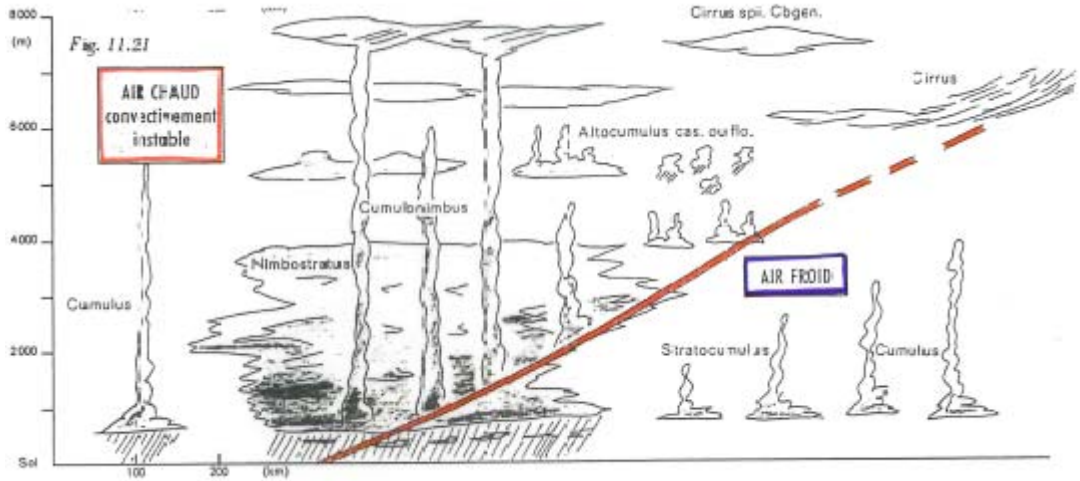


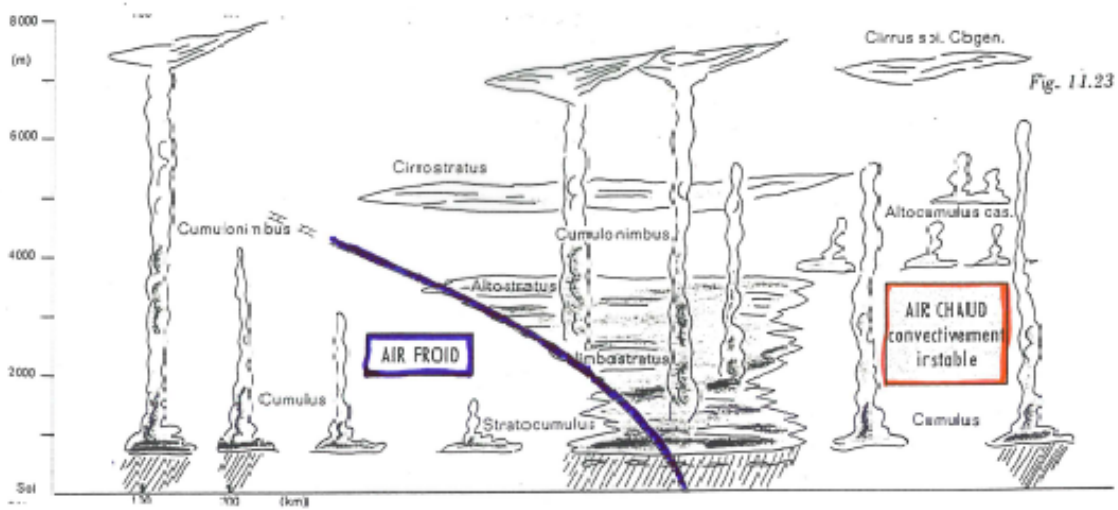
Fig. 11.9



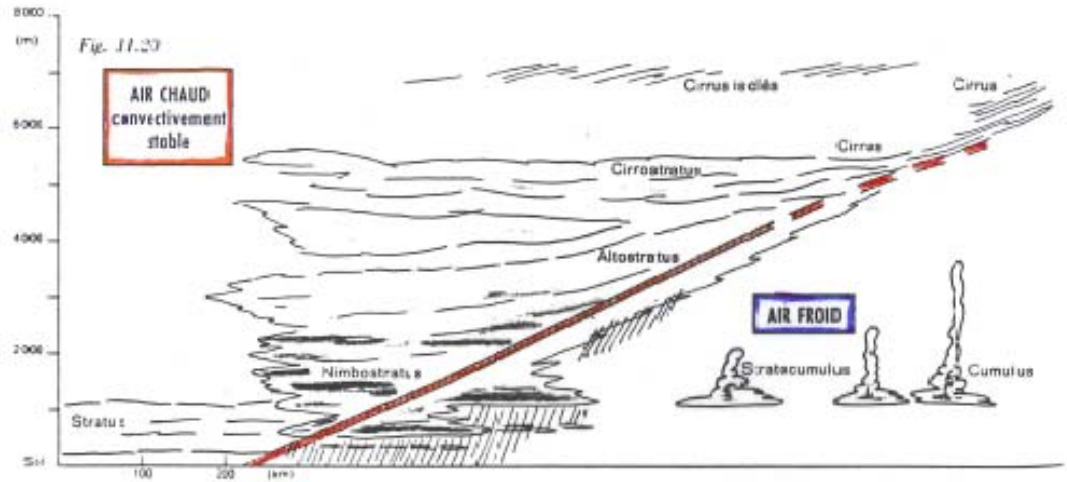


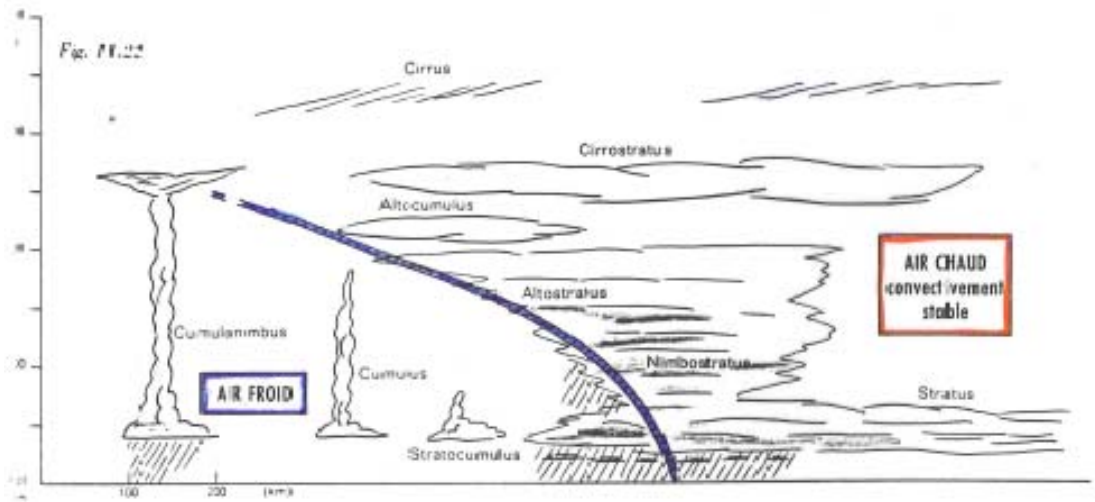
Les systèmes dépressionaires: front chaud, front froid
Le cas de l'atmosphère instable





Les systèmes dépressionaires: front chaud, front froid
Le cas de l'atmosphère stable

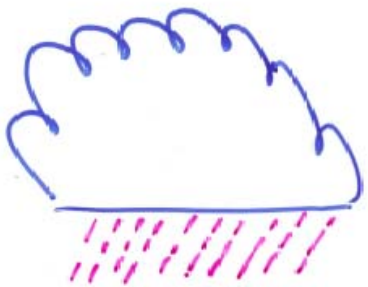




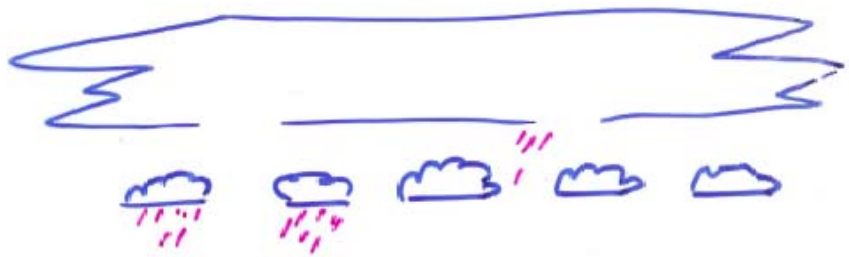
La modélisation des nuages

1 – Résolution fine: Δx =100m, Δz=10m, on résout explicitement les équations

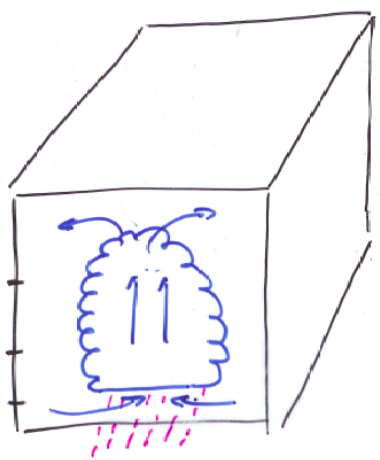
3-d



1-d



2 – Résolution grossière Δx =30 km, Δz=100m, paramétrisation des nuages
prévision numérique, modèles de climat



Plan du cours/ Objectif

- **Modification de la thermodynamique par les nuages**
  - Variables utilisées
  - Equations de la thermodynamique
  - La condensation d'échelle inférieure à la maille
- **Applications**
  - Le brouillard
  - Les panaches d'aéroréfrigérants
- **Les précipitations**
  - Variables utilisées
  - Equations pour l'eau précipitante

- **Objectif: comprendre comment les nuages sont décrits dans les modèles atmosphériques**

La modélisation des nuages et des précipitations
les variables utilisées

Nuages → Spectre de gouttes nuageuses

Précipitations → Spectre de gouttes de pluies

Description explicite de la micro-physique trop coûteuse (60 classes)

Nuages

$$q_l = \frac{m_l}{m_a + m_v + m_l}$$

Portés par le vent

Précipitations

$$q_r = \frac{m_r}{m_a + m_v + m_l + m_r}$$

Vitesse de chute

On ne s'occupera pas de la phase solide: nuages chauds

La modélisation des nuages : équation d'état

ρ_m mélange de gaz: air sec + vapeur d'eau

$$P = \rho_a R_a T + \rho_a R_a T = \rho_m R_a T (1 + \frac{R_v - R_a}{R_a} q_v)$$

