



**Simulation et prévision de la qualité de l'air  
aux échelles continentale et régionale.**

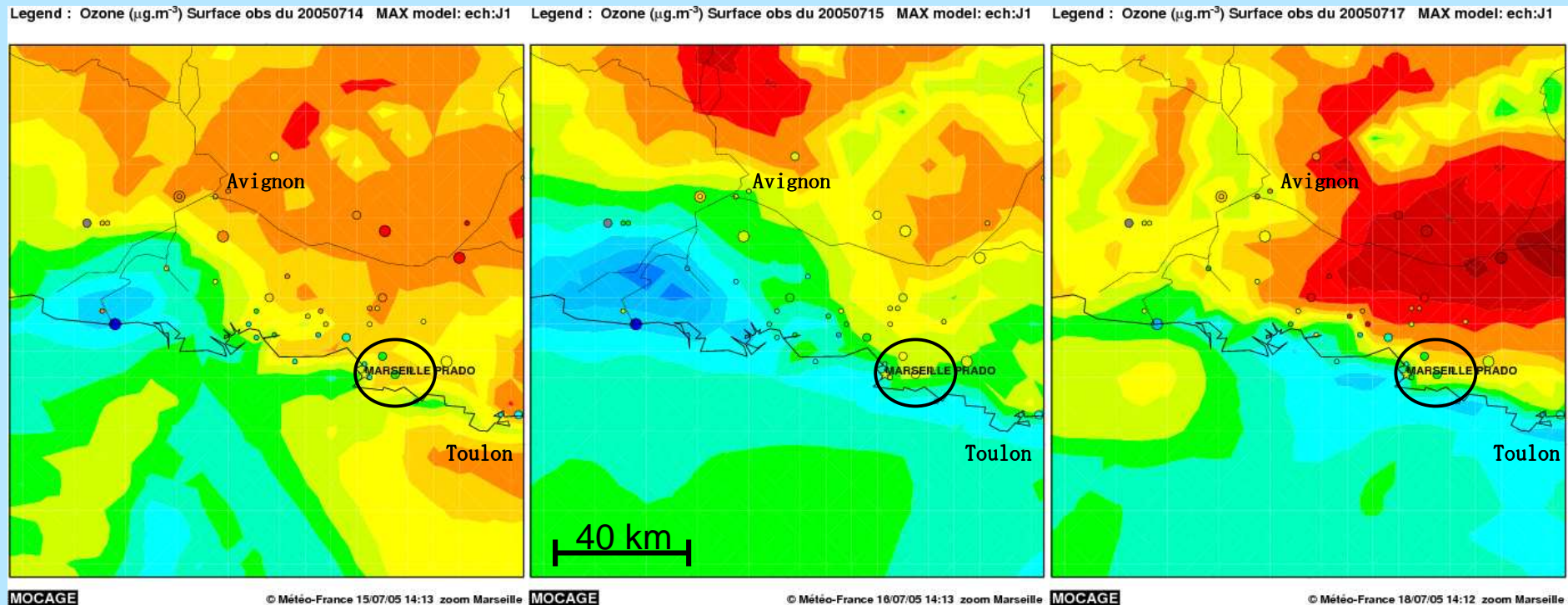
Anne Dufour

Directeur de thèse : V.-H. Peuch

**C**entre **N**ational de **R**echerches **M**étéorologiques

GMGEC/CARMA

# Qualité de l'air : un problème local ...

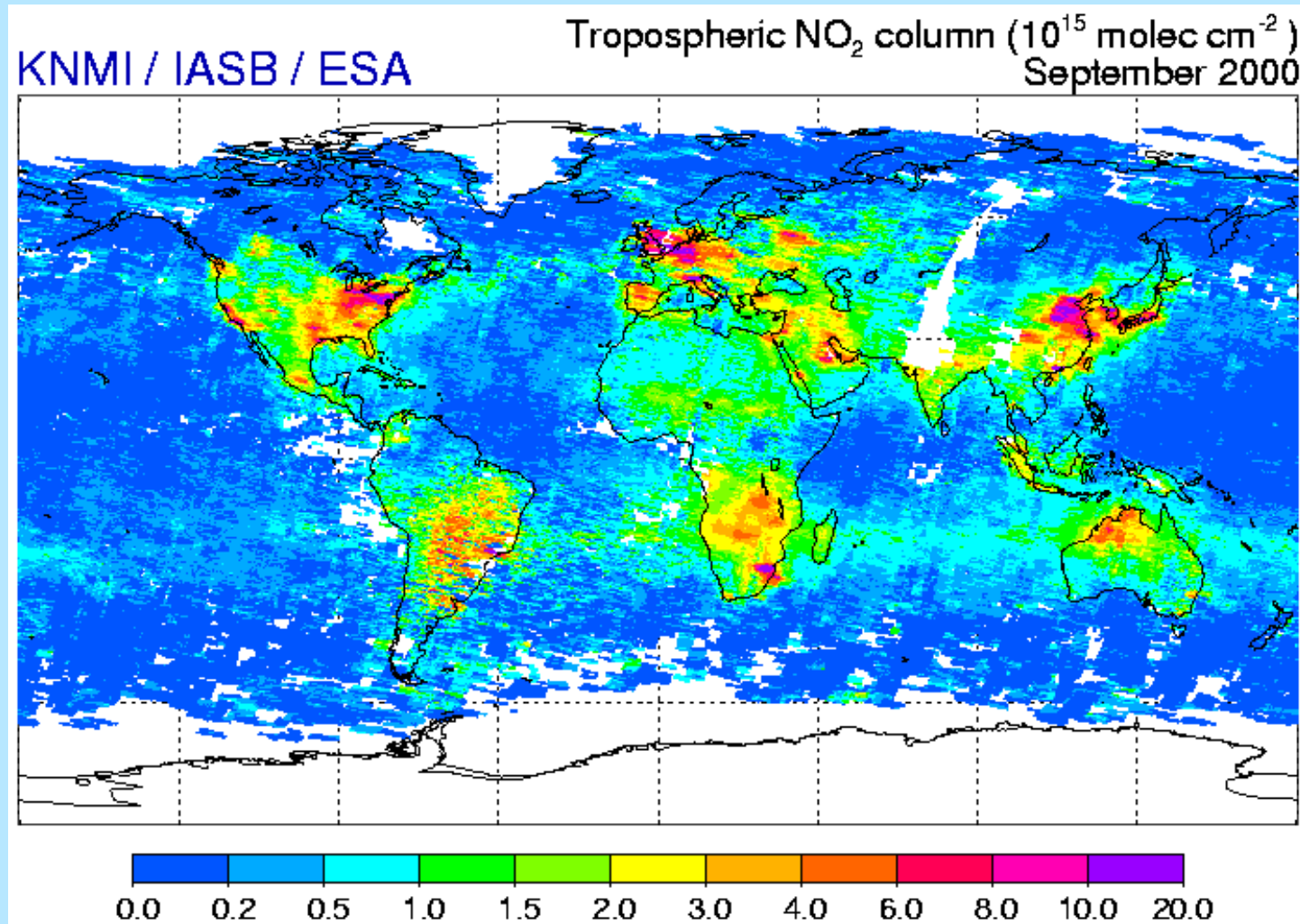


## Qualité de l'air:



Episode de pollution à l'ozone en PACA  
14 au 17 juillet 2006  
Observations BASTER et Prévisions MOCAGE

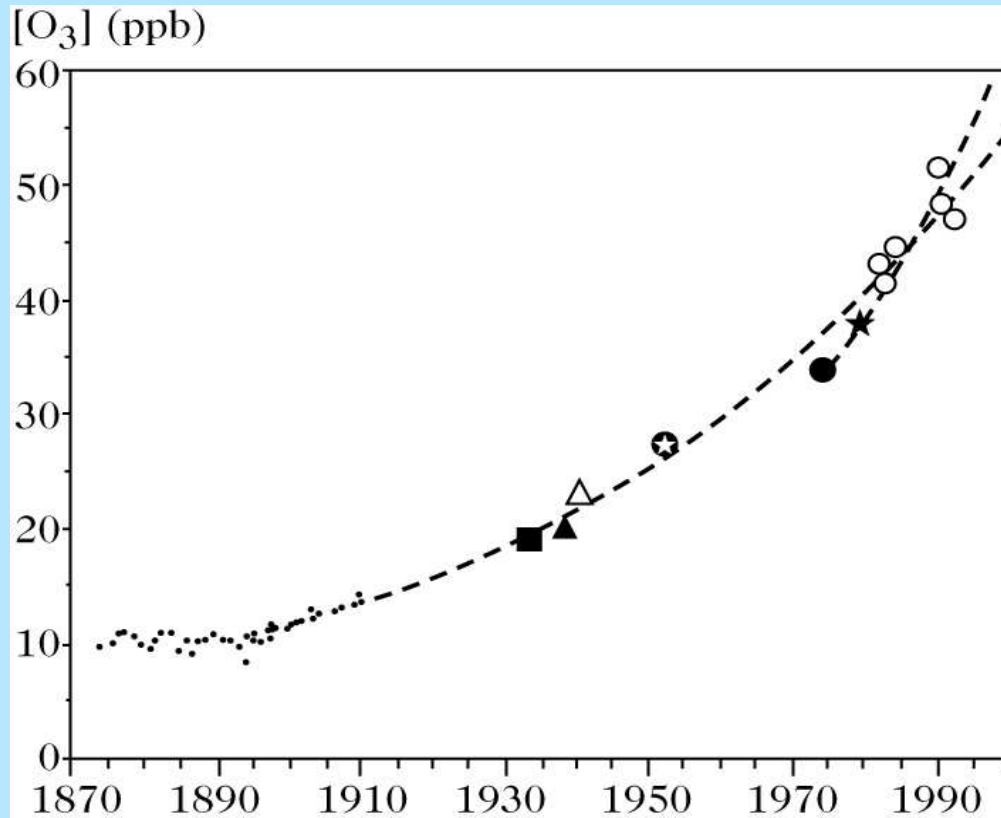
# Qualité de l'air : un problème local et planétaire



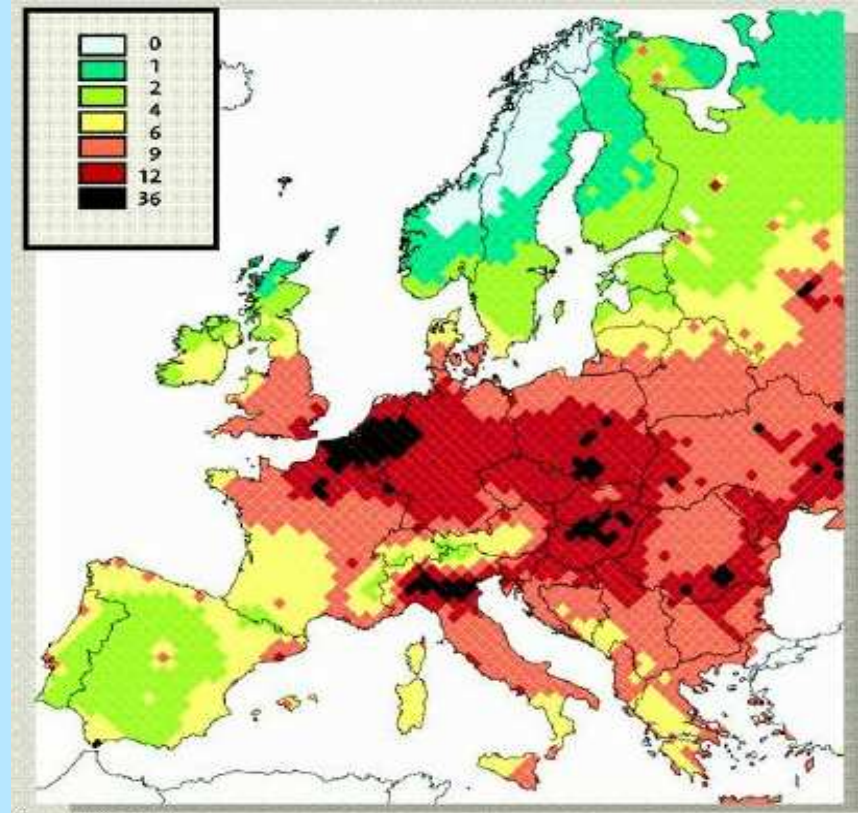
Mesures Spatiales de colonnes troposphériques de dioxyde d'azote  
Instrument européen GOME



# Qualité de l'air : aujourd'hui ...



Augmentation des niveaux de fond  
d'ozone en Europe  
Marenco, CNRS/LA



**Impact sanitaire**  
Diminution de l'espérance de vie  
par la pollution de l'air  
Union Européenne



# Qualité de l'air : ...et demain

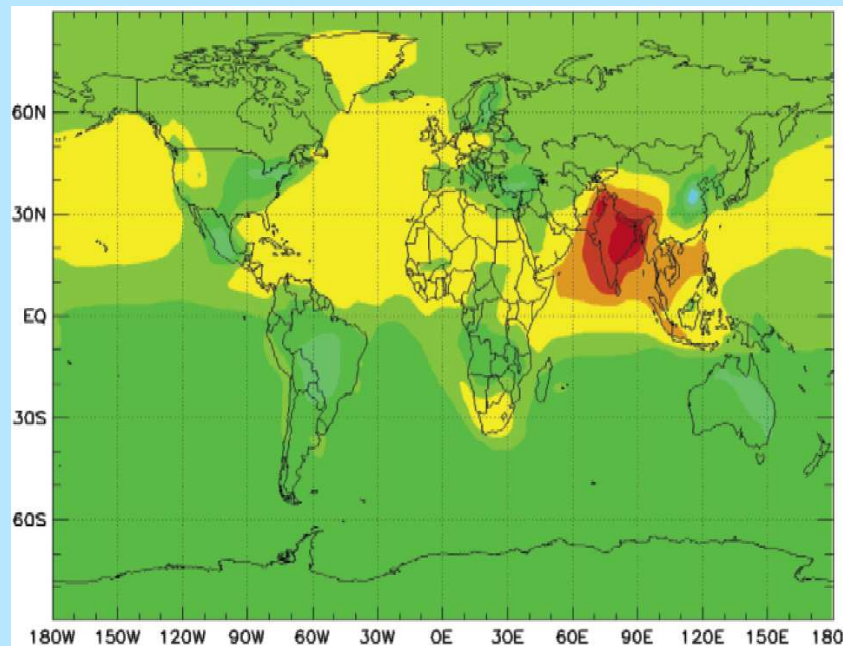
## Projections futures en fonction de scénarii d'émissions

Moyenne annuelle de concentrations d'ozone en surface (en ppbv)