Apparition d'eau nuageuse

$$\rho_m = \rho\ (1 - q_l)$$

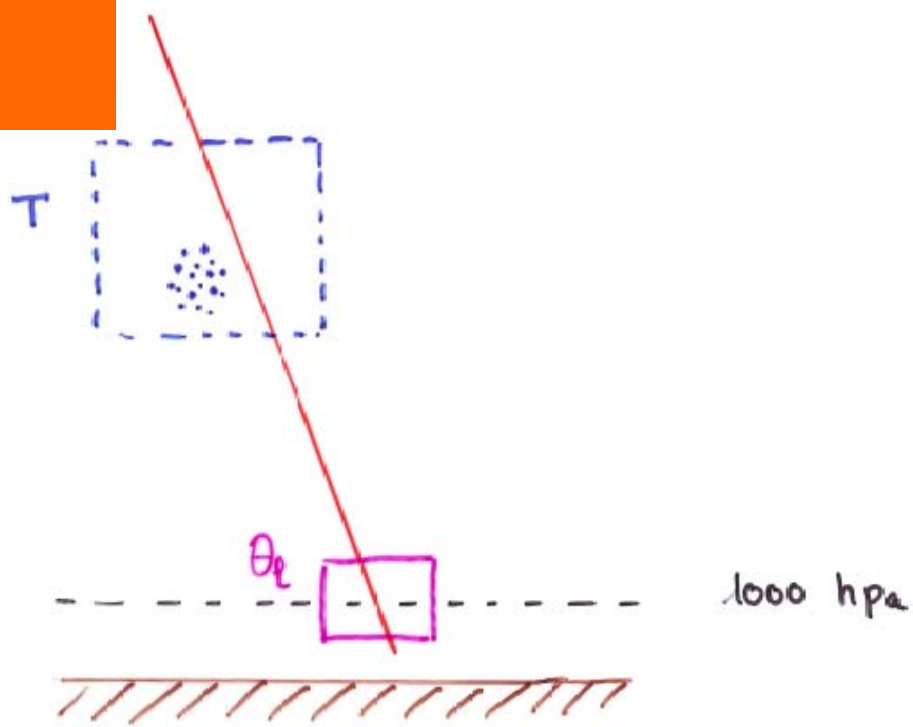
ρ_m densité du mélange gazeux, ρ mélange des phases gazeuses et liquides

$$P = \rho\ R_a\ T (1 + \frac{R_v - R_a}{R_a} q_v - q_l)$$

+ équation pour l'eau liquide nuageuse

La modélisation des nuages – les variables conservatives à travers les processus de condensation

Gradient adiabatique



$\theta_l = \theta - L/Cp \ \theta/T \ q_l$

$q_w = q + q_l$

La modélisation des nuages : les équations de la thermodynamique en 1-D sur la verticale

I équation d'évolution pour q_l teneur en eau liquide nuageuse $m_l/(m_a + m_v + m_l)$

$$\frac{\partial q_l}{\partial t} = -\frac{\partial \overline{w' q'_l}}{\partial z} \qquad -Cd$$

II équation d 'évolution pour q_v humidité spécifique $m_v/(m_a + m_v + m_l)$

Condensation

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{\partial \overline{w' q'}}{\partial z} \qquad +Cd$$

III équation d'évolution pour θ température potentielle

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial \overline{w' \theta'}}{\partial z} + Fr \qquad -\frac{L}{Cp}\frac{\theta}{T}Cd$$

Les équations sont ici présentées en 1-D , elle se généralise facilement au cas 3-D en ajoutant les termes d'advection et en prenant en compte la diffusion horizontale

La modélisation des nuages : les équations de la thermodynamique en variables conservative

I +II - équation d'évolution pour q_w teneur en eau liquide totale $(m_v+m_l)/(m_a + m_v + m_l)$

$$\frac{\partial q_w}{\partial t} = -\frac{\partial \overline{w' q'_w}}{\partial z}$$

III – (L/Cp)(θ/T)II - équation d'évolution pour la température liquide potentielle q_l

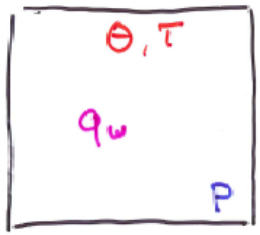
$$\frac{\partial \theta_l}{\partial t} = -\frac{\partial \overline{w' \theta'_l}}{\partial z} + Fr$$

Les termes de condensation/évaporation ont disparus

+ une relation diagnostique pour déterminer la teneur en eau liquide nuageuse q_l

La modélisation des nuages : La condensation d'échelle inférieure à la maille

Comment déterminer q_l ? : dépassement du seuil de saturation $q_{sat}(T,P)$



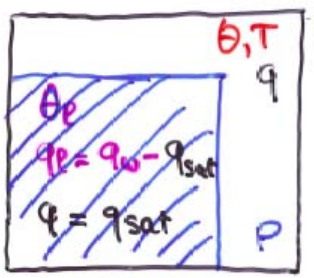
à ϵ

$$q_v = \frac{m_v}{m_a + m_v} + gaz \quad parfait$$

$$q_v = \frac{0.622\ e}{P - e} \quad P : pression,\ e : tension\ de\ vapeur$$

à t +dt condensation: $q_w > q_{sat}(T,P)$ ou $e > e_{sat}(T)$ tension de vapeur saturante

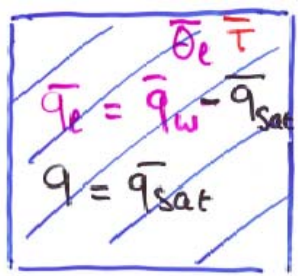
Condensation partielle



Comment déterminer

$$\overline{q}, \overline{q_l}, \overline{\theta_l}, \overline{N}$$

tout ou rien



N=1

Peu réaliste pour certain nuages

Chocs numériques

La modélisation des nuages : la physique de la saturation, variables conservatives

$$\overline{q_l} = \overline{q_w} - \overline{q_s}(\overline{T}, \overline{P})$$

Passage en variables conservatives: $\overline{T}_l = \overline{T} - \frac{L}{Cp}\overline{q_l}, \overline{q_w}$

Développement limité au 1er ordre

$$\overline{q_s}(\overline{T}, \overline{P}) = \overline{q_{sl}}(\overline{T_l}, \overline{P}) + (\overline{T} - \overline{T_l}) \frac{\partial \overline{q_{sl}}(\overline{T_l}, \overline{P})}{\partial T}$$

Relation de Clausius-Clapeyron $\frac{\partial \overline{q_{sl}}(\overline{T_l}, \overline{P})}{\partial \overline{T}} = \frac{\partial \overline{q_{sl}}}{\partial T} = \overline{q_{sl}} \frac{L}{R_v \overline{T_l}^2}$

$$\overline{q_s} = \overline{q_{sl}} + \frac{L}{Cp}\overline{q_l} \; \overline{q_{sl}} \frac{L}{R_v \overline{T_l}^2}$$

a

$$q_l = \overline{q_w} - \overline{q_{sl}}(1 + \frac{L^2}{CpR_v \overline{T_l}^2}\overline{q_l}) \Rightarrow \overline{q_l} = (\overline{q_w} - \overline{q_{sl}}) \frac{1}{(1 + \frac{L^2}{CpR_v \overline{T_l}^2}\overline{q_{sl}})}$$

La modélisation des nuages : condensation sous maille - la physique de la saturation

$$q_l = q_w - q_s(T,P)$$

Passage en variables conservatives: Tl et qw + Introduction des fluctuations turbulentes

Développement limité au 1er ordre

$$q_s(T,P) = \overline{q_s}(\overline{T_l},\overline{P}) + (T-\overline{T_l})\frac{\partial \overline{q_{sl}}(\overline{T_l},\overline{P})}{\partial T}$$

Relation de Clausius-Clapeyron $\frac{\partial \overline{q_{sl}}(\overline{T_l},\overline{P})}{\partial \overline{T}} = \frac{\partial \overline{q_{sl}}}{\partial T} = \overline{q_{sl}}\frac{L}{R_v \overline{T_l}^2}$

$$q_l = q_w + q_s = q_w - \overline{q_{sl}}(1+(\frac{L}{Cp}q_l + T_l')\frac{L}{R_v \overline{T_l}^2})$$

$$q_l = \overline{q_l} + q_l' = a(\overline{q_w} - \overline{q_{sl}}) + a(q_w' - \alpha\theta_l')$$

$$\theta_l' = \frac{\overline{\theta}}{\overline{T}}T_l'$$

$$\alpha = \frac{L}{R_v \overline{T_l}^2}\frac{\overline{\theta}}{\overline{T}}\overline{q_{sl}}$$

La modélisation des nuages : paramétrisation de la condensation d'échelle inférieure à la maille

Hypothèse: on suppose que θ_l et q_w obéissent à des lois de distribution statistique (gaussienne ou par exemple), on travaille sur une variable centrée s

$$s' = \frac{a}{2}(q_w' - \alpha\theta_l')$$

$$\sigma_s^2 = \overline{s'^2} = f(\overline{q_w'^2}, \overline{\theta_l'^2}, \overline{\theta_l' q_l'})$$

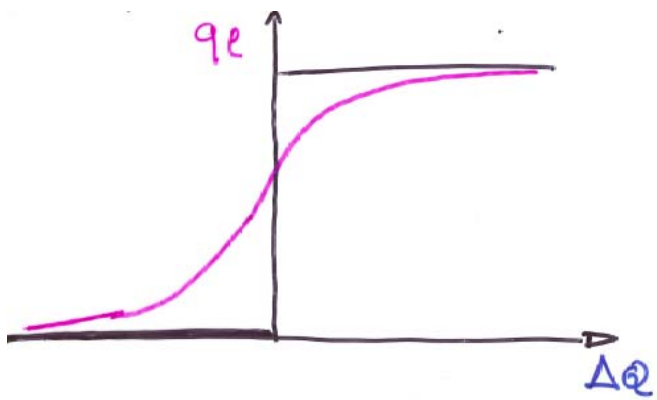
écart moyen à la saturation

$$\nabla Q = \overline{q_w} - \overline{q_{sat}}(\overline{T}, \overline{P})$$

$$\overline{N} = F_1(\nabla Q)$$

$$\frac{\overline{q_l}}{2\sigma_s} = F_2(\nabla Q)$$

$$\frac{\overline{\beta' q_l'}}{\sigma_s^2} = F_3(\nabla Q)$$



La modélisation des nuages : modélisation sous maille, détermination de σ_s

On stationnarise les équations d'évolution des moments d'ordre deux qui font intervenir les variables θ_l et q_l: équilibre entre la production et la dissipation

$$\frac{\partial \overline{\theta_l'^2}}{\partial t} = \text{Production} + \text{Diffusion Turbulente} - \text{Dissipation}$$

$$\frac{\partial \overline{q_l'^2}}{\partial t} = \text{Production} + \text{Diffusion Turbulente} - \text{Dissipation}$$

$$\frac{\partial \overline{\theta_l' q_l'}}{\partial t} = \text{Production} + \text{Diffusion Turbulente} - \text{Dissipation}$$

Stationnarisation

$$\overline{\theta_l'^2} = \frac{2}{C_2} \frac{e_t}{\varepsilon} K \left(\frac{\partial \overline{\theta_l}}{\partial z} \right)^2$$

$$\overline{q_l'^2} = \frac{2}{C_2} \frac{e_t}{\varepsilon} K \left(\frac{\partial \overline{q_w}}{\partial z} \right)^2$$

$$\overline{\theta_l' q_l'} = \frac{2}{C_2} \frac{e_t}{\varepsilon} K \left(\frac{\partial \overline{q_w}}{\partial z} \frac{\partial \overline{\theta_l}}{\partial z} \right)$$

$$\frac{e_t}{\varepsilon} K$$

où e_t est l'énergie cinétique turbulente, ε sa dissipation. Cette expression dépend de la fermeture turbulente utilisée:
Ordre 0 coefficient d'échange K
Ordre 1 équation d'évolution pour e_t
Ordre 2 équations d'évolution pour e_t et ε

La modélisation des nuages : la modification de la flottabilité

Apparition de la phase condensée de l'eau q_l

Modification de la masse volumique du mélange gazeux et donc modification de la flottabilité

$$P = \rho R_a T(1 + \frac{R_v - R_a}{R_a} q_v - q_l) = \rho R_a T_v$$

avec $T_v = T(1 + 0.608q - q_l)$

$\theta_v = \theta(1 + 0.608q - q_l)$

Le terme de flottabilité se transforme : $\frac{g}{\theta}\overline{w'\theta'}$ → $\frac{g}{\theta}\overline{w'\theta_v'}$