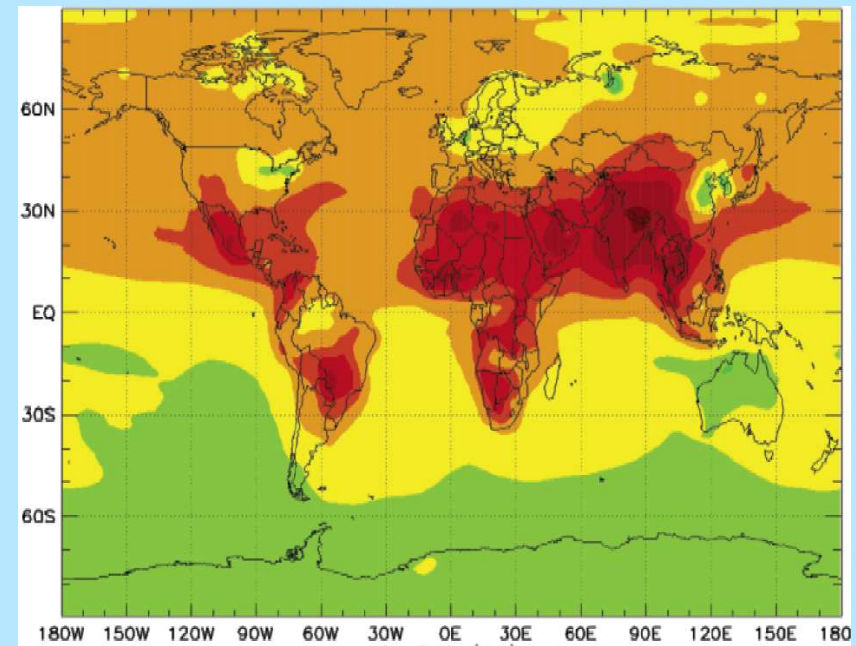
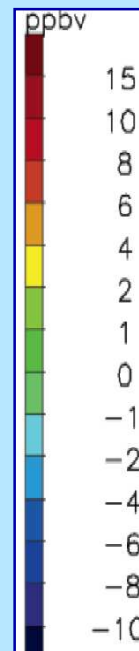
26 modèles utilisés

Source : ACCENT, 2006

Différences des moyennes  
entre 2030 et 2000



Scénario médian



Scénario pessimiste

# La modélisation chimique à Météo-France

- 1980 : MOBIDIC [Cariolle, 1982]  
2D – stratosphère / prescription des modèles de climat
- 1990 : REPROBUS [Lefèvre et al, 1994]  
3D - basse stratosphère / climat et études des hautes latitudes
- 1998 : MOCAGE [Peuch et al, 1999]  
3D – basse stratosphère **et** troposphère
  - ✓ Étude des interactions entre chimie et climat
  - ✓ Prévision déterministe de la qualité de l'air
  - ✓ Assimilation de données chimiques in-situ et télédéfectées

# **Le modèle MOCAGE :** **description de la version utilisée**

**Météorologie : modèles météorologiques opérationnels  
en mode analyse et prévision**

Variables : Pression, Température, Humidité et Vent

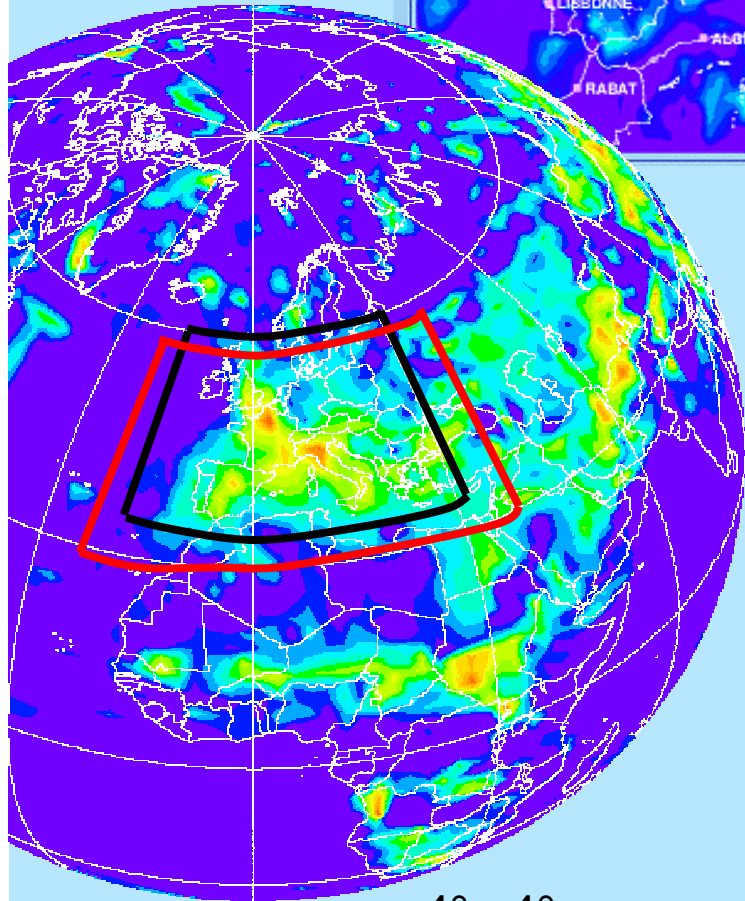
**Extension horizontale : couverture globale et grilles imbriquées**



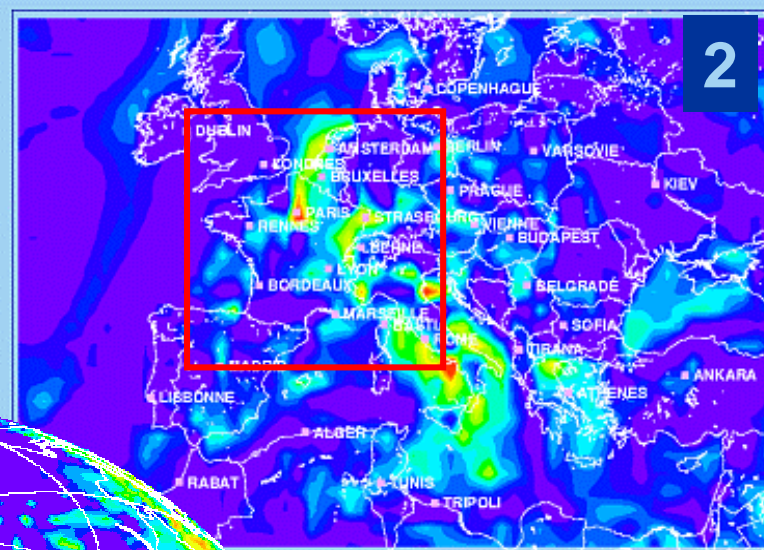
# Le modèle MOCAGE :

Domaines  
Imbriqués

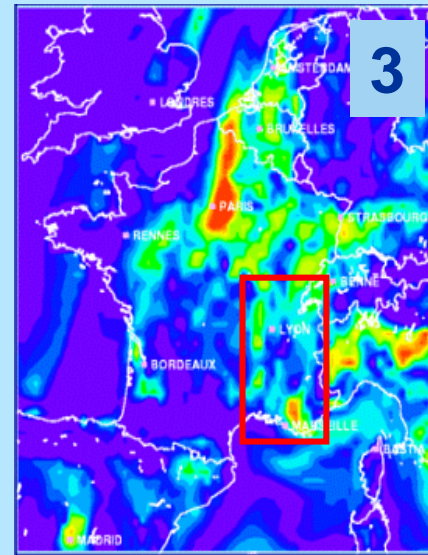
2°x 2°



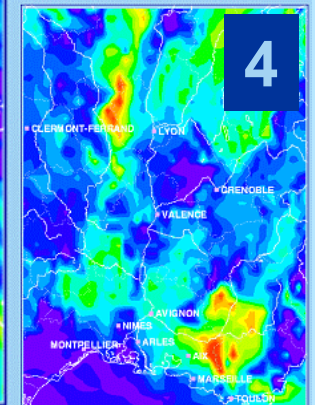
4°x 4°



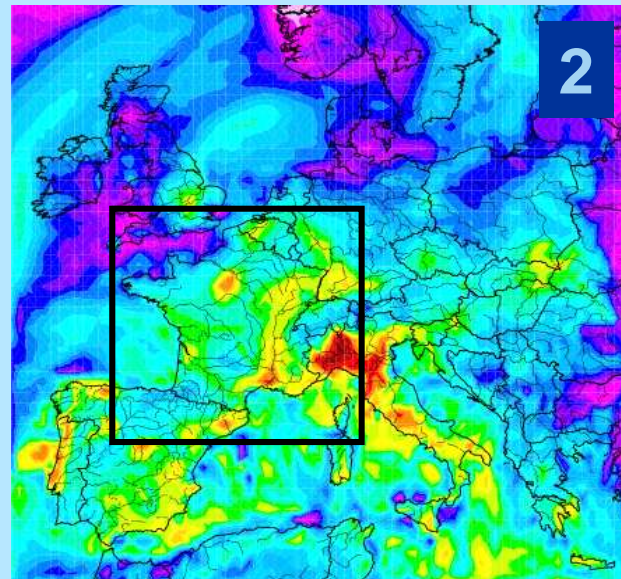
1°x 1°



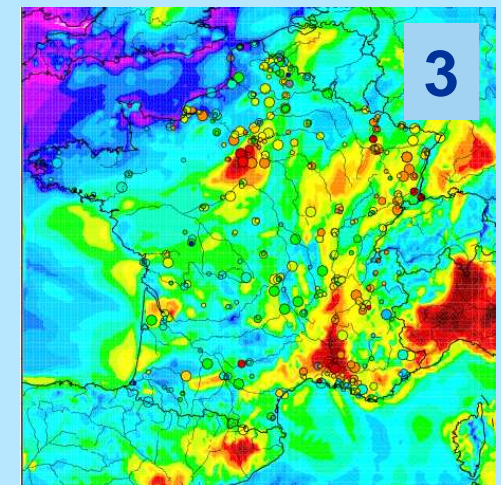
0.25°x 0.25°



0.08°x 0.08°



0.5°x 0.5°



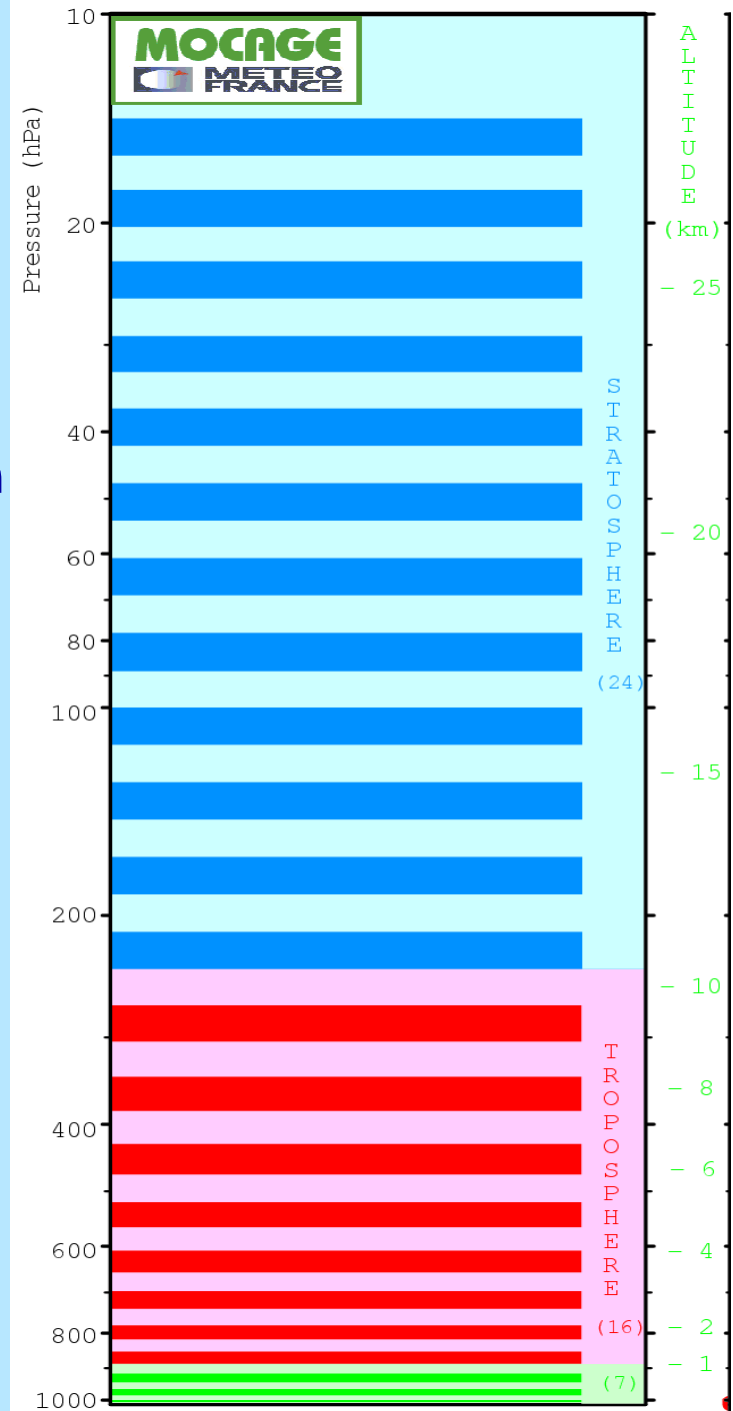
0.1°x 0.1°

# Le modèle MOCAGE : description de la version

**Météorologie : modèles météorologiques  
en mode analyse et prévision**

**Extension horizontale : couverture globale  
et grilles imbriquées**

**Extension verticale : du sol à 5 hPa  
47 niveaux  
dont 7 dans la couche limite**



# Le modèle MOCAGE : processus

Lefèvre, 1991  
Teyssède, 1994

Chimie du chlore, du brome et réactions  
hétérogènes sur les nuages polaires

Photolyses  
f(nébul, col. O<sub>3</sub>)