Ce qui s'exprime en variables conservatives θ_l et q_w

$$\overline{w'\theta_v'} = E_\theta \overline{w'\theta_l'} + E_q \overline{w'q_w'}$$

La modélisation des nuages : Application à l'étude du brouillard de rayonnement

La modélisation du brouillard se prête bien au cas 1-D sur la verticale. On utilise les équations de la CLA déjà présentées. Il est nécessaire toutefois de rajouter quelques termes à savoir :

- la sédimentation des gouttelettes de brouillard
- Les termes d'advection de température et d'humidité déduits des observations

$$\frac{\partial \overline{\theta_l}}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} + \bar{w}\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} = -\frac{\partial \overline{w'\theta'_l}}{\partial z} + Frad - \frac{L}{C_p}\frac{\bar{\theta}}{\bar{T}}\frac{\partial G}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \overline{q_w}}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \bar{q}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial \bar{q}}{\partial y} + \bar{w}\frac{\partial \bar{q}}{\partial z} = -\frac{\partial \overline{w'q'_w}}{\partial z} + \frac{\partial G}{\partial z}$$

Où G est le flux de sédimentation des gouttes avec:

$$G = w_g \overline{q_l} \quad et \quad w_g \approx 2\ cms^{-1} \quad Kunkel,1984$$

La modélisation des nuages : Application à l'étude du brouillard de rayonnement à Cabauw (PB)

Les données disponibles sur le site

- Visibility from transmissiometers at 1.5, 5, 20, 40, 60, 100, 140 and 180 m,
- Wind (direction and speed) at 1.5, 5, 10, 20, 40, 80, 120, 160 and 200 m,
- Temperature at 0.6, 1.5, 5, 10, 20, 40, 80, 120, 160 and 200 m,
- Pressure gradient near the ground (Wessels, personal communication, 1986),
- Thermal wind deduced from horizontal gradient of temperature at 2 meters from four neighboring stations,
- Radiative fluxes near the ground and at the top of the mast,
- Specific humidity and temperature at 1.1 and 0.45 m near the tower.

In addition, the radiosonde soundings (RS) from De Bilt are available at 0000, 0600 and 1200 UTC.

La situation météorologique le 03/09/1977

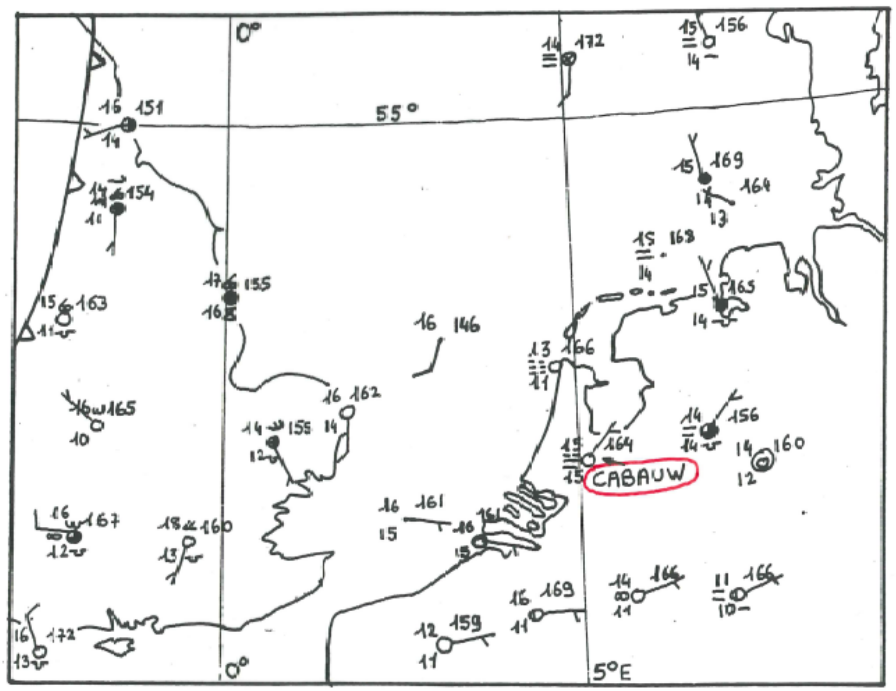


FIG. 1. The synoptic situation 0000 UTC 3 August 1977.

La modélisation des nuages : Application à l'étude du brouillard de rayonnement à Cabauw (PB)

Comparaison mesure-calcul: visibilité

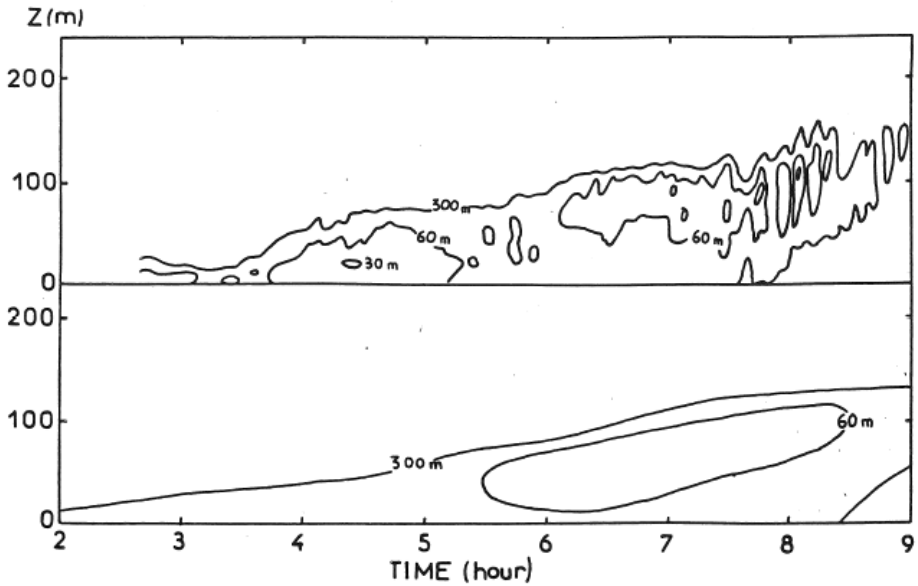


FIG. 3. Time and space variation of visibility for (a) observed and (b) computed with forced ground values.

Relation visibilité-teneur en eau liquide nuageuse

The parameterization for β is based on numerous experimental data giving the following relationship:

Visibility (m)	LWC (10^{-4} kg kg^{-1})
16	4.8
30	2.4
60	1.2
300	0.2

La modélisation des nuages : Application à l'étude du brouillard de rayonnement à Cabauw (PB)

Evolution de la température et de l'humidité au voisinage du sol

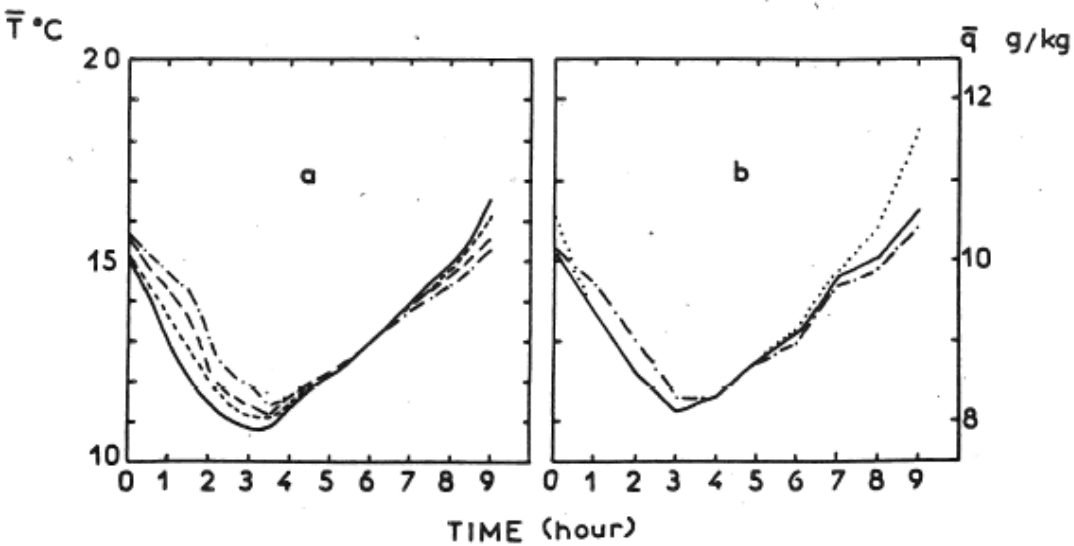


FIG. 2. The measured temperatures (a) and specific humidities (b) at 0.45 m (solid), 1.1. m (dot-dash), 0.6 m (short dash), 1.5 m (long dash) and the saturated specific humidity at 0.45 m (dotted).

Comparaison mesure-calcul: visibilité

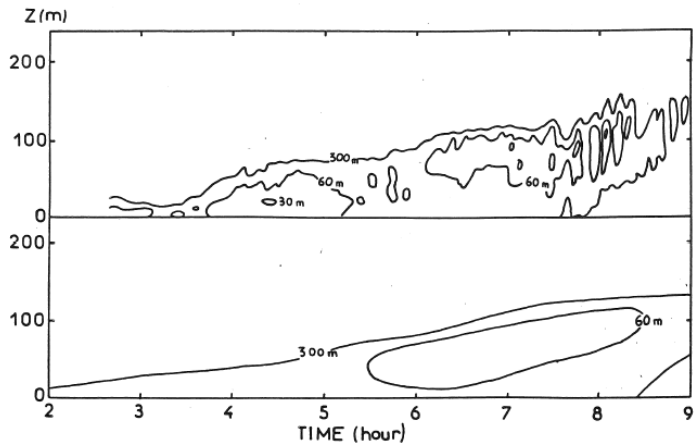
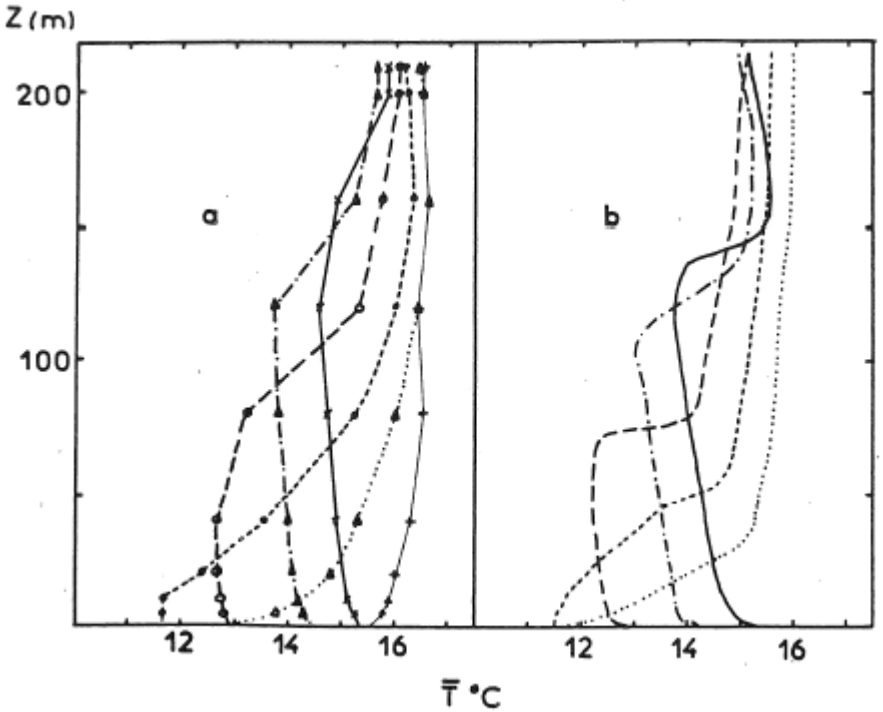