Cathala, 2004

Advection (transport par le  
vent de grande échelle) et  
sédimentation

Lessivage

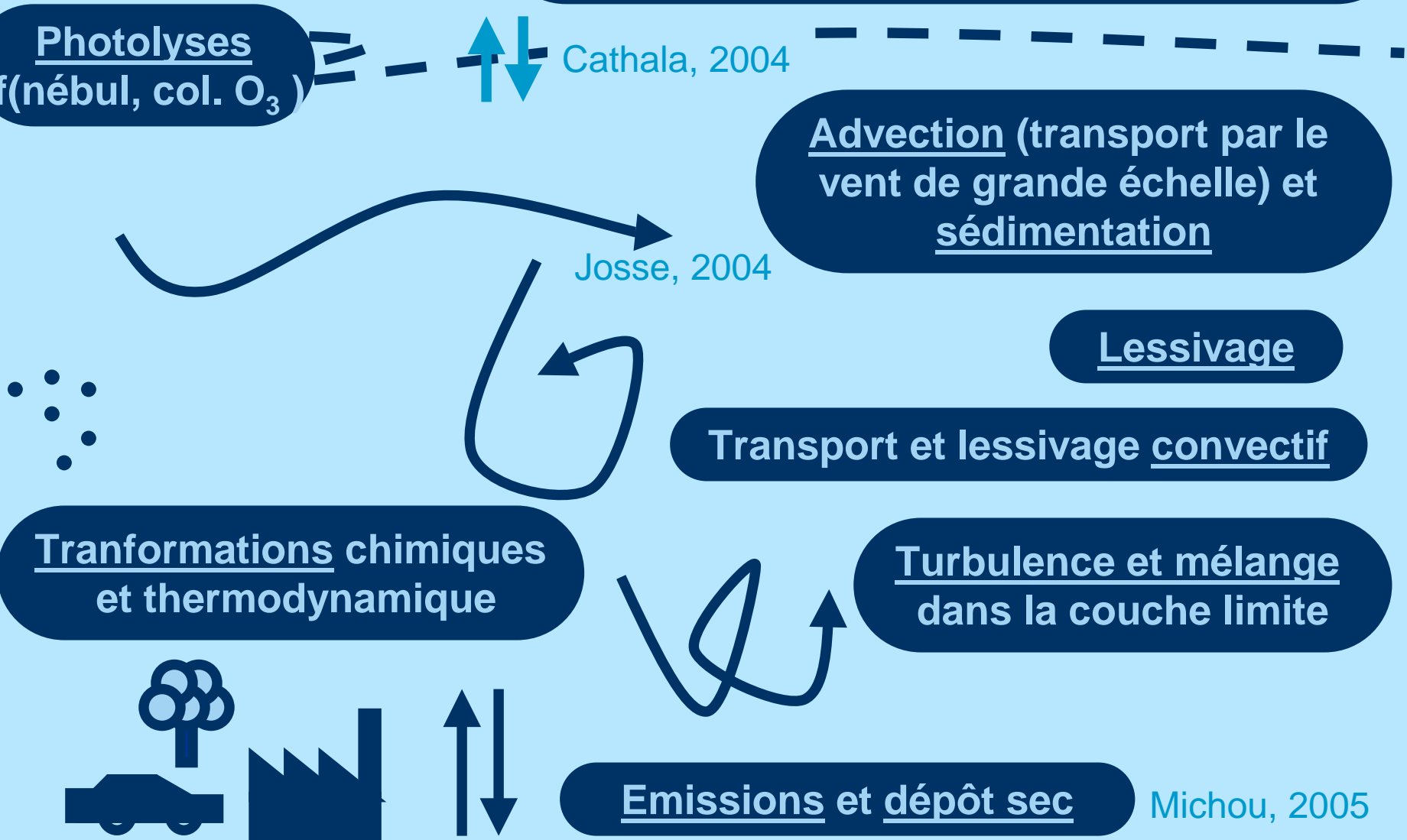
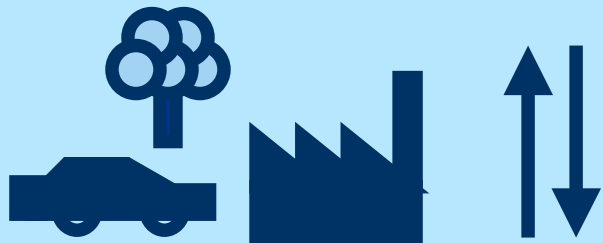
Transport et lessivage convectif

Tranformations chimiques  
et thermodynamique

Turbulence et mélange  
dans la couche limite

Emissions et dépôt sec

Michou, 2005





# Contexte de la thèse

**1998-2001** Campagne ESQUIF (région Ile-de-France)

**2000-2001** Campagne ESCOMPTE (région PACA)

**fin 1998** Initiation du projet MOCAGE à Météo-France

**2001-2002** Projet de recherche PIONEER

**2003** Création de la plate-forme nationale de prévisions chimiques PREV'AIR

**2005** Passage en opérationnel de MOCAGE

# Objectifs de la thèse

**Mettre en place une configuration du modèle pour la prévision de la pollution photochimique aux échelles continentale et régionale**

**Développer une méthodologie de validation basée sur :**

- la reproduction du comportement moyen
- la reproduction de la variabilité
- la reproduction des évènements extrêmes

✓ **Campagnes de mesures**

vision approfondie mais ponctuelle

✓ **Séries de mesures plus longues**

représentativité des résultats

# Plan de l'exposé

- I- Introduction générale et  
présentation du projet MOCAGE
- II- Exploitation de la campagne ESCOMPTE
- III- Les prévisions du « temps chimique »
- IV- Liens entre chimie et météorologie
- V- Conclusions et Perspectives



# Plan de l'exposé

I- Introduction générale et  
présentation du projet MOCAGE

II- Exploitation de la campagne ESCOMPTE

**Objectif :**

exploiter la base de données tridimensionnelles afin  
d' **évaluer le réalisme des simulations**

- comparaison aux mesures
- sensibilité du système au cadastre d'émission

# ESCOMPTE

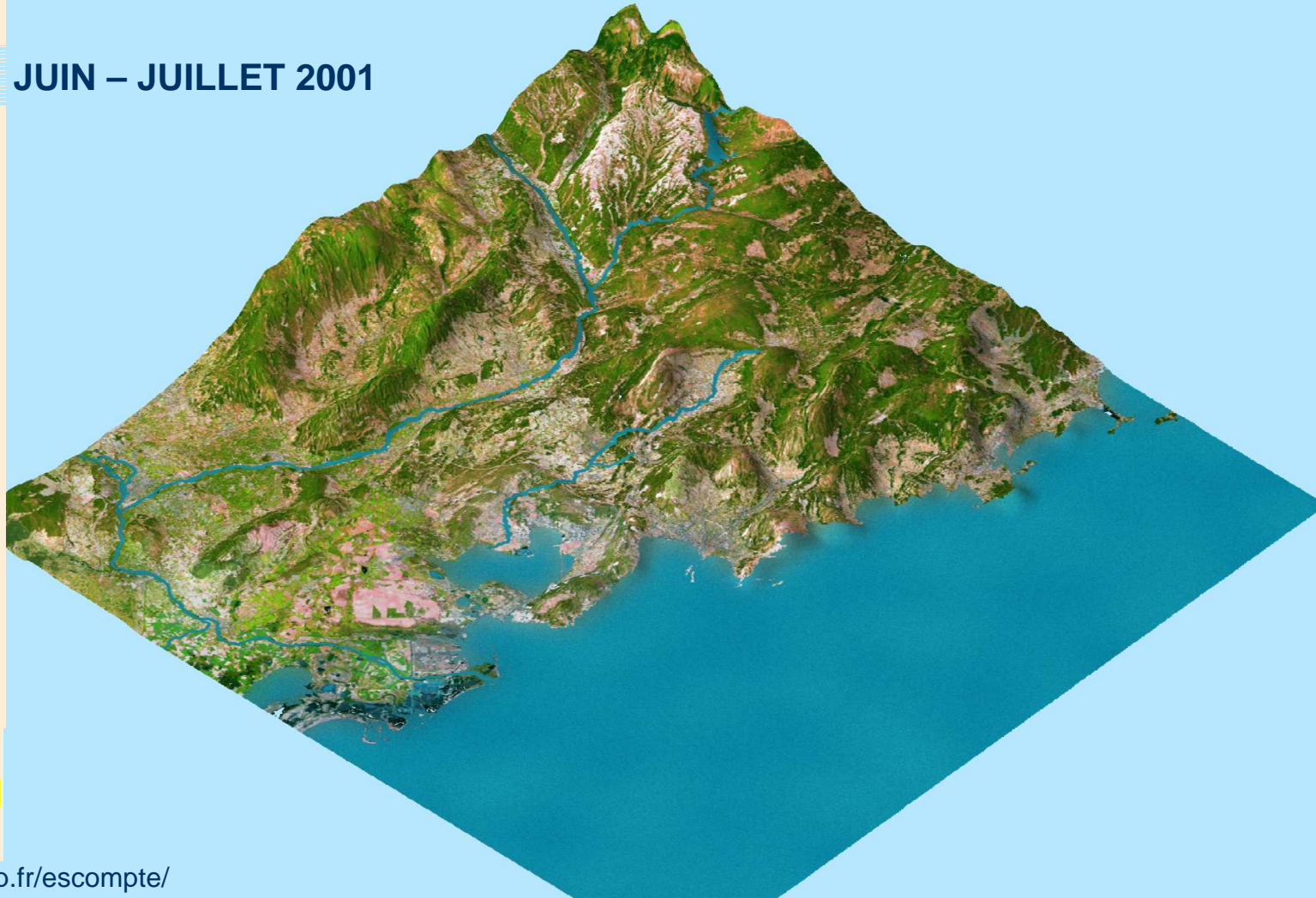


COORDINATION REGIONALE  
pour la surveillance de la qualité de l'air  
de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur



## Etude sur Site pour Contraindre les Modèles de Pollution et de Transfert des Emissions

JUIN – JUILLET 2001



# ESCOMPTE



ADEME

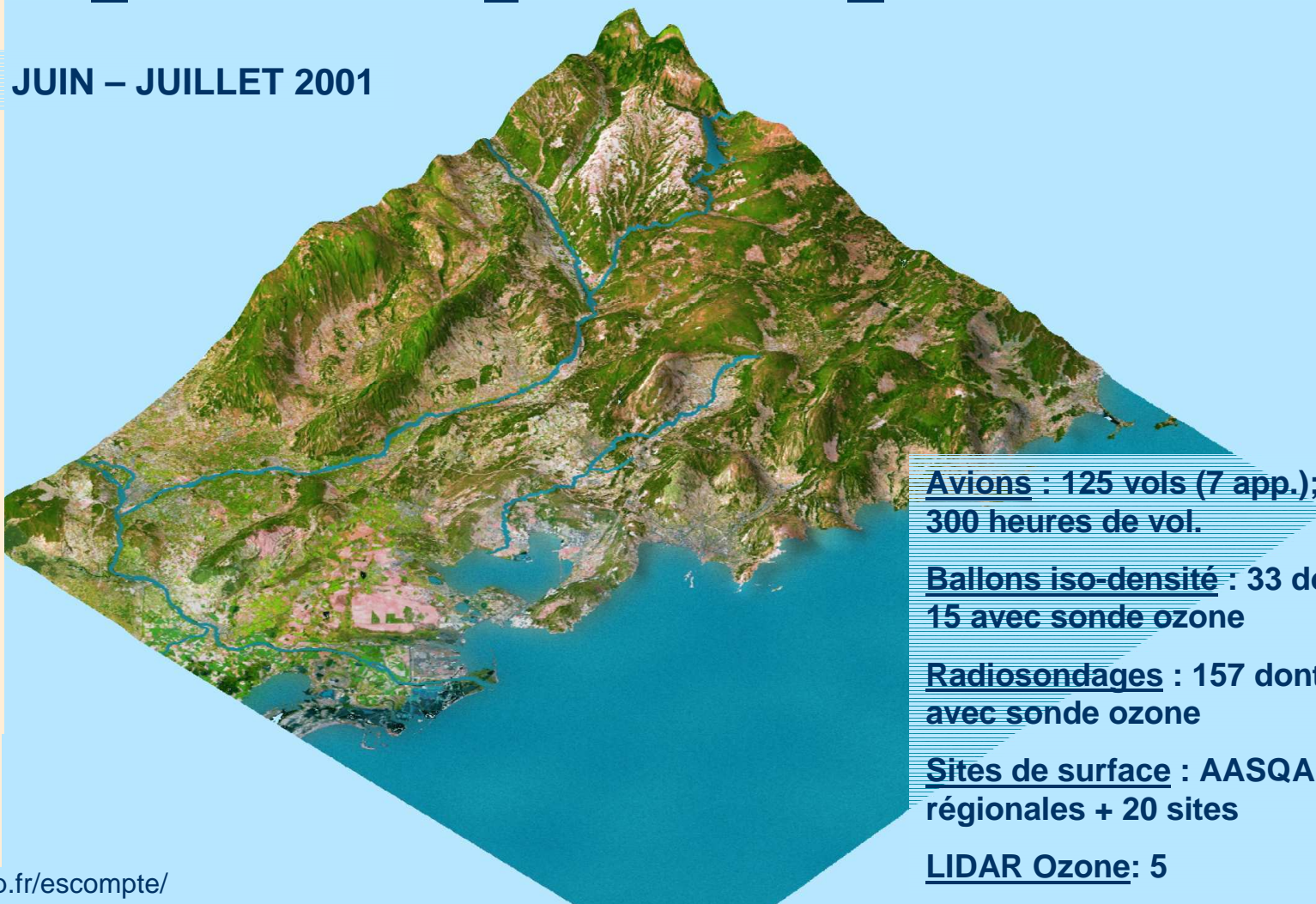


COORDINATION REGIONALE  
pour la surveillance de la qualité de l'air  
de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur



## Etude sur Site pour Contraindre les Modèles de Pollution et de Transfert des Emissions

JUIN – JUILLET 2001



Avions : 125 vols (7 app.);  
300 heures de vol.

Ballons iso-densité : 33 dont  
15 avec sonde ozone

Radiosondages : 157 dont 15  
avec sonde ozone

Sites de surface : AASQA  
régionales + 20 sites

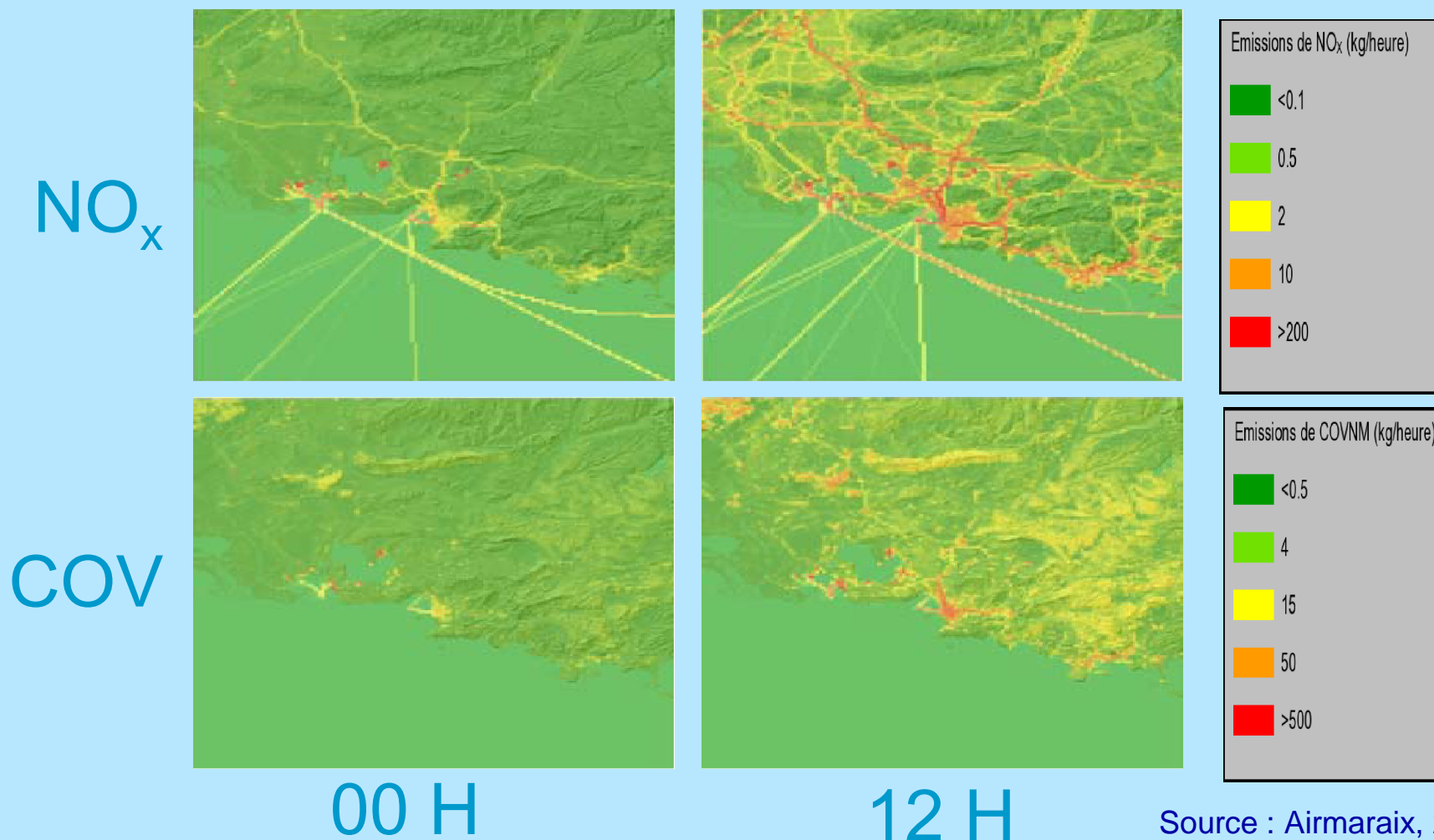
LIDAR Ozone: 5

ESCOMPTE  
ESCOMPTE



# ESCOMPTE : cadastre d'émissions

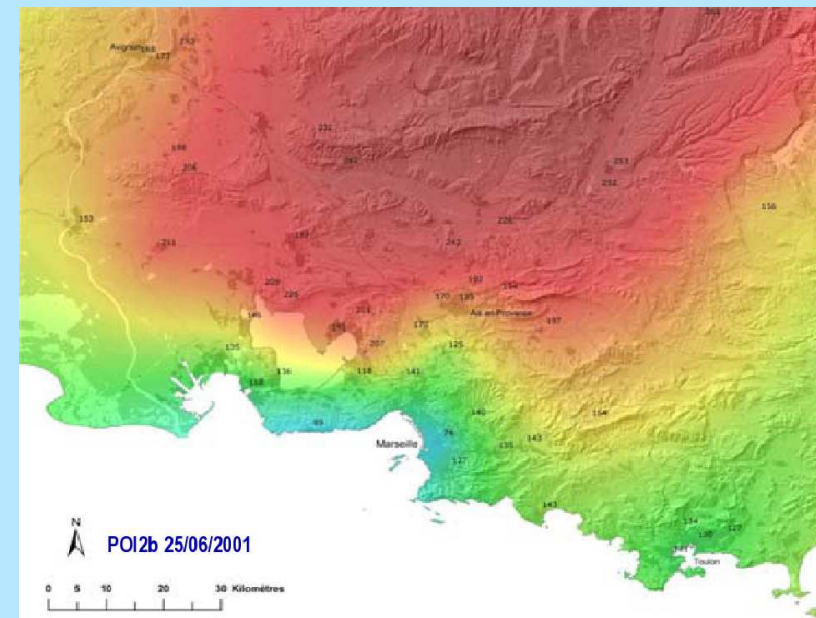
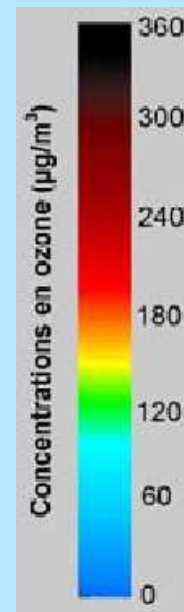
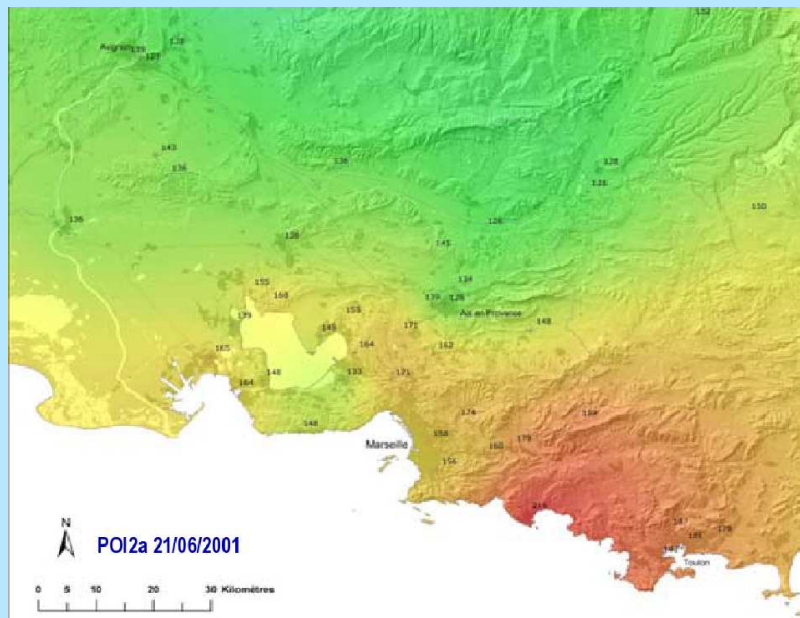
## Polluants primaires



Source : Airmaraix, 2005

# ESCOMPTE

## L'Ozone : polluant secondaire



Source : Airmaraix, 2005

Cartographie des observations  
Maxima journalier d'ozone

# ESCOMPTE : configurations utilisées

**Chimie : RACMOBUS** ( RACM [Stockwell, 1997] + REPROBUS [Lefèvre, 1994] )

## **Configuration des domaines géographiques :**

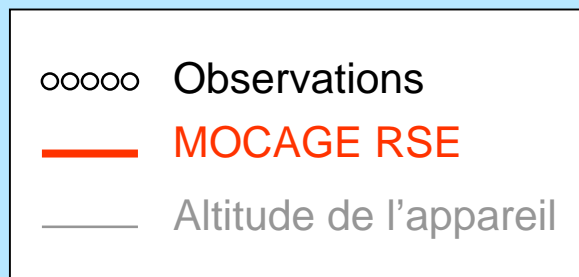
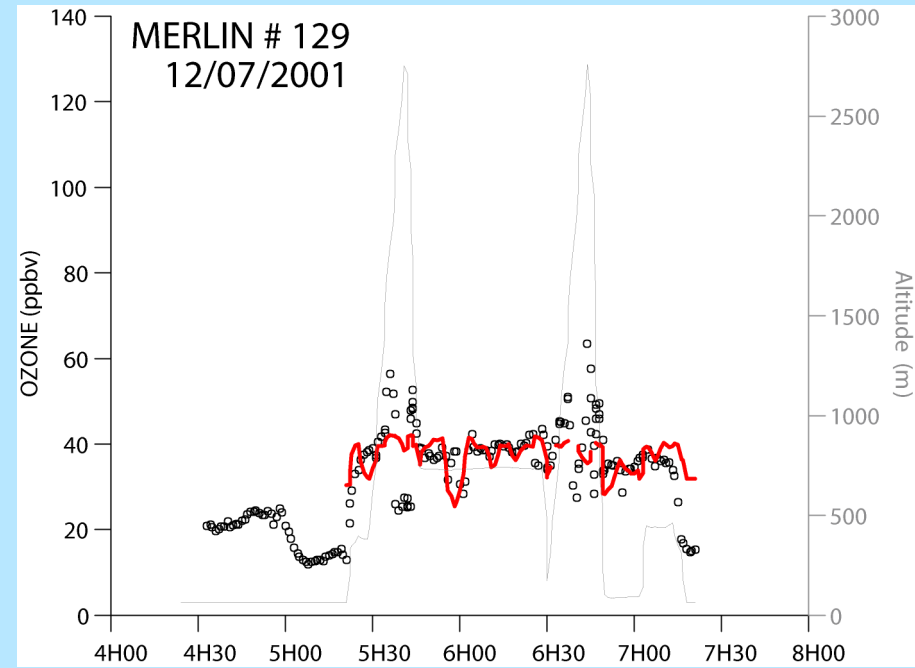
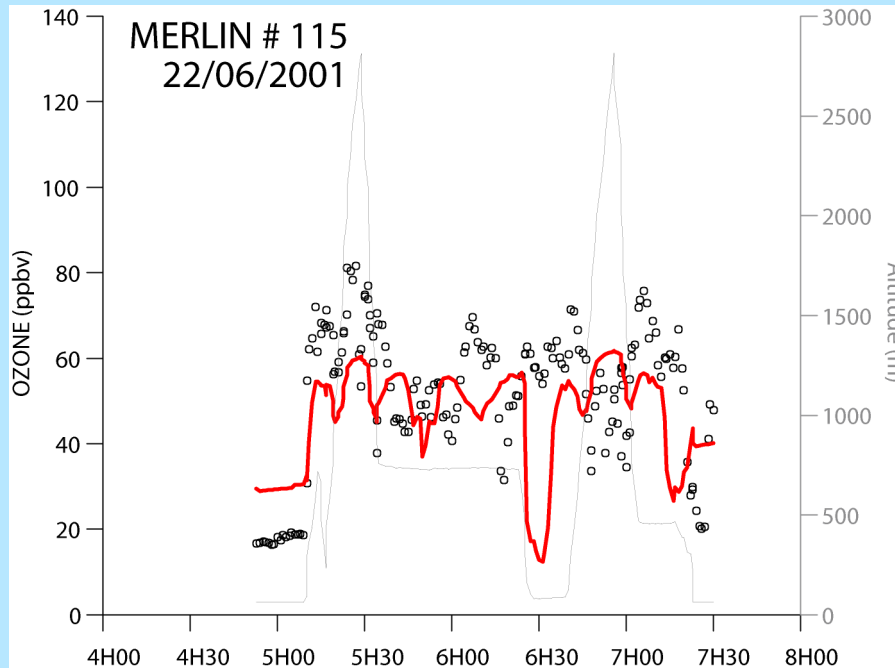
- 4 domaines : Globe (2°) Europe (1°) France (0,2 5°) et Région SE (0,08°)

## **Inventaires d'émissions :**

- Global : GEIA/EDGAR (1°- base : annuelle)
- Régional : GENEMIS (0.05°- horaire, base : journée d'été « typique »)
- Spécifique : ESCOMPTE (0.01°- horaire, base : jour considéré)

# ESCOMPTE : exploitation des observations

## Données aéroportées : niveaux de fond

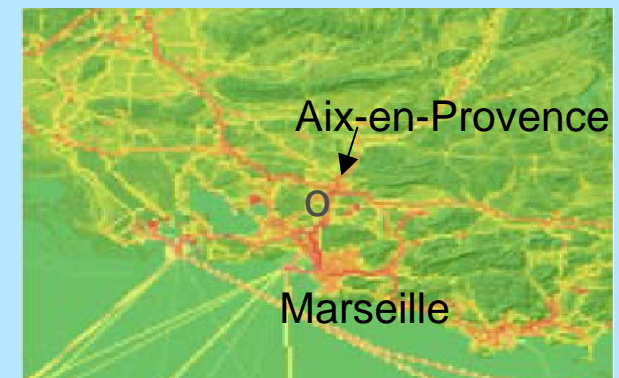
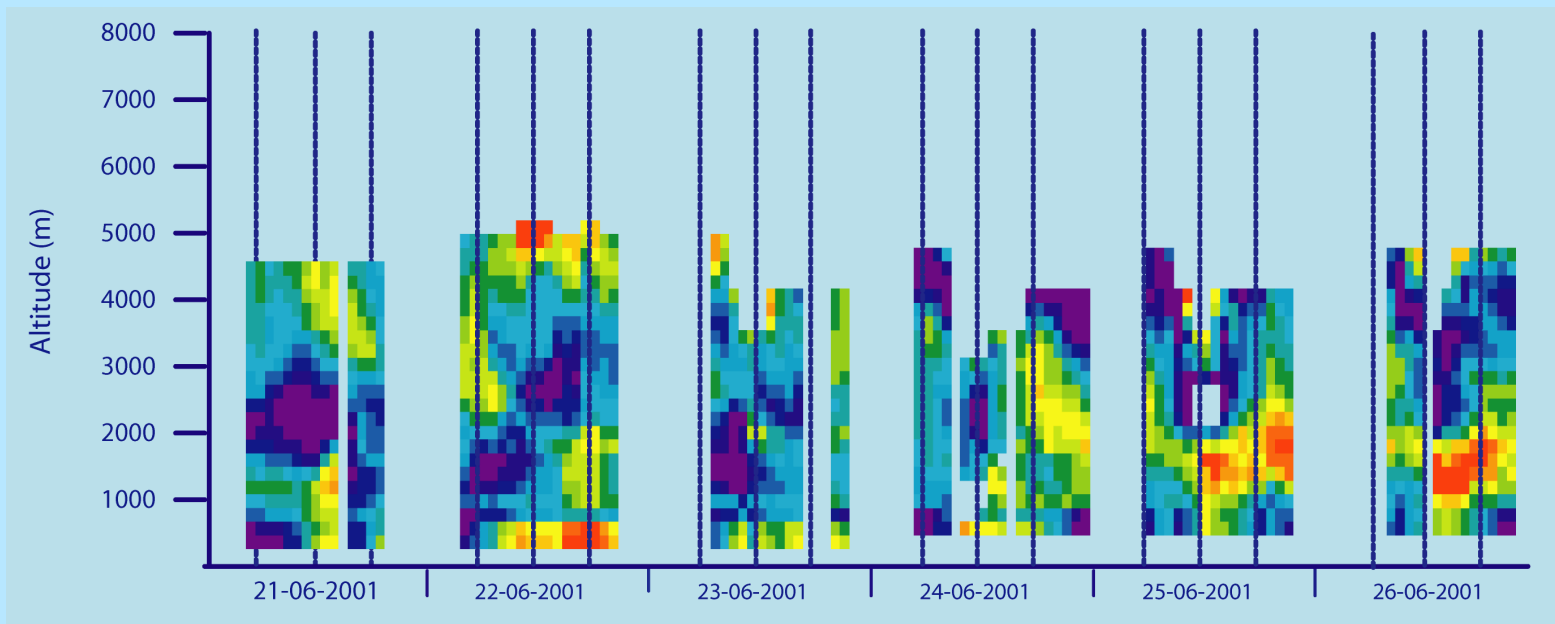
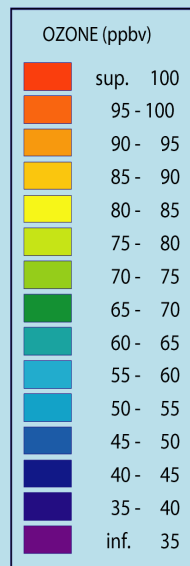