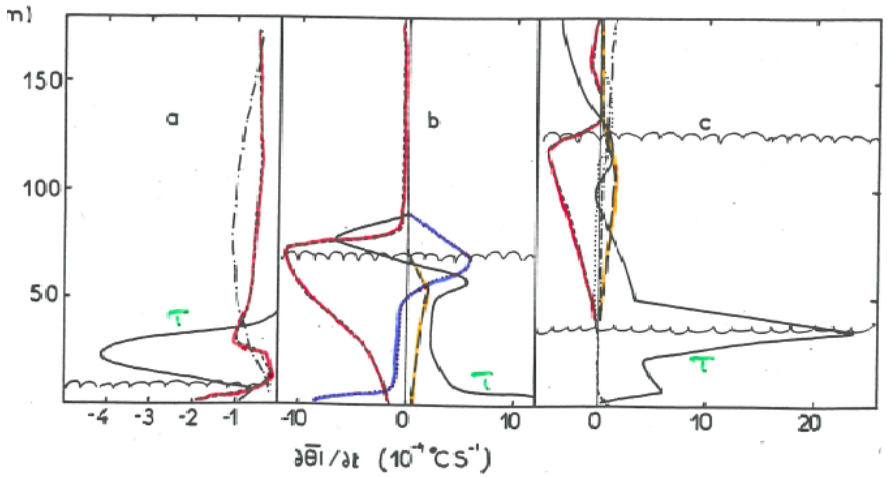
FIG. 3. Time and space variation of visibility for (a) observed and (b) computed with forced ground values.

La modélisation des nuages : Application à l'étude du brouillard de rayonnement à Cabauw (PB)

Comparaison mesure-calcul sur les profiles de température dans la couche de brouillard



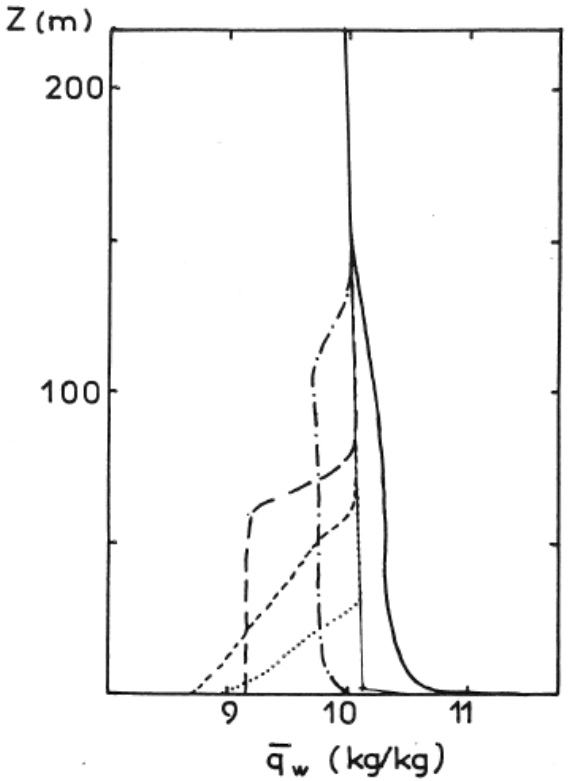
Les termes du bilan de la température potentielle liquide



G. 9. Liquid water potential temperature budget computed at 0200 UTC (a), 0600 UTC (b), 0900 UTC solid) turbulence transport, (short dashed) radiative cooling, (long dashed) solar heating, (dotted) settling , (dot-dashed) advection term.

La modélisation des nuages : Application à l'étude du brouillard de rayonnement à Cabauw (PB)

Profiles de teneur en eau totale



Les termes du bilan pour l'eau totale

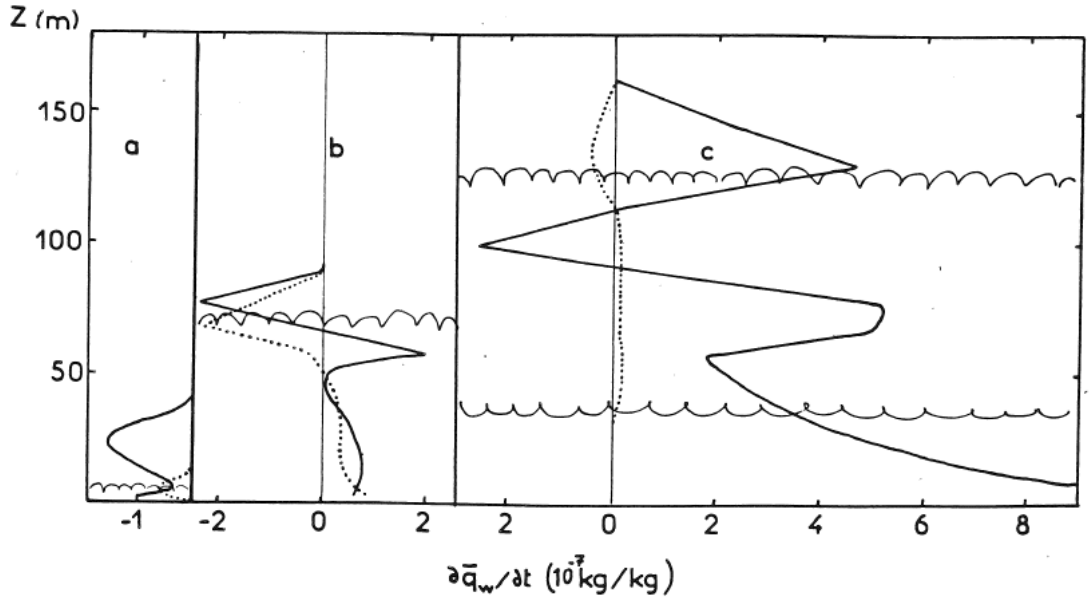


FIG. 11. Specific humidity budget computed at 0200 UTC (a), 0600 UTC (b), 0900 UTC (c): (solid) turbulence transport, (dotted) settling term.

La modélisation des nuages : Application à l'étude du brouillard de rayonnement à Cabauw (PB)

Comparaison mesure-calcul sur la vitesse du vent

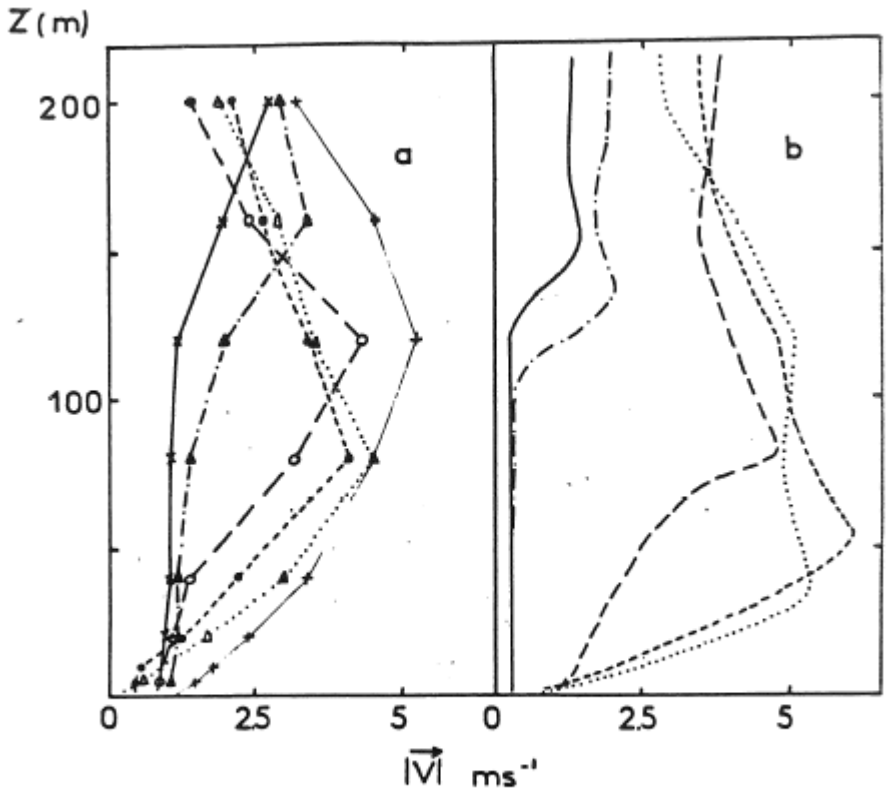


FIG. 5. Evolution of the wind speed profile for (a) observed and (b) computed (symbols as in Fig. 4) with forced ground values.

La modélisation des nuages : Application à l'étude du brouillard de rayonnement à Cabauw (PB)

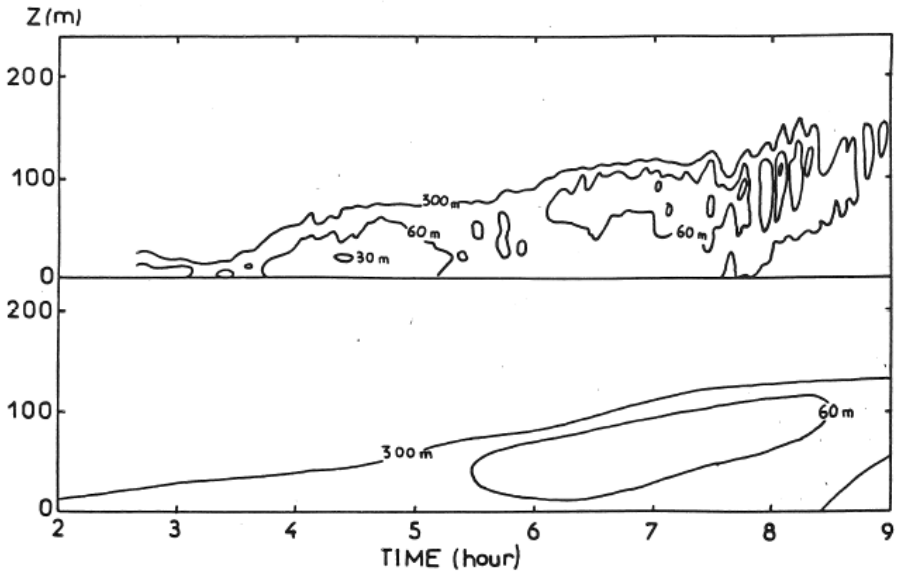


FIG. 3. Time and space variation of visibility for (a) observed and (b) computed with forced ground values.