Plan de vol  
« exploration »



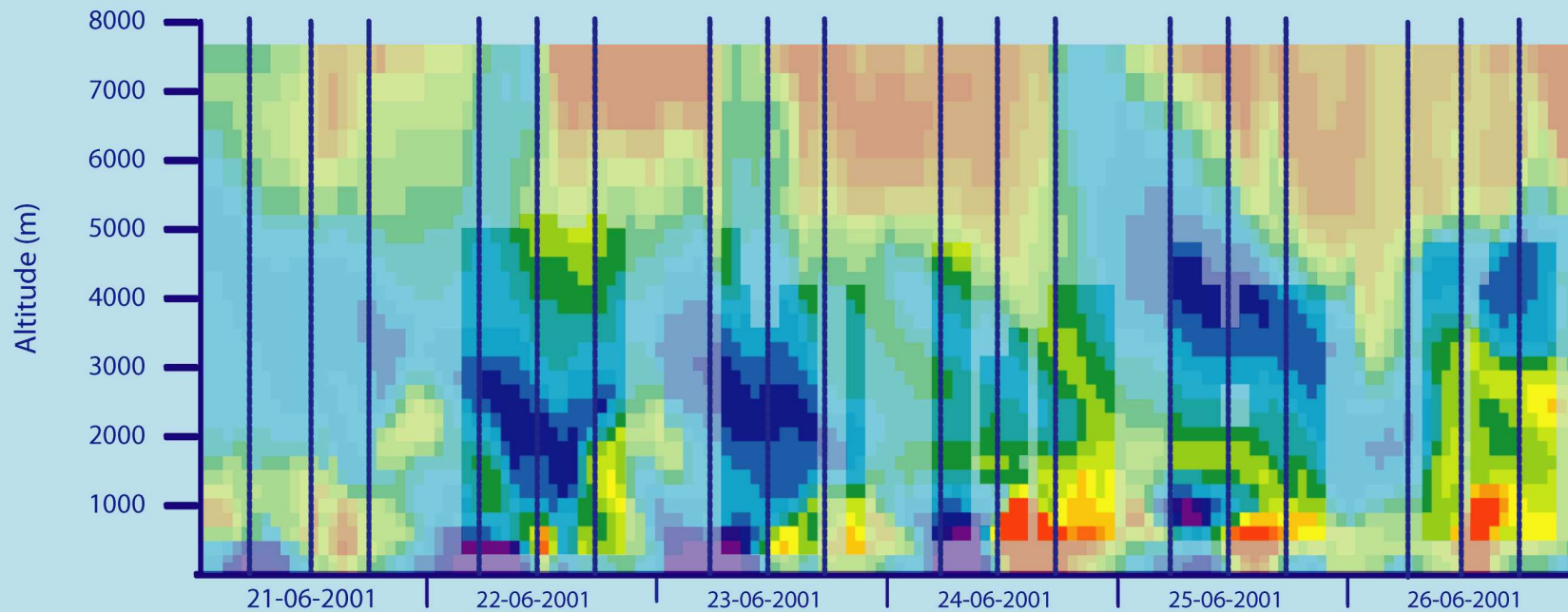
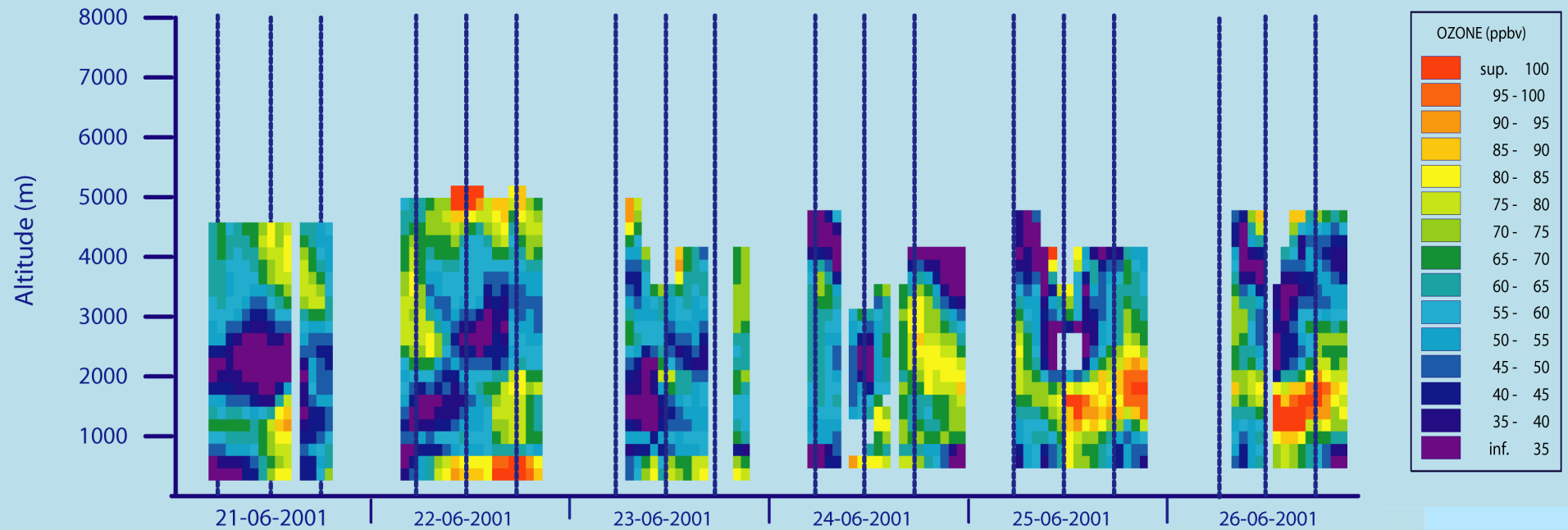
# ESCOMPTE : exploitation des observations

Données LIDAR : instrument ALTO (SA) situé à Aix-les-Milles

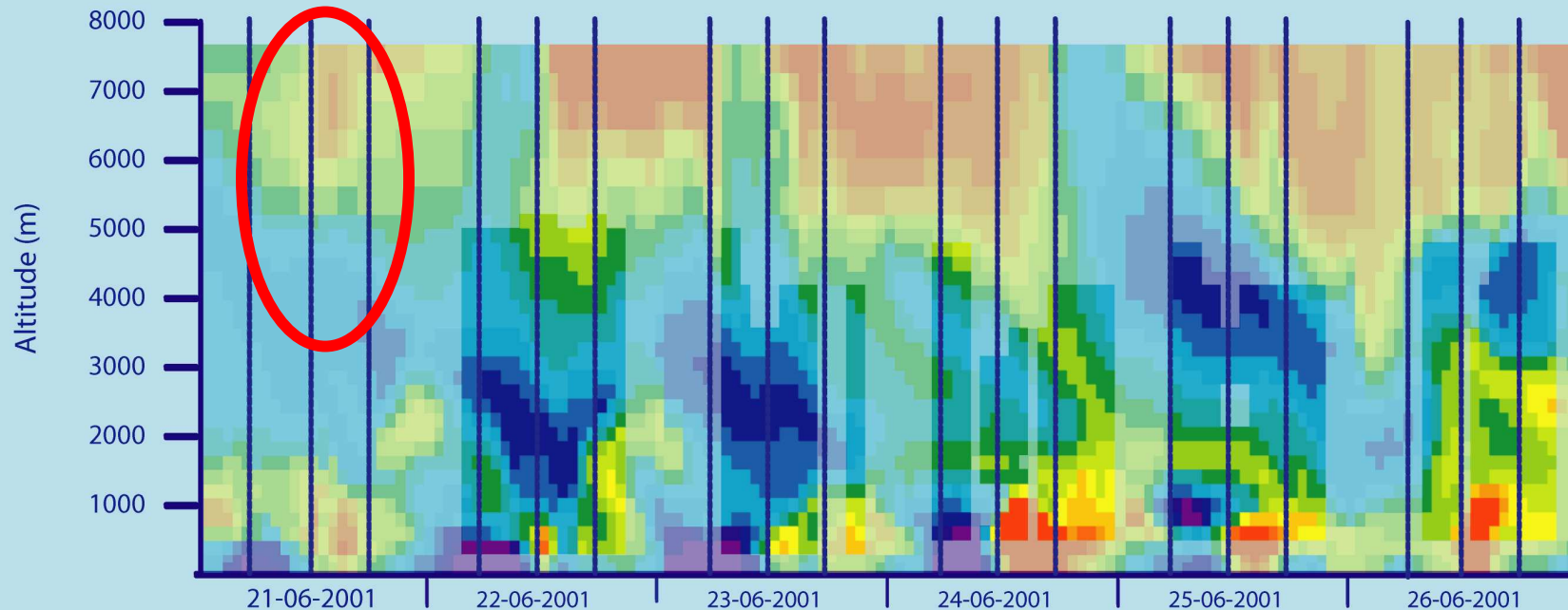
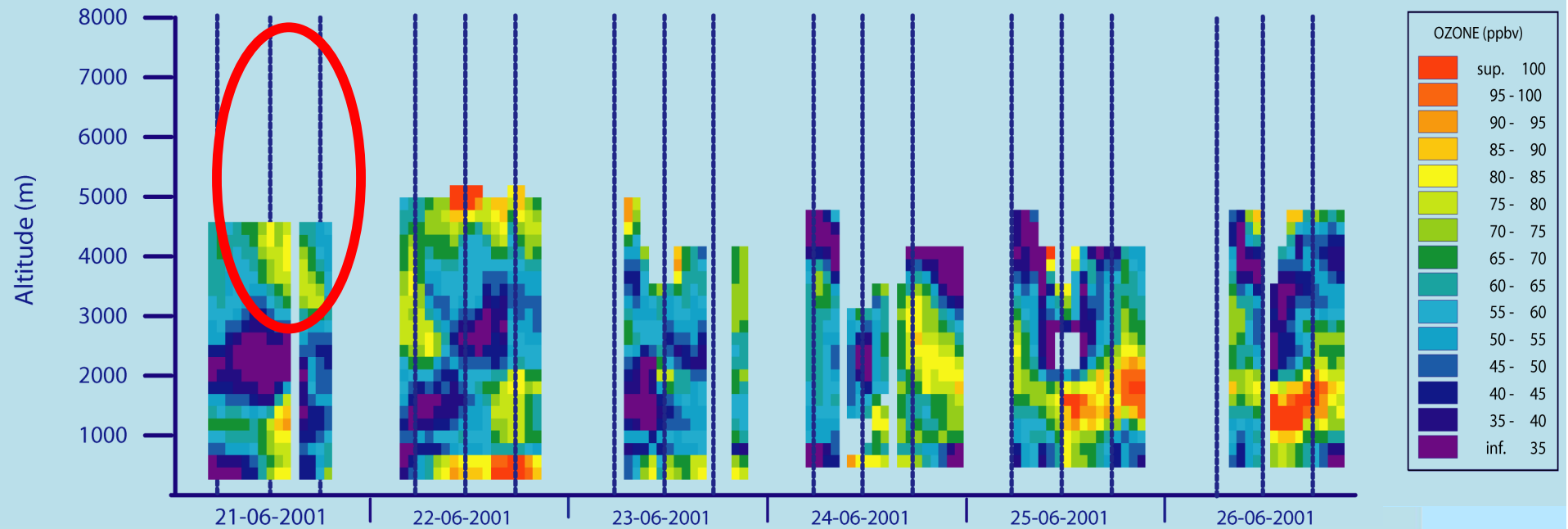




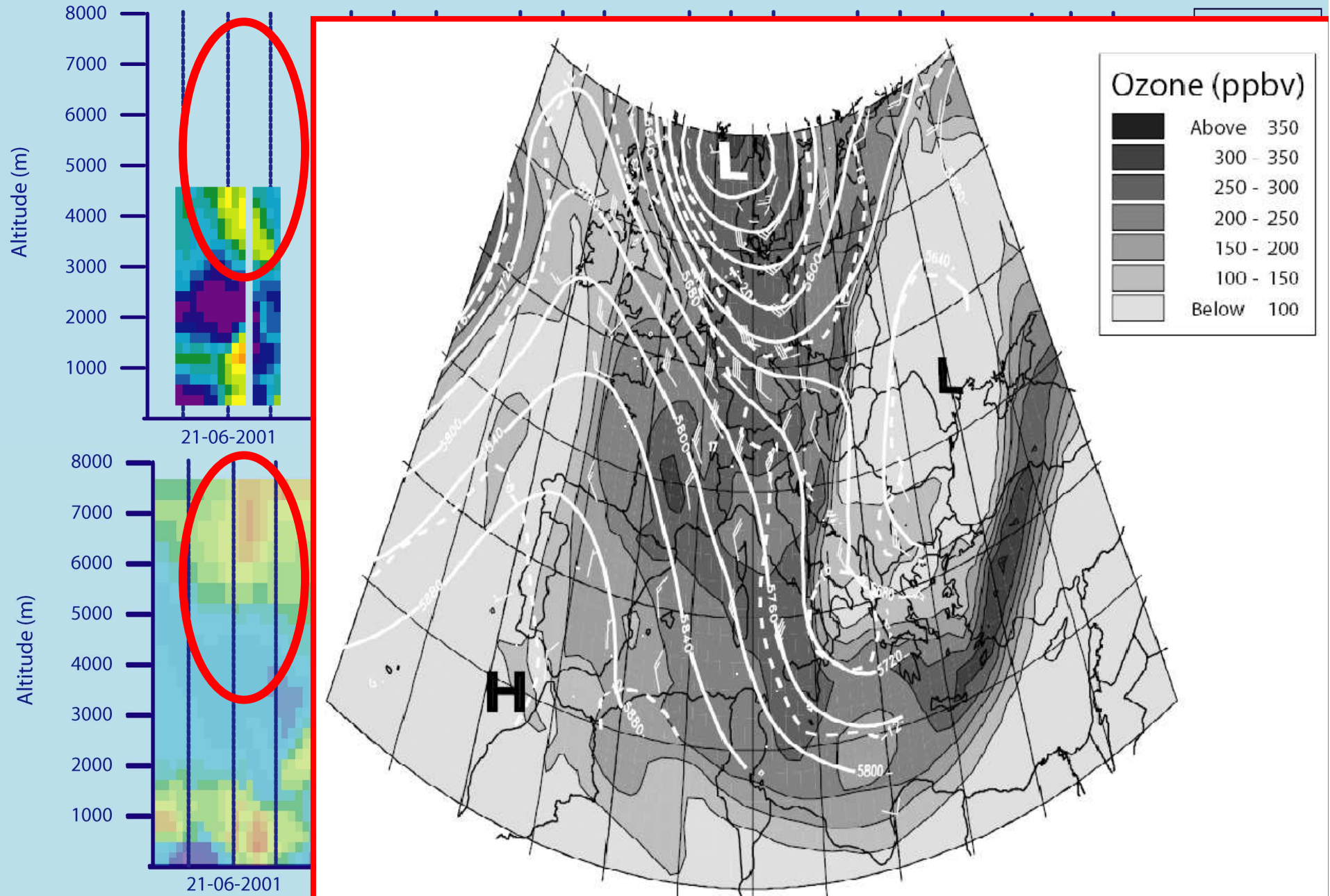
# ESCOMPTE : exploitation des observations



# ESCOMPTE : exploitation des observations

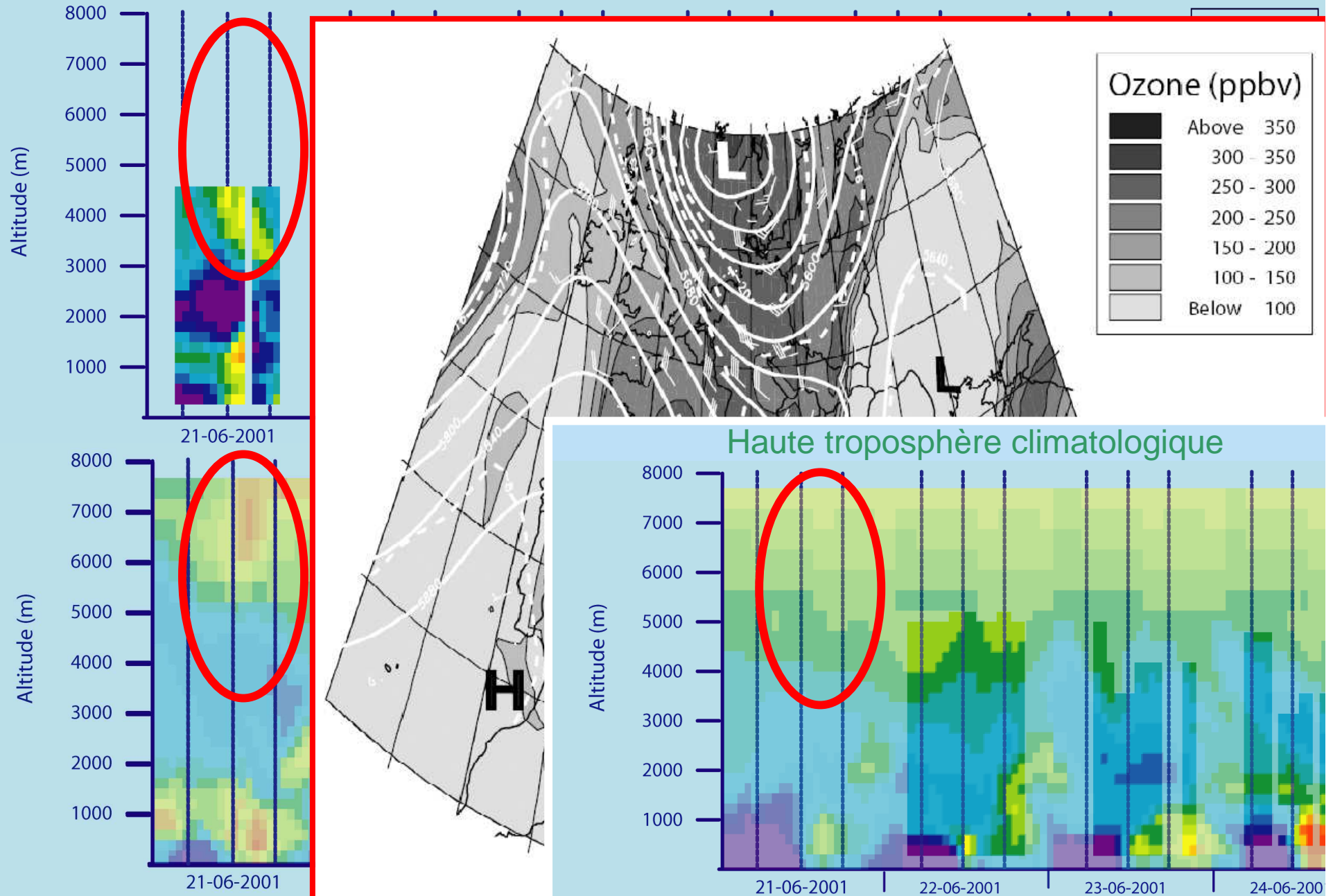


# ESCOMPTE : exploitation des observations

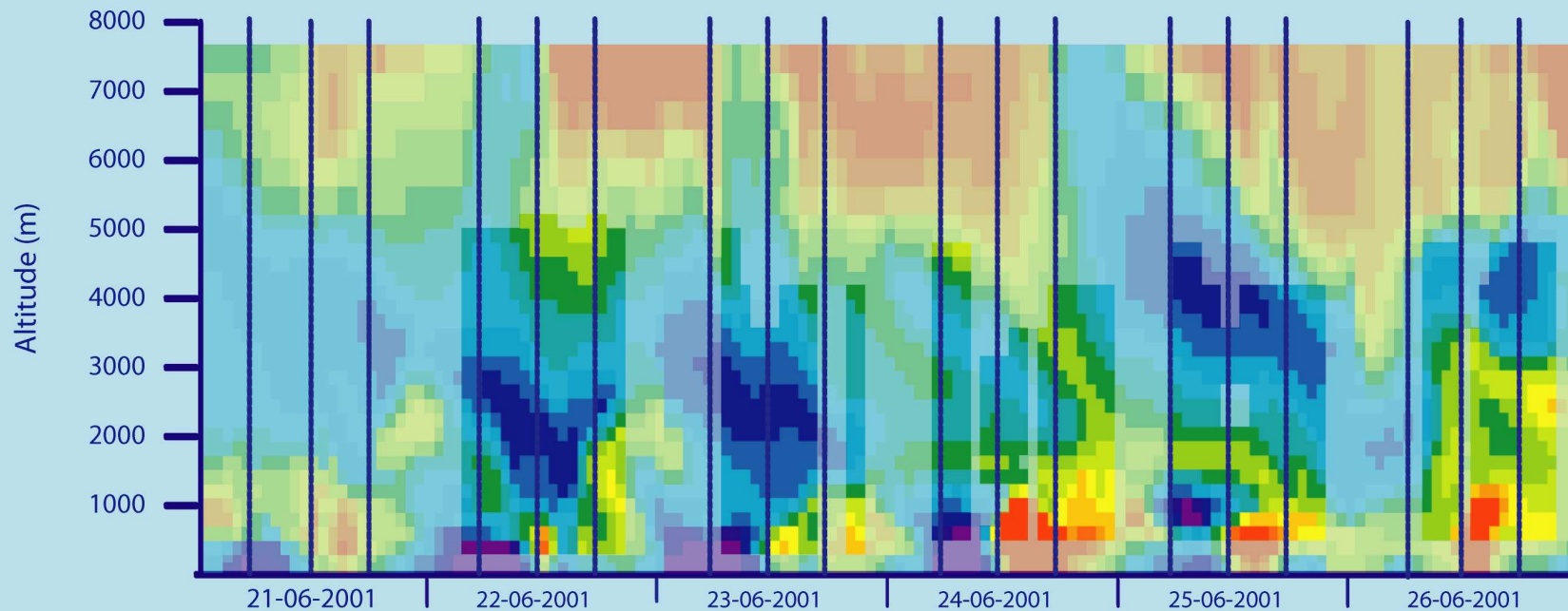
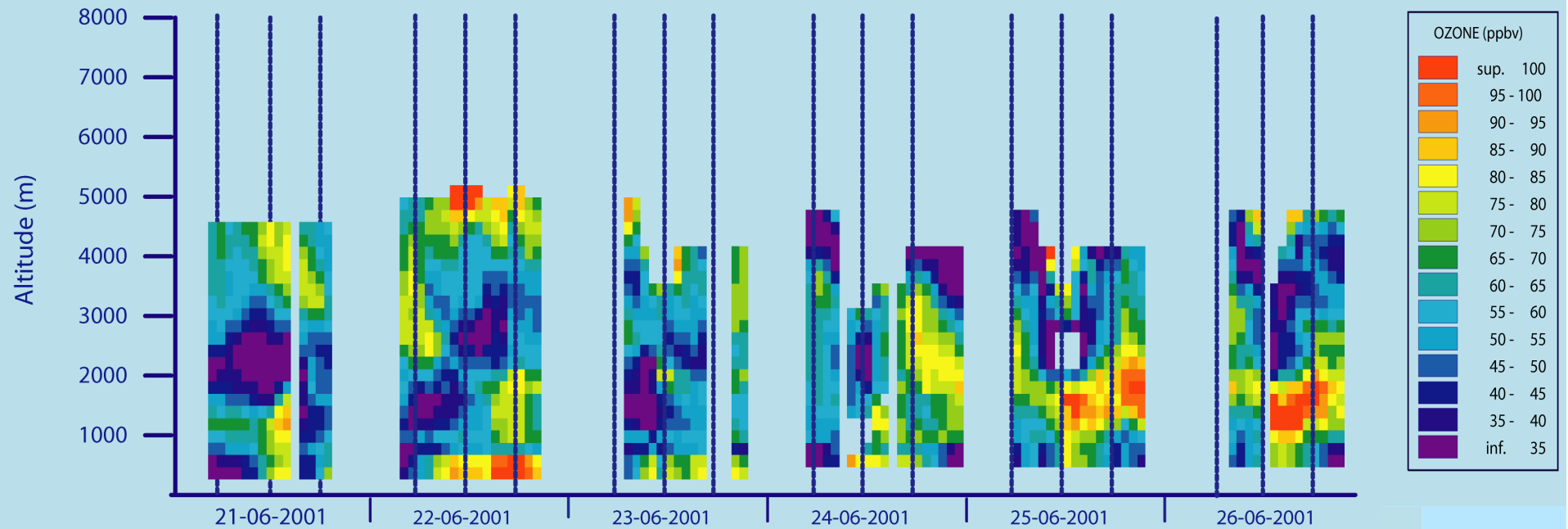




# ESCOMPTE : exploitation des observations

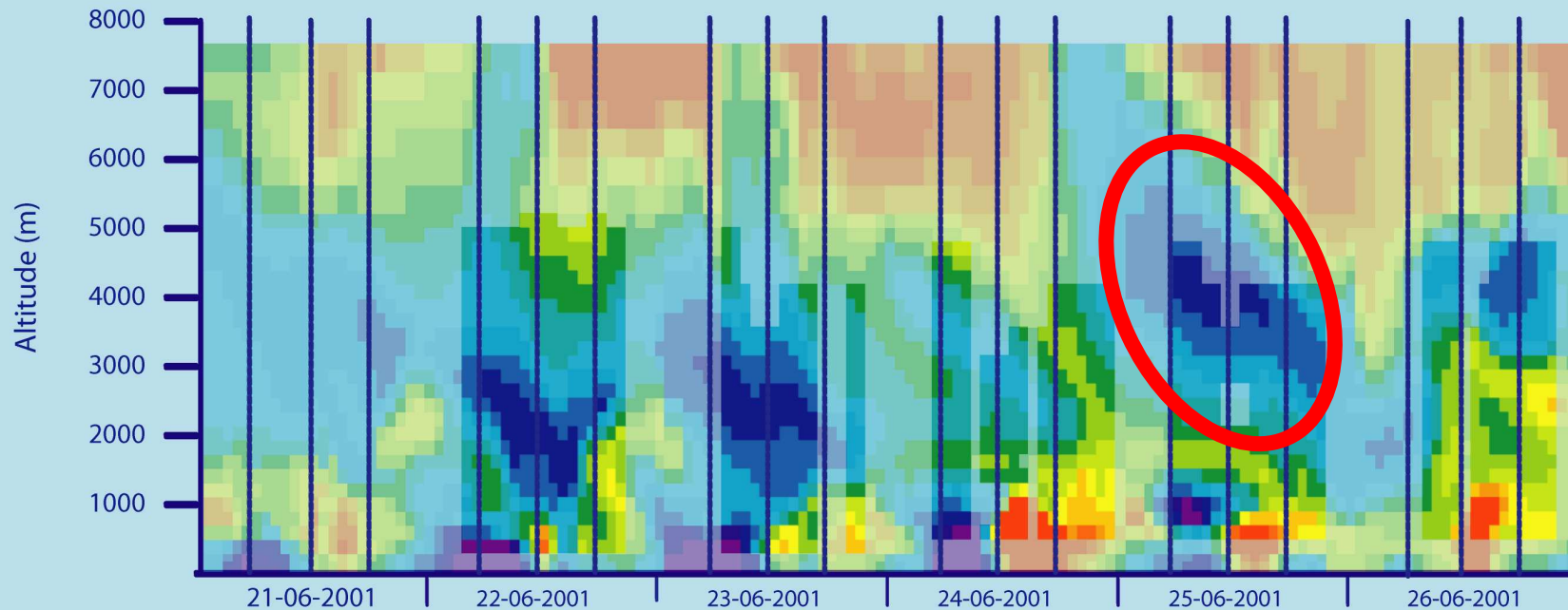
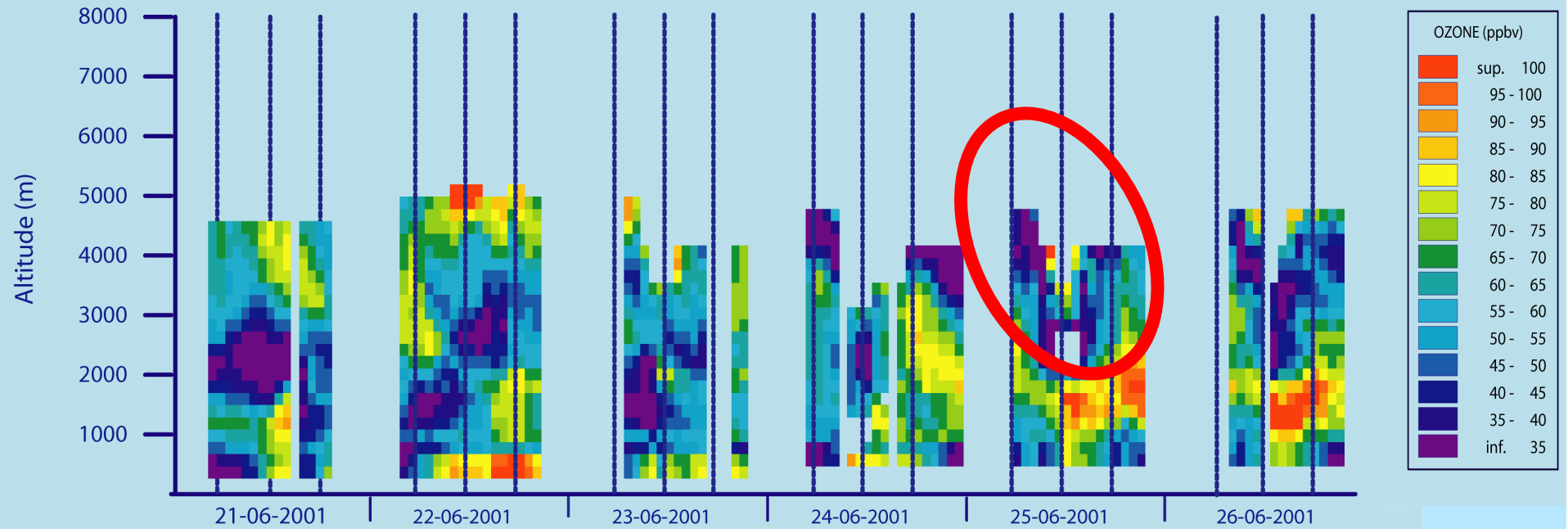