Sensibilité à la modélisation de la condensation sous maille

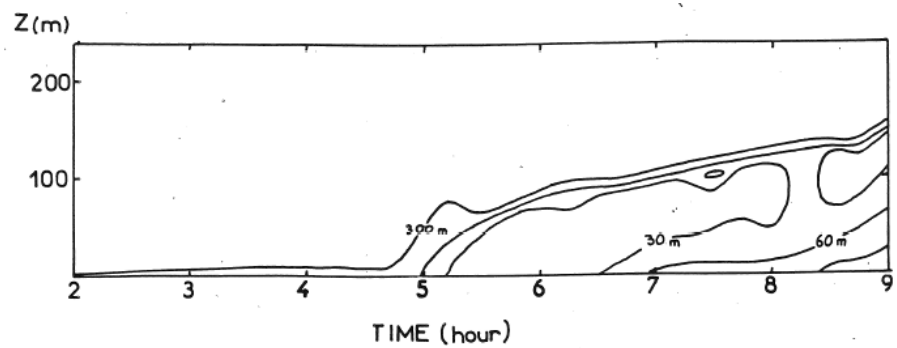
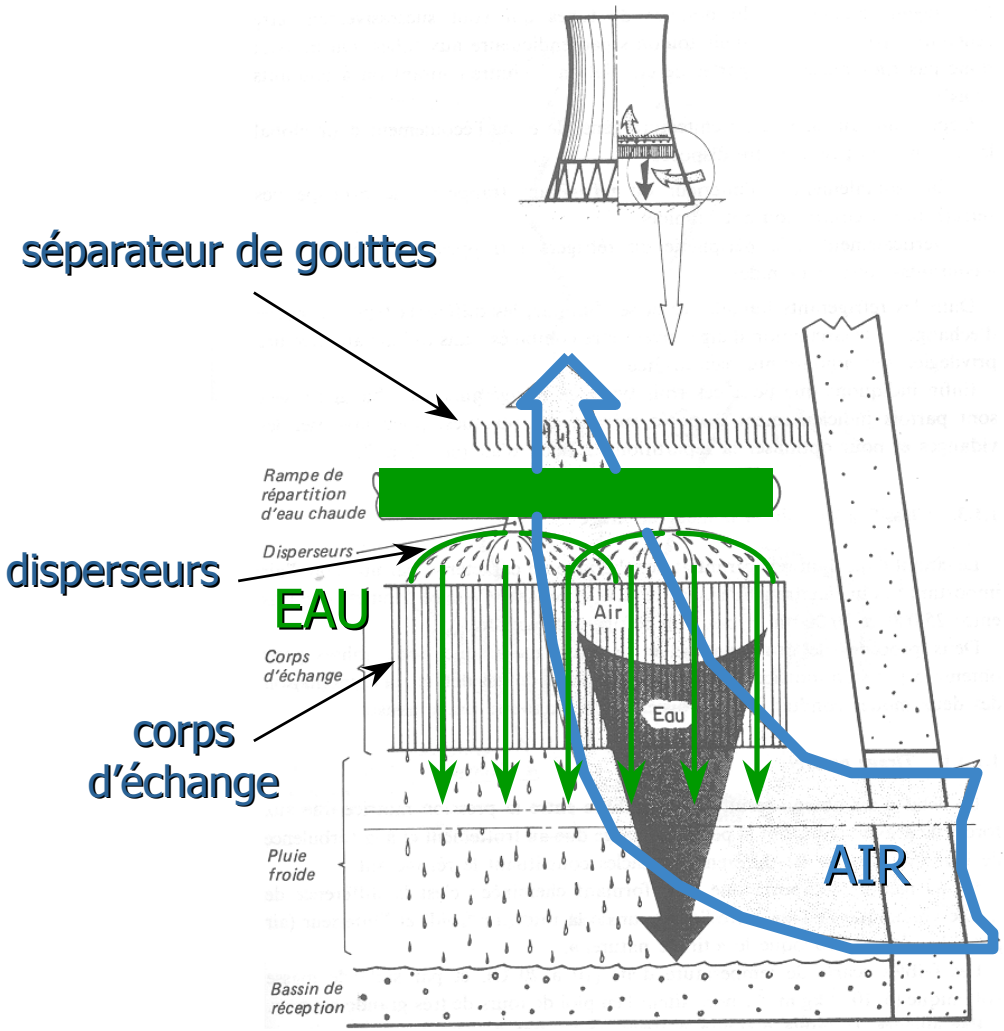
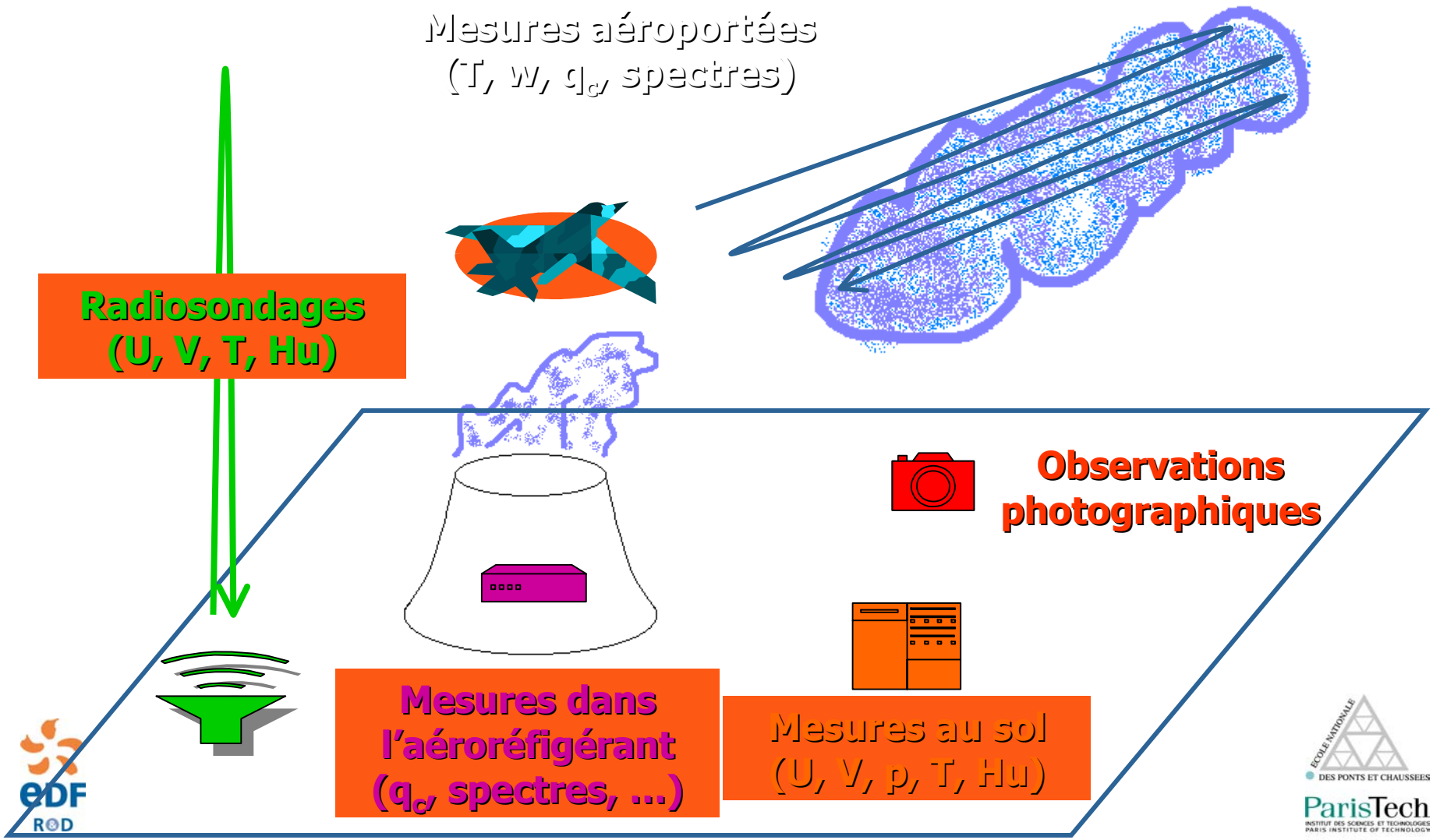


FIG. 15. Time and space variation of visibility computed with the "all or nothing" condensation scheme.

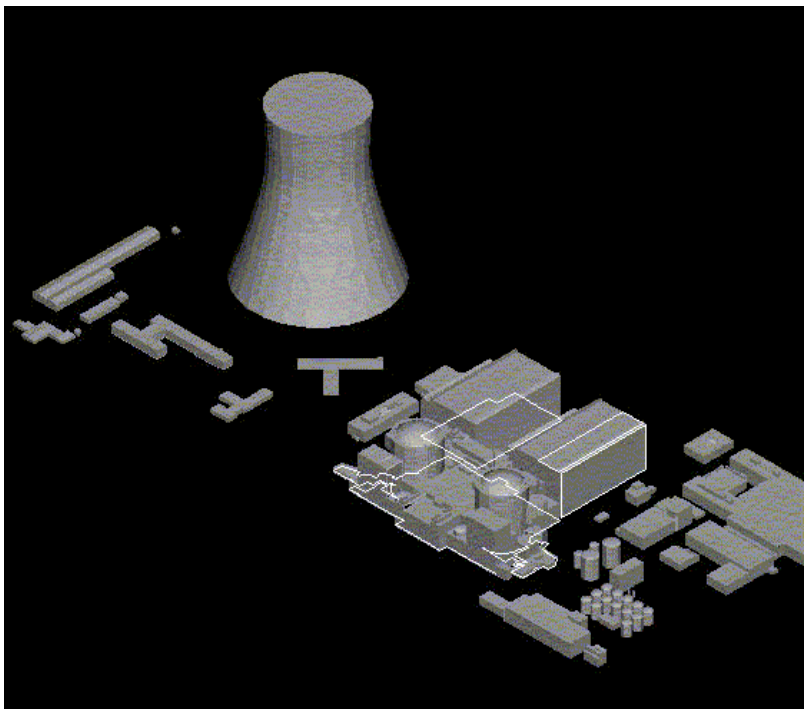
La modélisation des nuages : les panaches d'aéroréfirérants



La modélisation des nuages : les panaches d'aéroréfrigérants, Le Bugey 1980



La modélisation des nuages : les panaches d'aéroréfrigérants, Le Bugey 1980, Code_Saturne



Code de mécanique des fluides : Code _Saturne

- maillage non-structuré

- Équations de Navier et Stokes (U, T, q)

- Volumes finis avec schéma implicite d'Euler en temps

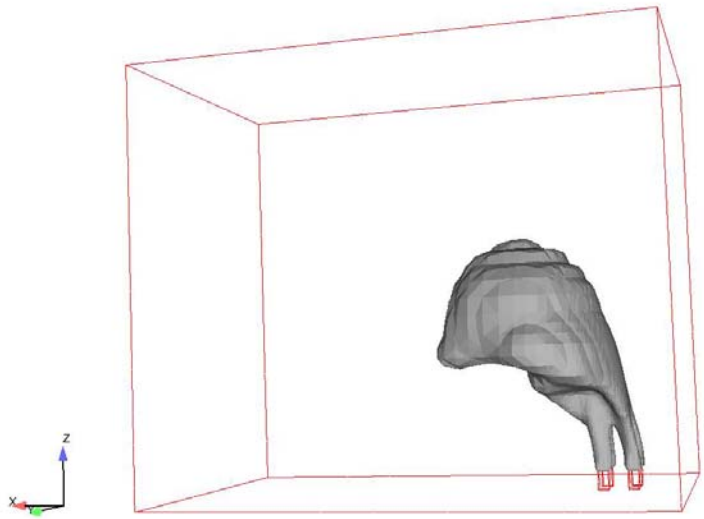
- Modèle de turbulence en k-ε

-Prise en compte de la micro-physique des nuages

N° Tour	θ_l en Kelvin	q_w en kg kg^{-1}	Ng
Tour 1	291,5	0,015572	10 000
Tour 2	291,87	0,016128	10 000
Tour 3	291,5	0,015572	10 000
Tour 4	291,87	0,016128	10 000