# ESCOMPTE : exploitation des observations

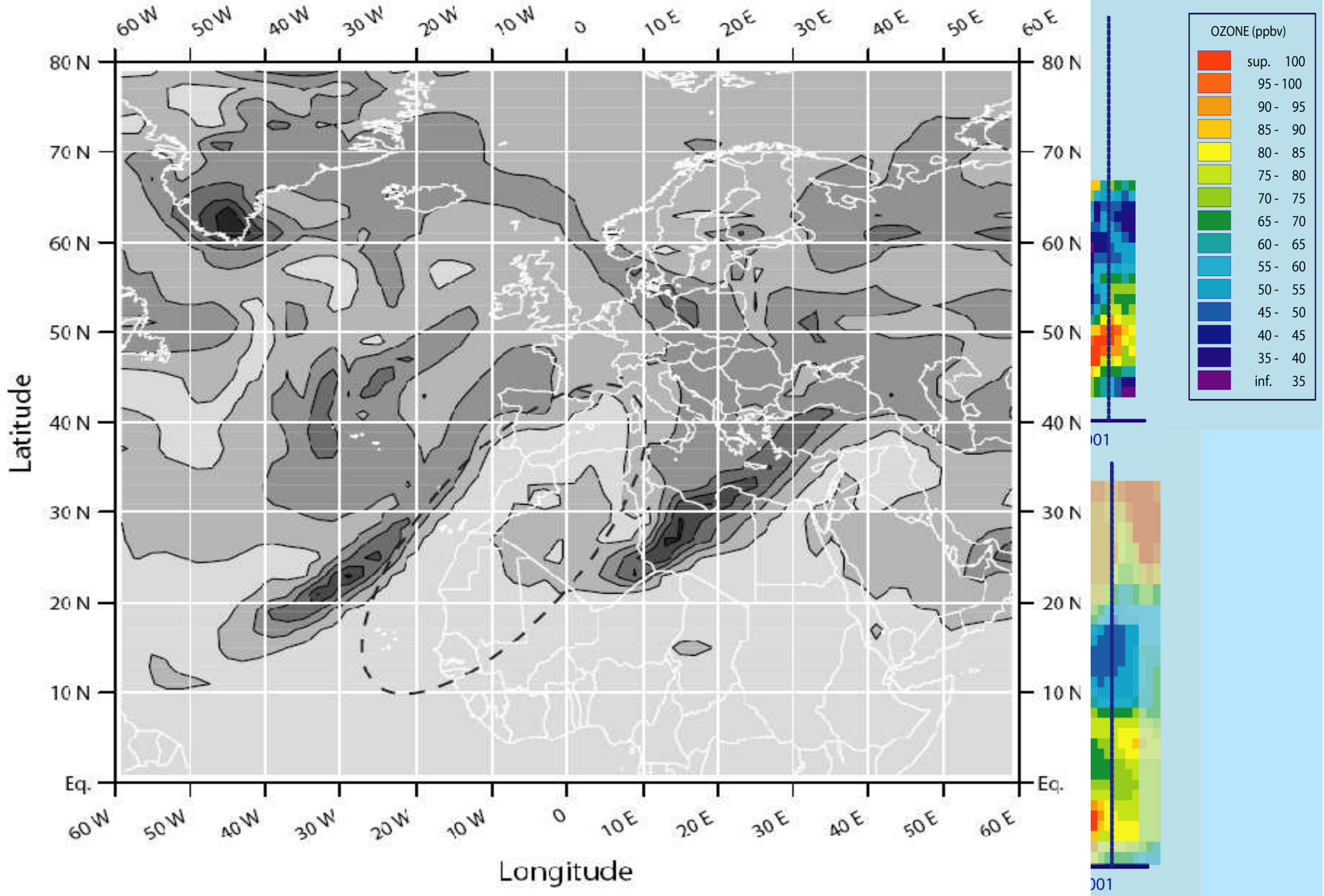




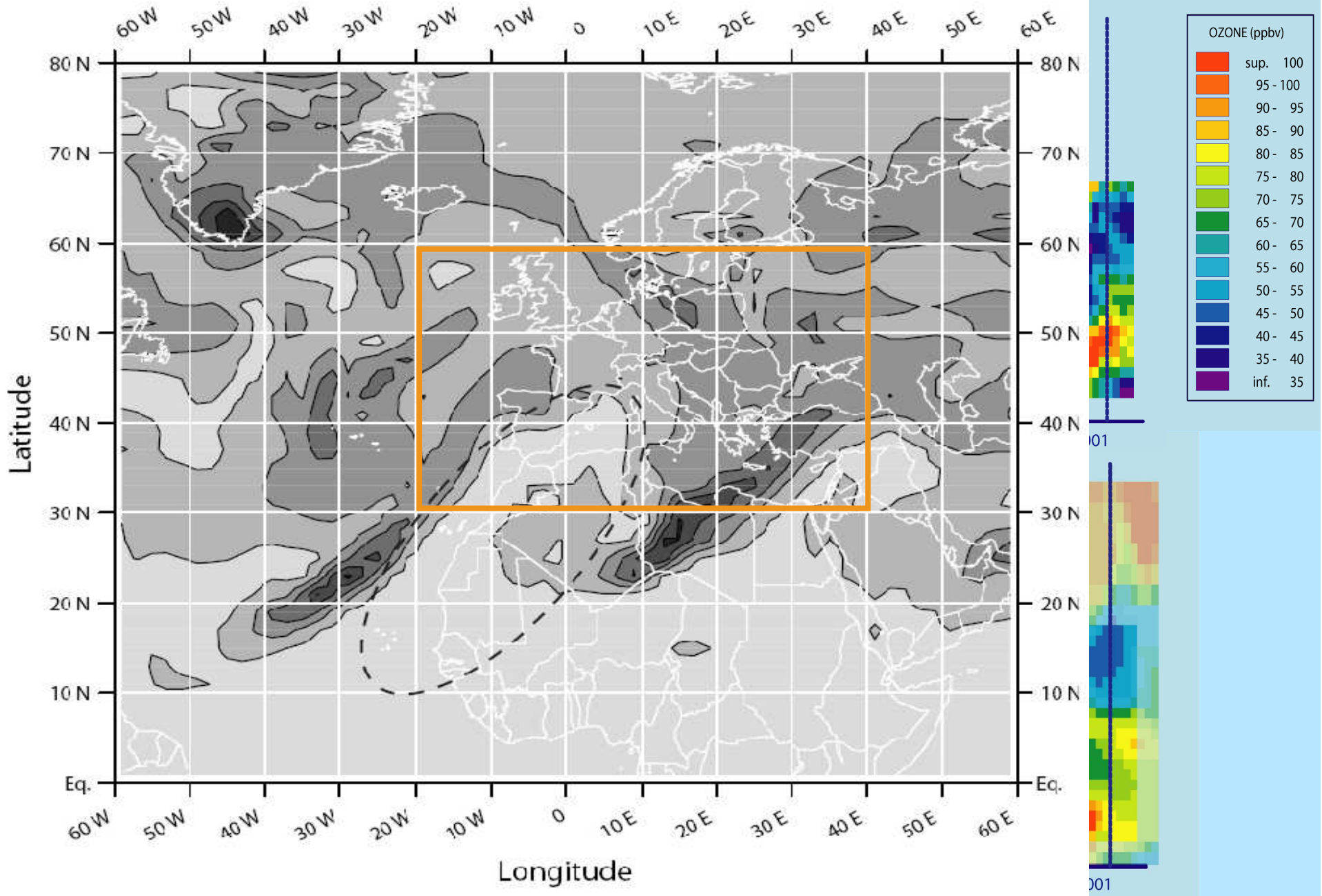
# ESCOMPTE : exploitation des observations



# ESCOMPTE : exploitation des observations

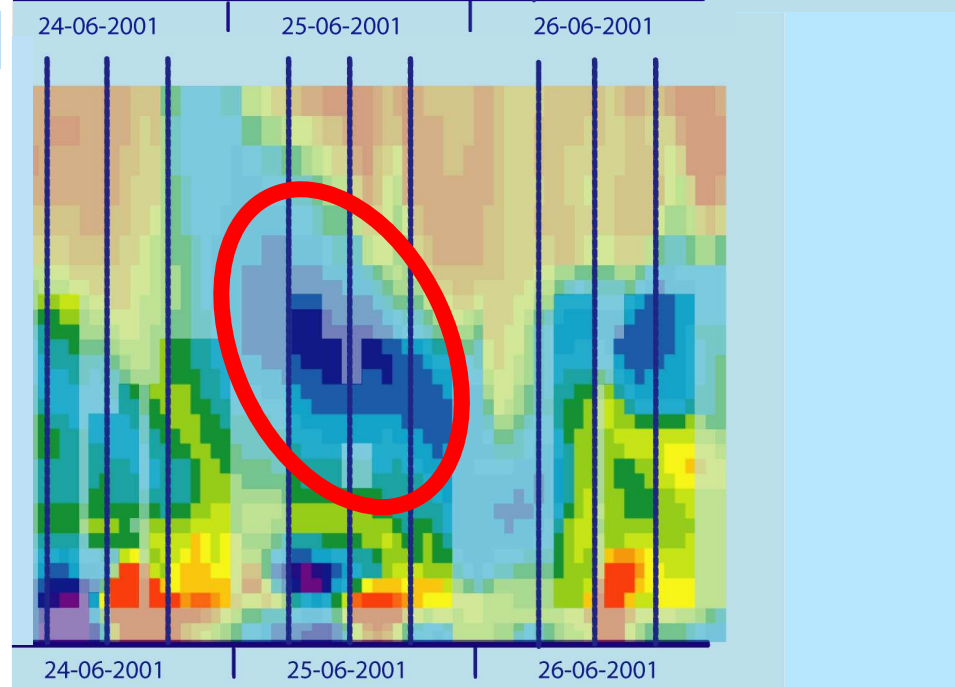
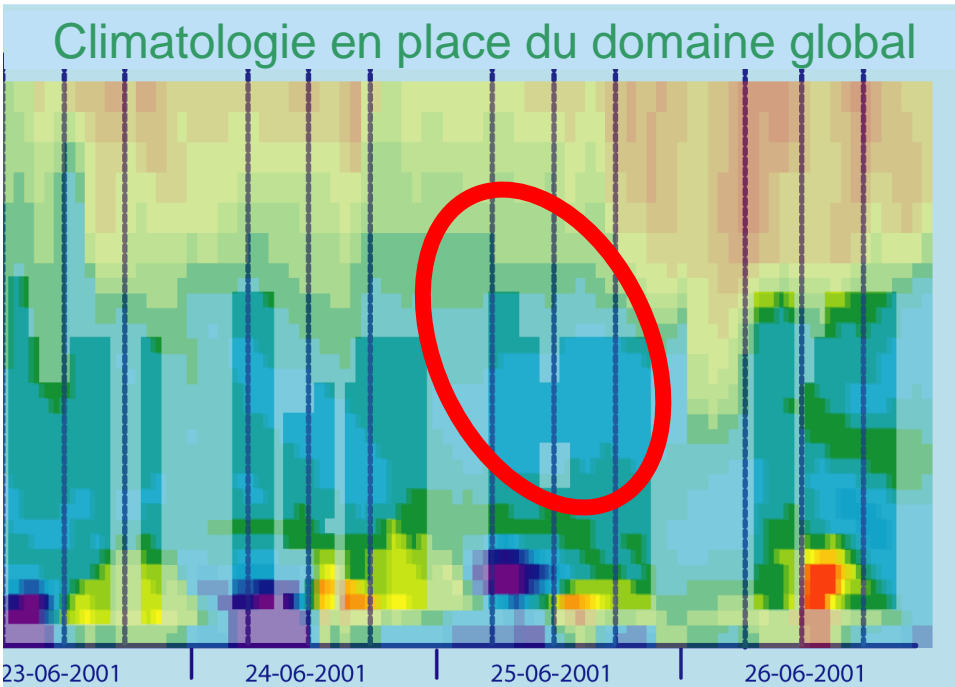
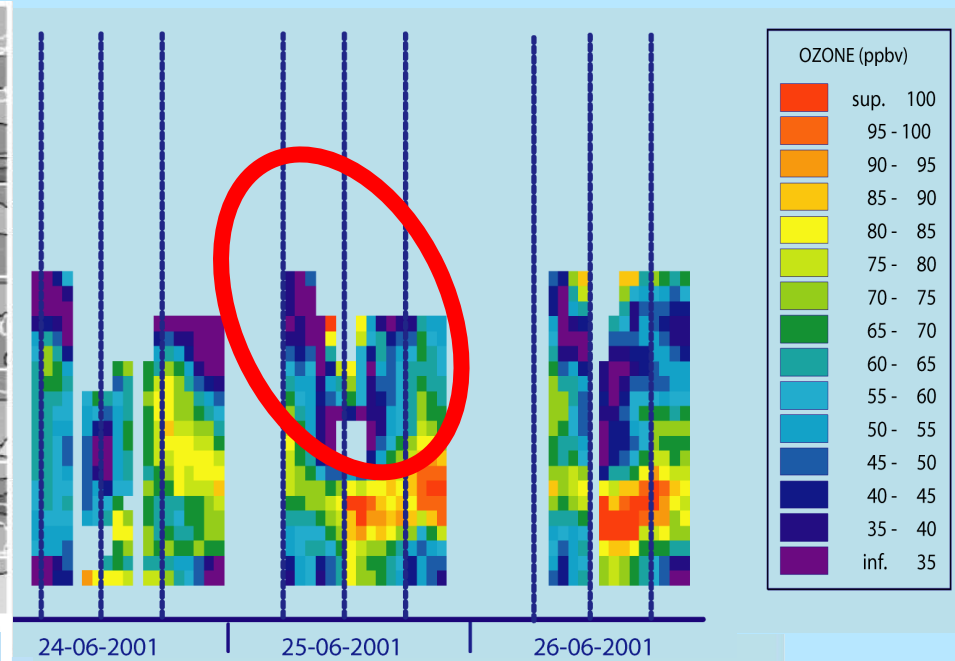
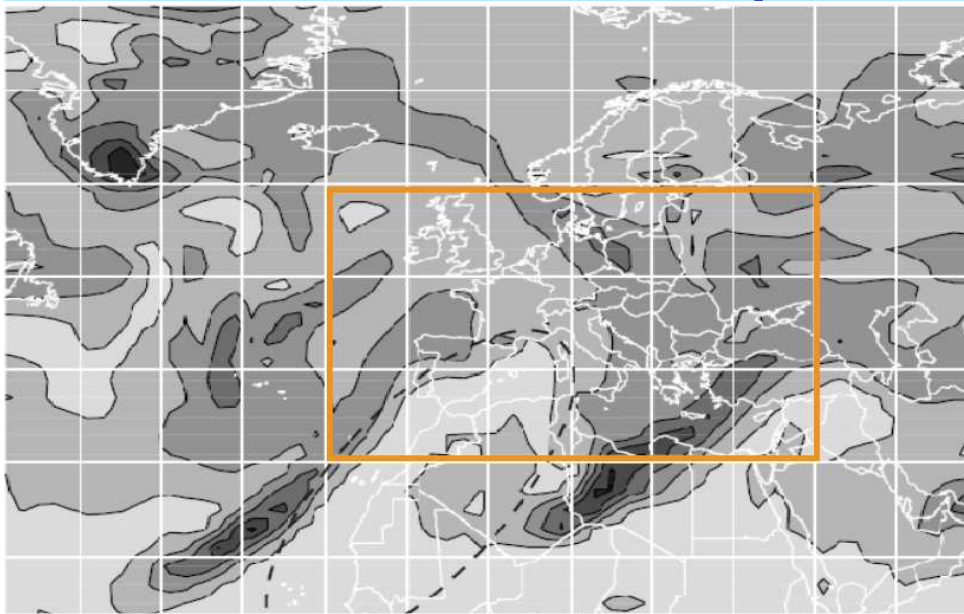