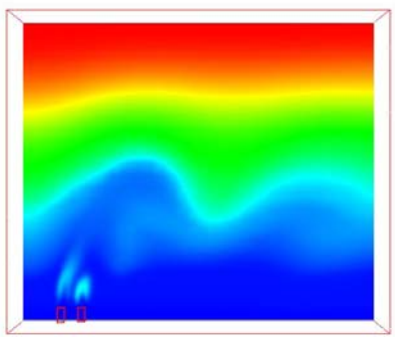
Tableau 1 : Caractéristiques des rejets au niveau des quatre tours simulées

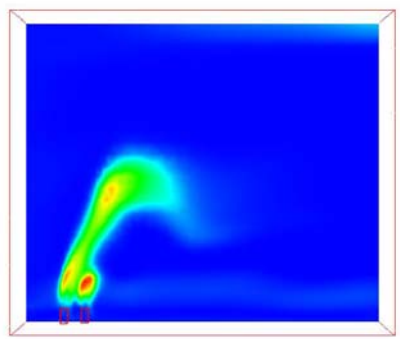
La modélisation des nuages : les panaches d'aéroréfrigérants, Le Bugey 1980, Nuage convectif



Temperature Potentielle Liquide Plan y=778 m

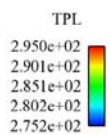
Energie Cinetique Turbulente Plan y=778 m





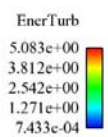
t=3000 sec

MS 1.3.3. reference

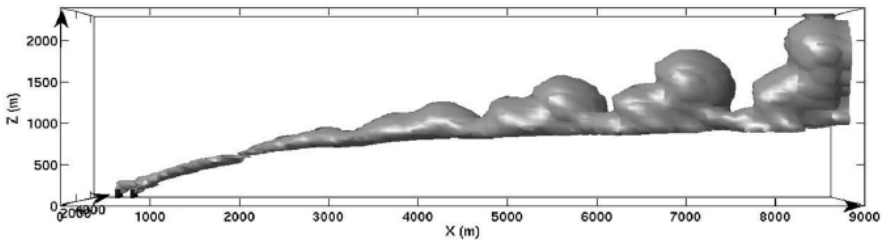


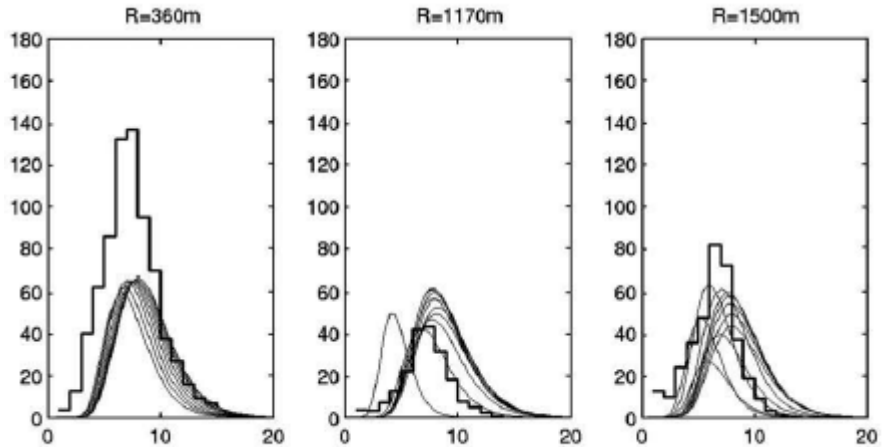
t=3000 sec

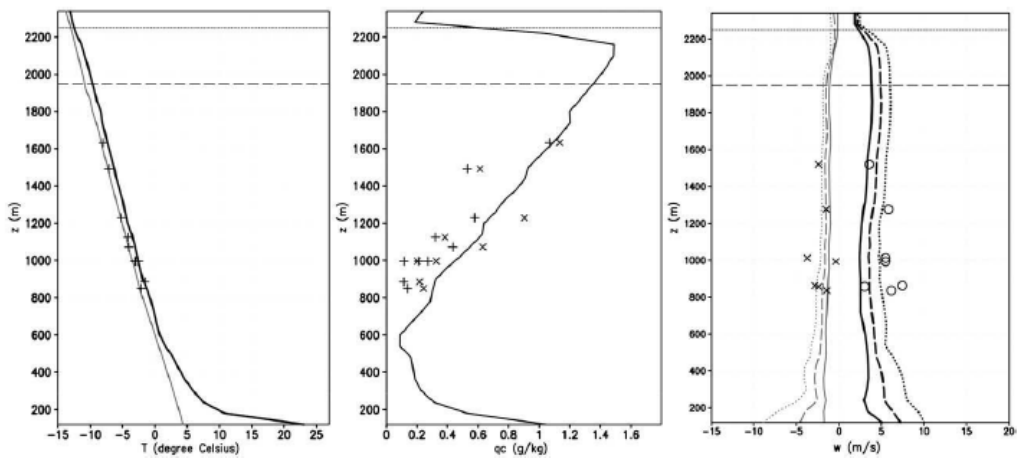
MS 1.3.3. reference



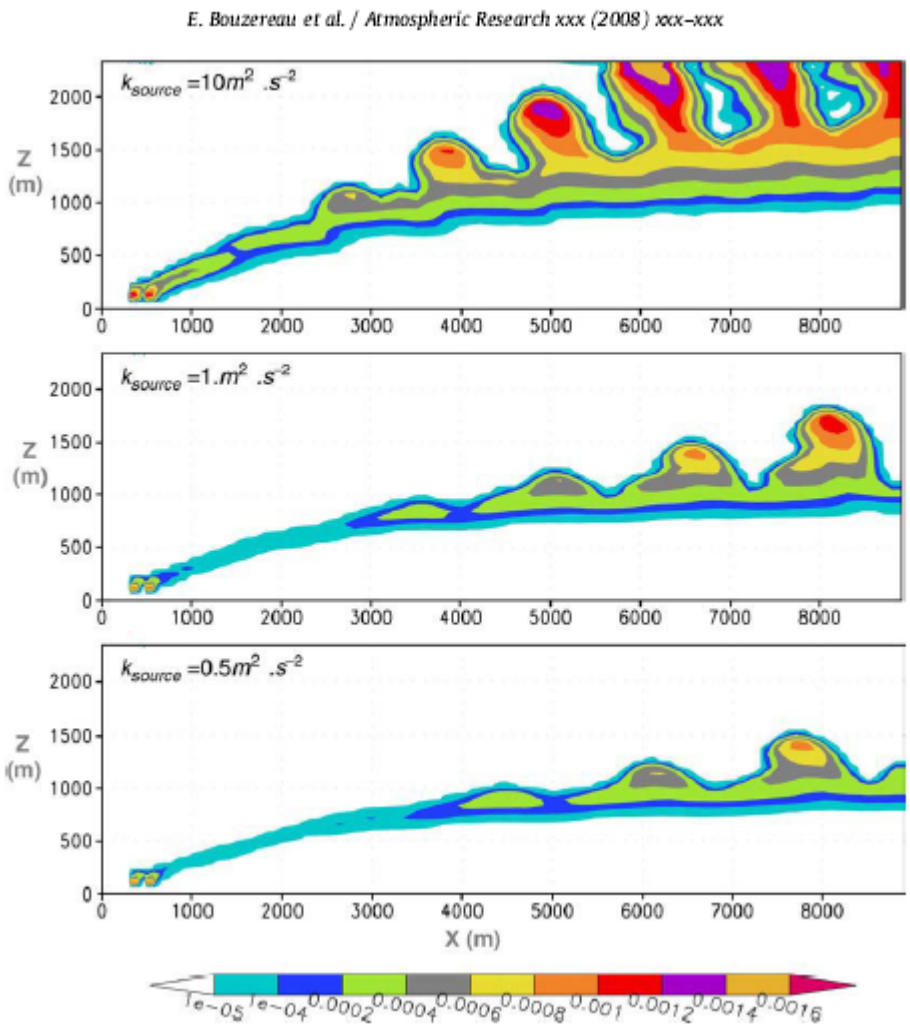
La modélisation des nuages : les panaches d'aéroréfrigérants, Le Bugey 1980, Code_Saturne, situation de vent fort







La modélisation des nuages : les panaches d'aéroréfrigérants, Le Bugey 1980, Code_Saturne



La modélisation des précipitations : les variables utilisées

Précipitation n'est pas portée par la vent

Spectre de gouttes de pluies

Description explicite de la micro-physique trop coûteuse (60 classes)

eau précipitante

$$q_r = \frac{m_r}{m_a + m_v + m_l + m_r}$$

Vitesse de chute

$$\theta_l = \theta - \frac{L}{Cp}\frac{\theta}{T}(q_l + q_r) \qquad q_r = q + q_l + q_r$$

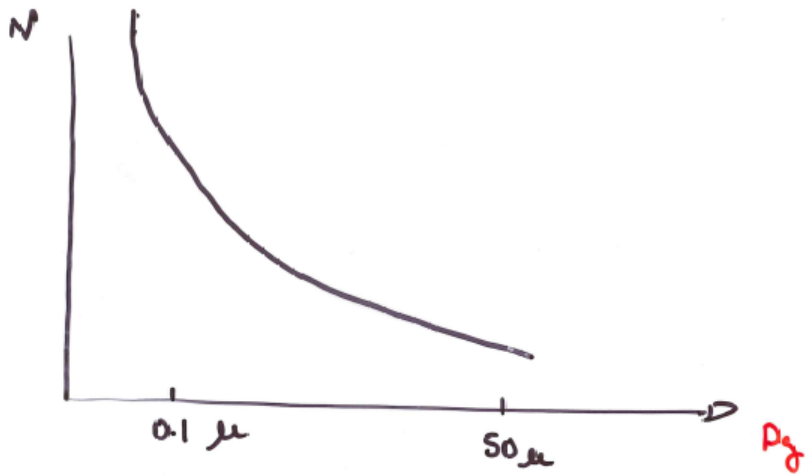
+ une équation d'évolution pour qr

$$\frac{\partial q_r}{\partial t} = -\frac{\partial \overline{w' q'_r}}{\partial z}$$ + auto-conversion + évaporation + accrétion + précipitation

La modélisation des précipitations : la paramétrisation des différents termes

La démarche adoptée: On se donne un spectre de gouttes de pluie:

$N(D_g)=No \exp(-\lambda D_g)$ où D_g est le diamètre des gouttes de pluies et No leur nombre



On raisonne au niveau de la goutte de pluie puis on intègre sur l'ensemble du spectre

$$\frac{\partial q_r}{\partial t} = -\frac{\partial \overline{w' q'_r}}{\partial z} + \frac{\partial \rho\, m_r}{\partial t}$$

Pour un volume unité

auto-conversion

évaporation

accrétion

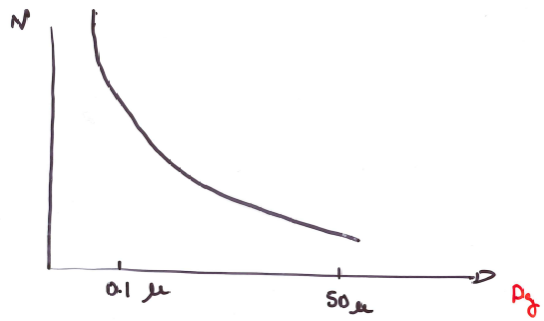
précipitation

La modélisation des précipitations : Relation entre spectre de gouttes de pluie et teneur en eau liquide

$N(D_g)=No \exp(-\lambda D_g)$

$$\rho q_r = m_r = \int_0^{\infty} \rho_l \frac{\pi}{6} D_g^3 \; No \exp\left(-\lambda D_g\right) dD_g$$

Intégration sur le spectre



$\rho\, q_r = \rho_l\ \pi/6\ \ No\ \Gamma(4)\ /\lambda^4$

On peut en déduire la valeur de λ

$\lambda = (\pi No\ \ \rho_l/\rho\ \ 1/q_r)^{1/4}$

La modélisation des précipitations : la paramétrisation de l'autoconversion

Transformation de l'eau nuageuse en eau de pluie

Spectre de gouttes de pluies

Si l'on se donne: N_l le nombre de gouttes de nuage par unité de volume

r_c rayon critique

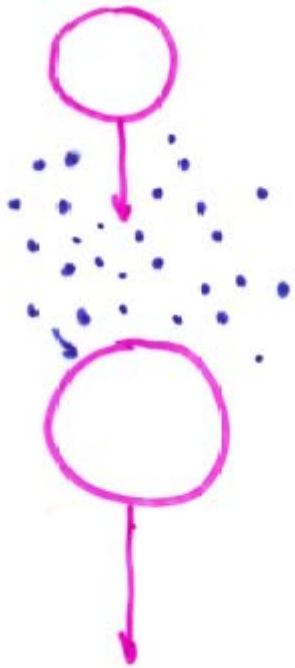
$$q_{ls} = N_l \frac{\rho_l}{\rho} \frac{4}{3} \pi \, r_c^3$$

On peut calculer une valeur limite de la teneur en eau au delà de laquelle il y a précipitation

$$\left(\frac{\partial q_r}{\partial t} \right)_{Au} = \text{Au} \max(0., q_l - q_{ls})$$

En fait, les valeurs typiques sont de l'ordre 3 10^{-4} kg/kg pour q_{ls} et 40 µm pour r_c

La modélisation des précipitations : la paramétrisation de l'accrétion des gouttes de nuage



L'accrétion des gouttes est proportionnelle à :
$V_g=\alpha_g D_g^2$, V_g vitesse de chute des gouttes
$S_g=\pi/4\ D_g^2$, S_g Section impactée

$dm_g/dt= S_g\ V_g\ m_l$

On raisonne au niveau de la goutte

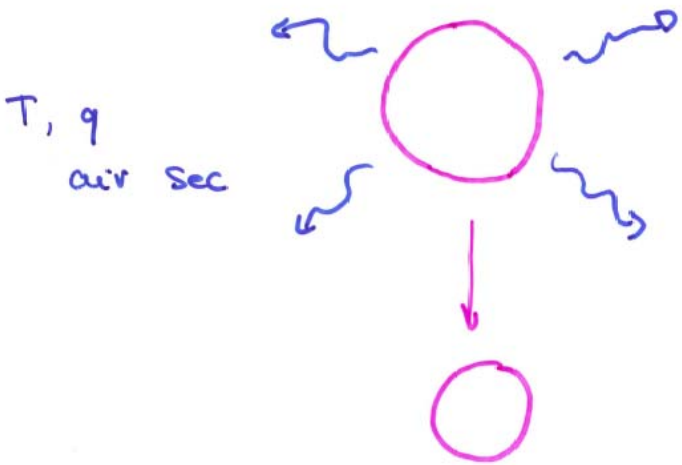
$$\rho\left(\frac{\partial q_r}{\partial t}\right)_{Acc} = \frac{\partial m_r}{\partial t} = \int_0^{\infty} \frac{dm_g}{dt} No \exp\left(-\lambda D_g\right) dD_g$$

Intégration sur le spectre

$$\left(\frac{\partial q_r}{\partial t}\right)_{Acc} = \frac{x_{Acc}}{\rho}\lambda^{3/2} \quad (\rho q_r)^{3/2}$$

On obtient le terme d'accrétion qui est un terme non linéaire

La modélisation des précipitations : la paramétrisation de l'évaporation des gouttes de pluie



L'évaporation des gouttes de pluie sera proportionnelle à :
$q - q_{sat}$, déficit de saturation
D_g^{β}, D_g diamètre des gouttes

$dm_g/dt = -Cte\ D_g^{\beta}\ \rho\ (q_{sat}(T,P) - q)$

On raisonne au niveau de la goutte

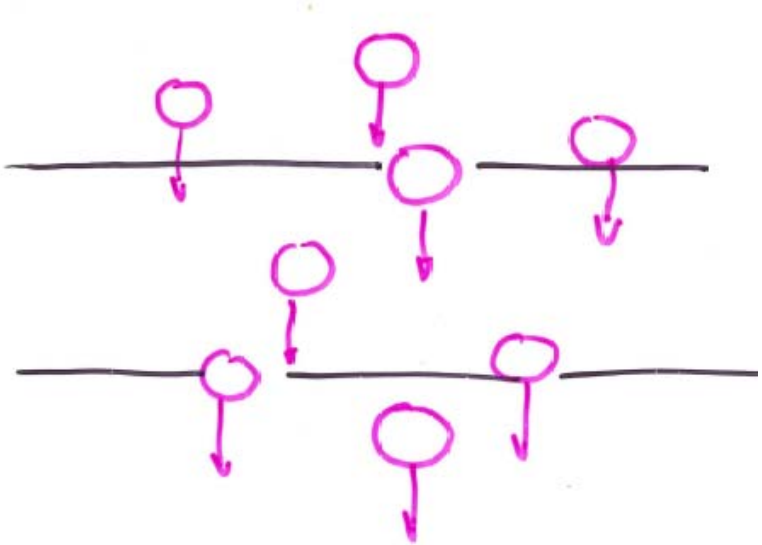
$$\rho\left(\frac{\partial q_r}{\partial t}\right)_{Acc} = \frac{\partial m_r}{\partial t} = \int_0^{\infty} \frac{dm_g}{dt} No \exp\left(-\lambda D_g\right) dD_g$$

Intégration sur le spectre

$$\left(\frac{\partial q_r}{\partial t}\right)_{Ev} = x_{Ev} No\ \rho\ (q_{sat} - q)\ \lambda^{-(1+\beta)/4} \Gamma(1+\beta)$$

On obtient le terme d'évaporation

La modélisation des précipitations : la paramétrisation du flux de précipitation des gouttes de pluie



Le flux de précipitation va dépendre de :
$V_g=-x_g D_g^{\alpha}$, Vitesse de chute des gouttes
m_g, masse des gouttes de pluie

On raisonne au niveau de la goutte

$$V_t m_r = \int_0^{\infty} V_g \ \rho_l \ \frac{\pi}{6} D_g^3 No \exp\left(-\lambda D_g\right) dD_g$$

Apport d'eau précipitante dans la couche en terme de flux ou divergence du flux de précipitation

$$F_{précip} = V_t m_r$$

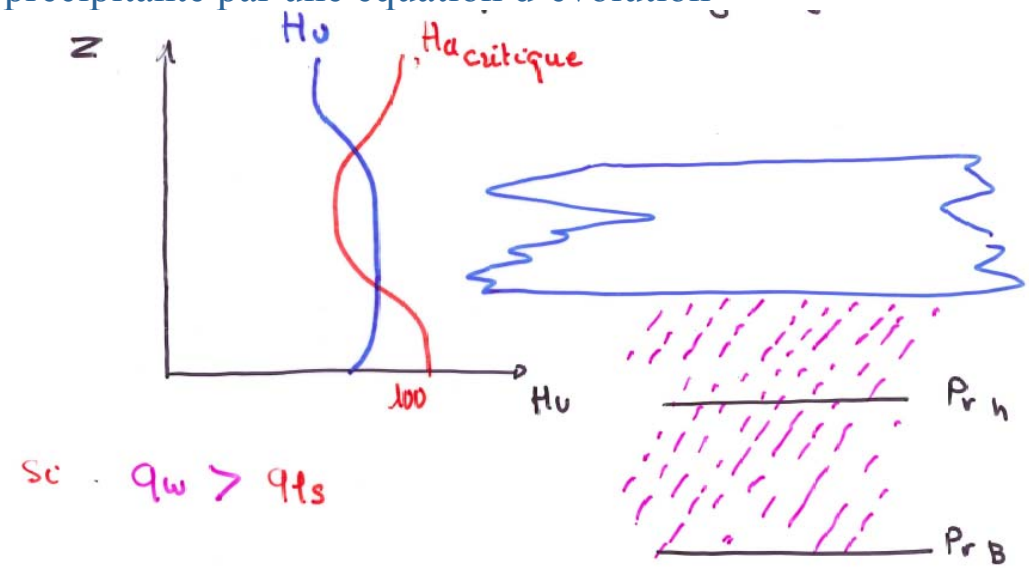
$$\left(\frac{\partial q_r}{\partial t}\right)_{précip} = \frac{\partial F_{précip}}{\partial z}$$

Précipitation au sol

$$F_{précip}(0)$$

La modélisation des précipitations : Paramétrisation simplifiée nuages et précipitations stratiformes

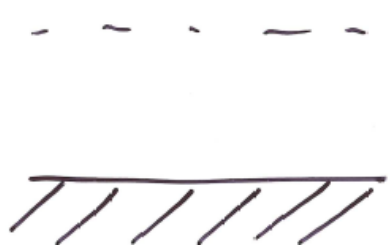
Pour les modèles de climat, les résolutions spatiale et temporelle sont trop faibles pour décrire explicitement l'eau précipitante par une équation d'évolution



Précipitation instantanée: stationnarisation de l'équation d'évolution de q_r, équilibre précipitation - évaporation

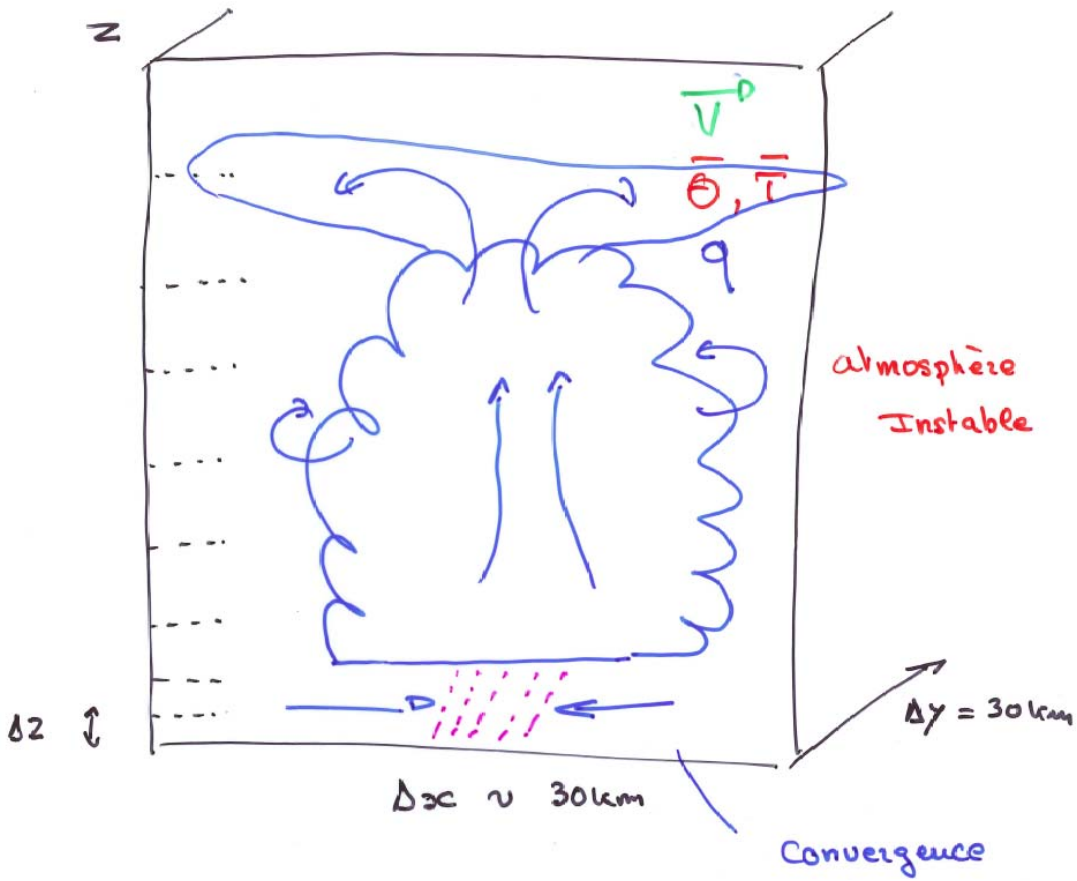
$$\theta \rightarrow \theta - \frac{L}{Cp}\frac{\theta}{T}\frac{P_{rh} - P_{rb}}{\Delta z}$$

$$q \rightarrow \frac{\Delta t}{\rho}\frac{P_{rh} - P_{rb}}{\Delta z}$$



+ ajustement si $q > q_{sat}$

La modélisation des précipitations : Paramétrisation simplifiée nuages et précipitations d'origine convective



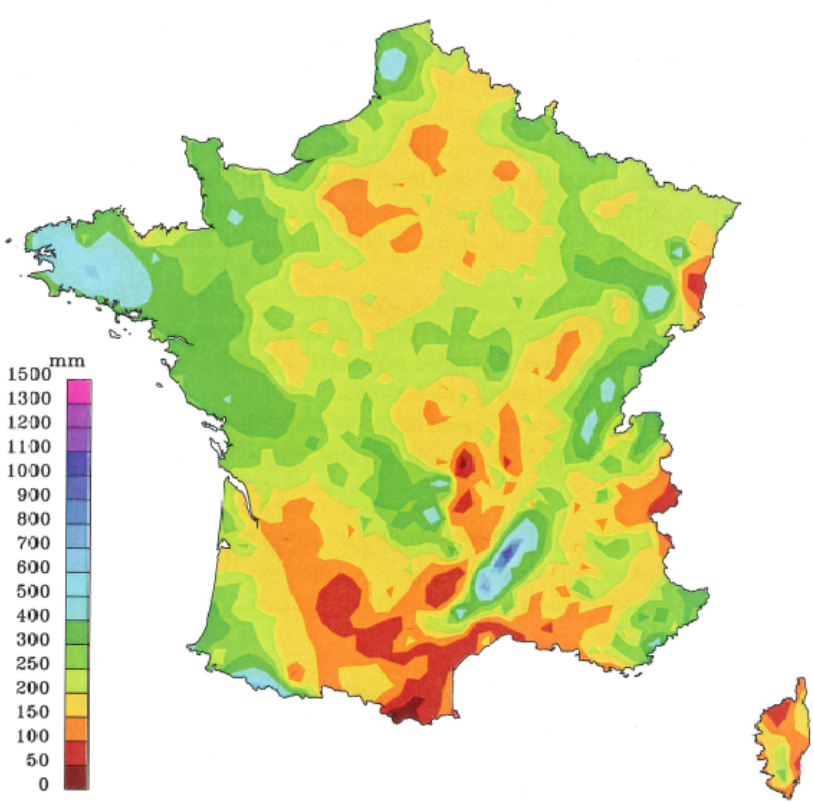
$$\frac{\partial q}{\partial t} + advection = - - - - - - - + \left(\frac{\partial q}{\partial t}\right)_{convection}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + advection = - - - - - - - + \left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right)_{convection}$$

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + advection = - - - - - - - + \left(\frac{\partial \vec{U}}{\partial t}\right)_{convection}$$

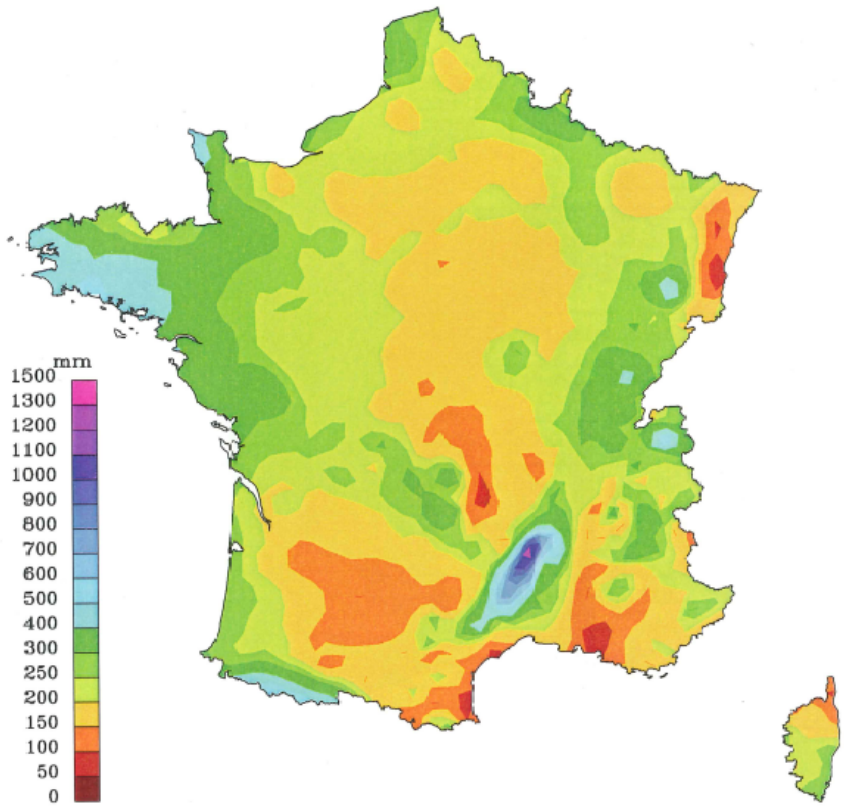
La modélisation des précipitations : Quelques résultats des modèles opérationnels de Météo France

PRECIPITATIONS observées
Cumuls trimestriels (4ème trimestre 2006)



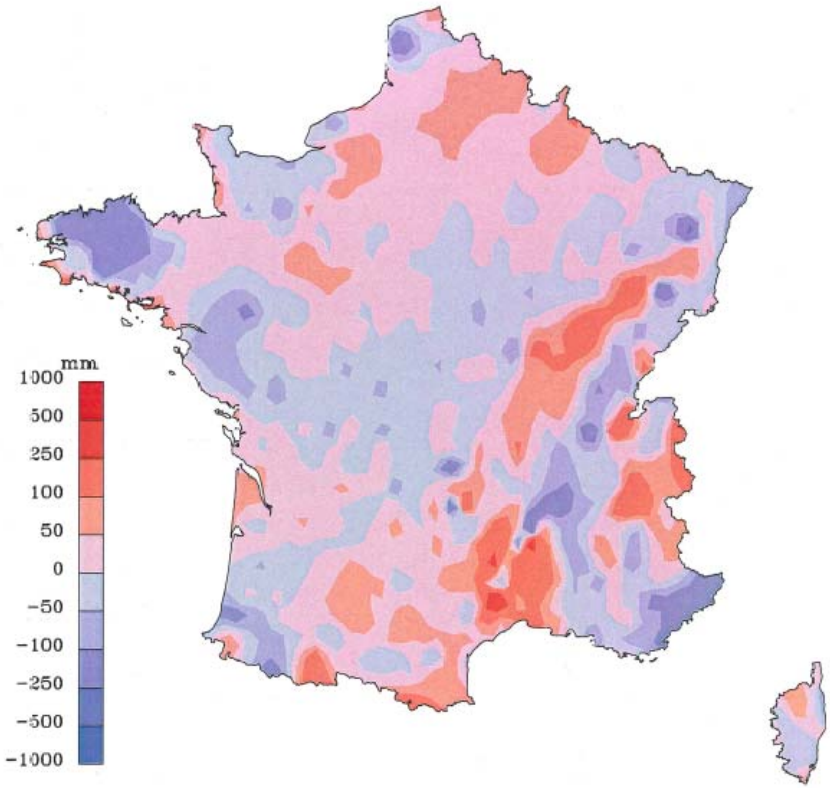
Observations

Cumul des précipitations prévues pour les échéances 06 à 30 h
Cumuls trimestriels (4ème trimestre 2006)

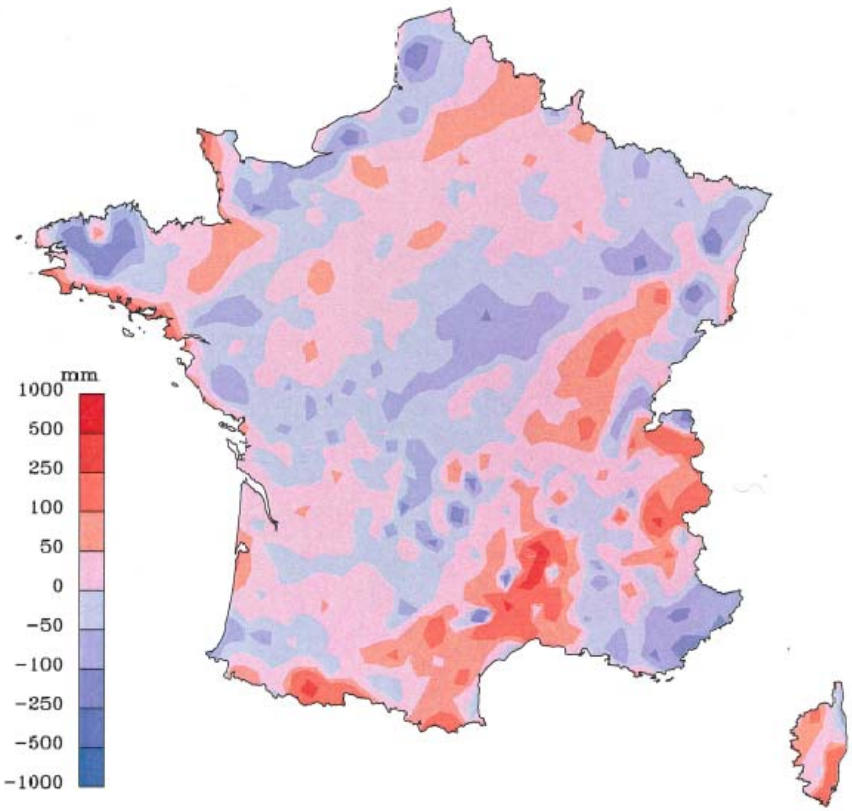


Aladin à 9,5 km de résolution

La modélisation des précipitations : modèles opérationnels de Météo France, sensibilité à la résolution



Arpège à 23 km de résolution



Aladin à 9,5 km de résolution