# ESCOMPTE : exploitation des observations



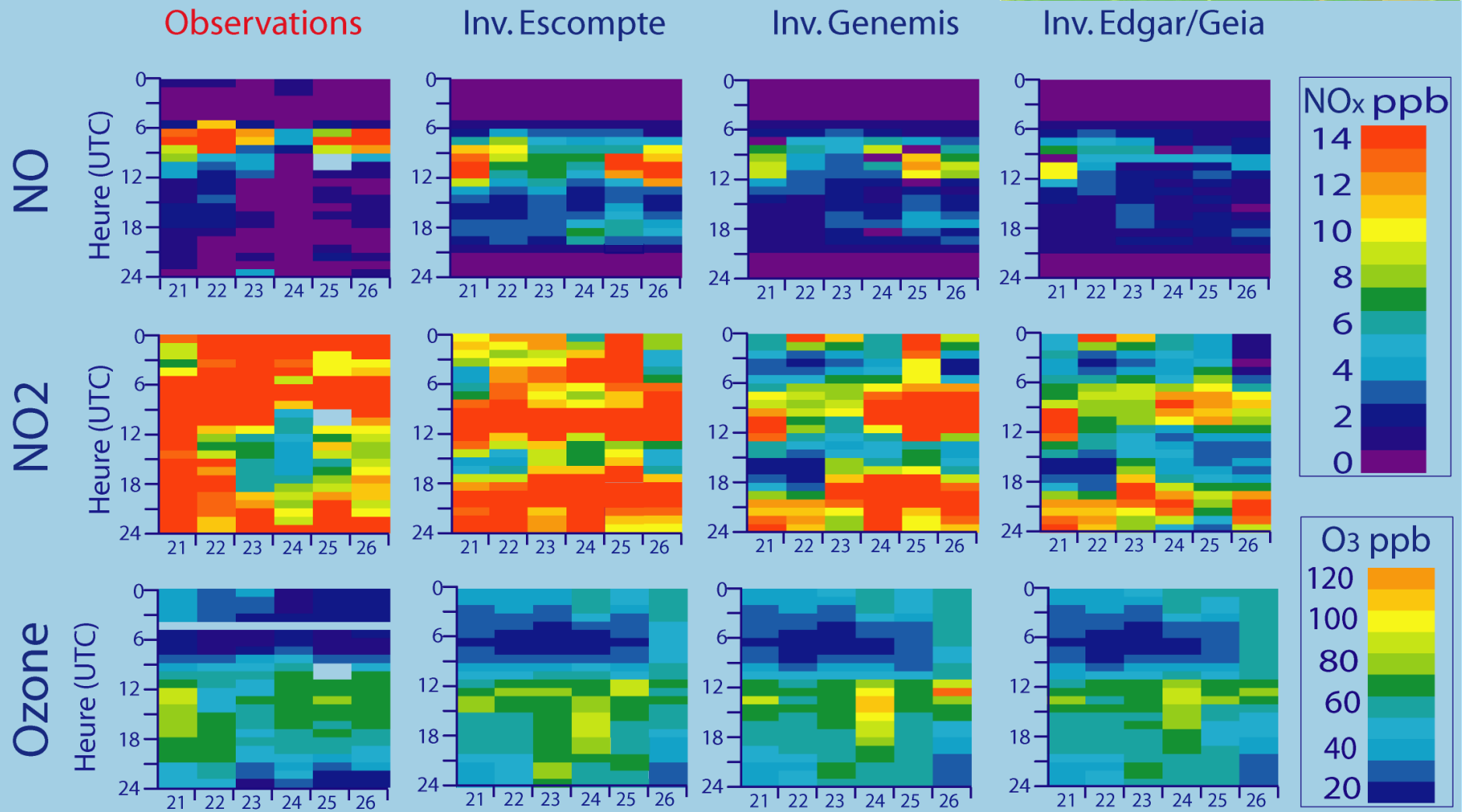
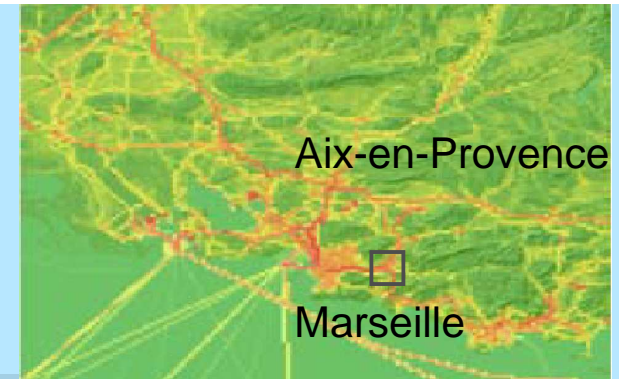


# ESCOMPTE : exploitation des observations



# ESCOMPTE

Inventaire d'émissions spécifiques :  
6 jours observés et simulés  
sur le site urbain d'Aubagne-Est-Pénitents





# Conclusion sur la partie ESCOMPTE

Base de données tri-dimensionnelles très riche  
**15 journées** de l'été 2001 documentées

Importance de la dynamique pour bien simuler les espèces chimiques  
notamment le vent : direction, brise, position du front de brise

Raffinement spatial et temporel des émissions

- impact fort sur les primaires dans les zones d'émissions
- impact sur l'intensité du panache d'ozone (émissions biogéniques)

Identification d'un problème au démarrage de la photochimie

Extension verticale et horizontale nécessaire à la reproduction de la  
variabilité de la troposphère libre

**Exercice de modélisation** : Forte variabilité d'un jour à l'autre  
des performances des modèles

**=> Nécessité de modéliser des périodes  
plus longues pour évaluer le système**

# Plan de l'exposé

- I- Introduction générale et présentation du modèle MOCAGE
- II- Exploitation de la campagne ESCOMPTE
- III- Les prévisions du « temps chimique »

## **Objectif :**

**évaluer les performances des prévisions de qualité de l'air à court-terme (J0 à J+3)**

- Présentation de la configuration et des prévisions
- Résultats aux différentes échelles :
  - globale, continentale et régionale
- Présentation de la plate-forme nationale PREV'AIR

# PREVISIONS ESTIVALES : configuration du modèle

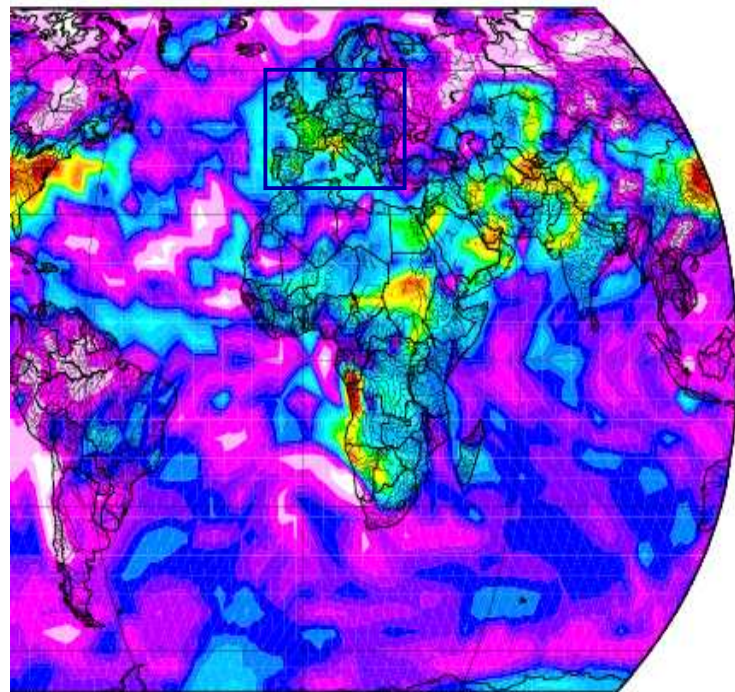
Domaine	Globe	Europe	France
Résolution horizontale	4° x 4°	0,5° x 0,5°	0,1° x 0,1°
Extension géographique	Globe entier	12°O-28°E / 34°N - 62°N	5°O-10°E / 41°N - 52°N
Nombre de points de grille	90 x 45	80 x 56	150 x 110
Schéma chimique	RACM <small>Stockwell et al. (1997)</small>		
Forçage météorologique	ARPEGE ARPEGE ( voir tableau 4.1 pour plus de précisions)		ALADIN (J0)
Résolution spatiale	Modèle global étiré spectral C2,4 T358 L46 Résolution kilométrique équivalente minimale/maximale : 23 / 133 km		Modèle à aire limitée  9,5 km
Résolution temporelle	3 heures		
Inventaires d'émissions	RIVM/EDGAR <small>Olivier et al. (1996)</small> et IGAC/GEIA <small>Guenther et al. (1995)</small>	EMEP	
Résolution spatiale des émissions	1° x 1°	50 km x 50 km	
		Respatialisée à 0,1° x 0,1° selon la proportion d'urbanisation d'ALADIN et cadastres spécifiques disponibles (Paris et PACA)	
Résolution temporelle des émissions	Mensuelle (totaux annuels basés sur les recommandations IPCC (1995))	Mensuelle Profils diurnes appliqués	



# PREVISIONS ESTIVALES : configuration du modèle

Domaine	Globe	Europe	France
Résolution horizontale	4° x 4°	0,5° x 0,5°	0,1° x 0,1°
Extension géographique	Globe entier	12°O-28°E / 34°N - 62°N	5°O-10°E / 41°N - 52°N
Nombre de points de grille	90 x 45	80 x 56	150 x 110
Schéma chimique	RACM Stockwell et al. (1997)		
Forçage météorologique	ARPEGE ARPEGE ( voir tableau 4.1 pour plus de précisions)		ALADIN (J0)

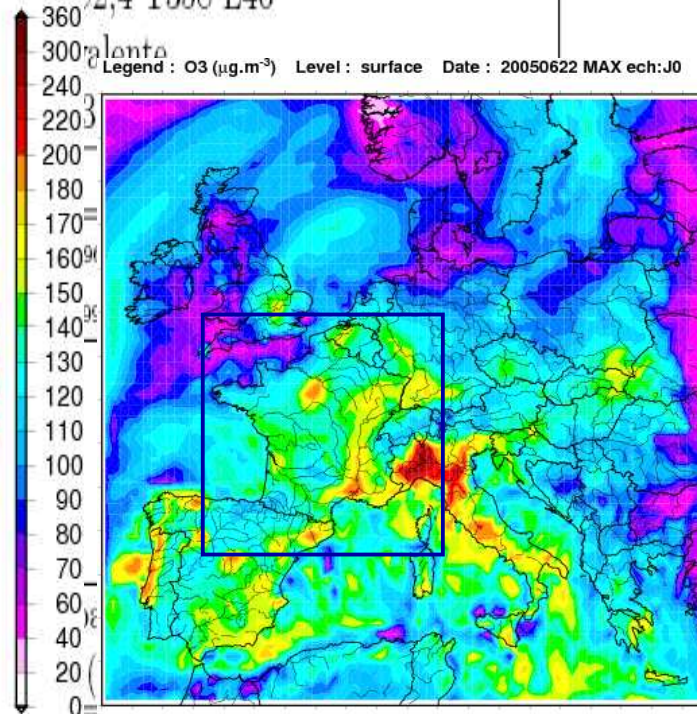
: O3 (µg.m<sup>-3</sup>) Level : surface Date : 20050622 MAX ech:J0



MOCAGE

© Météo-France 22/06/05 03:14

2,4 T358 L46



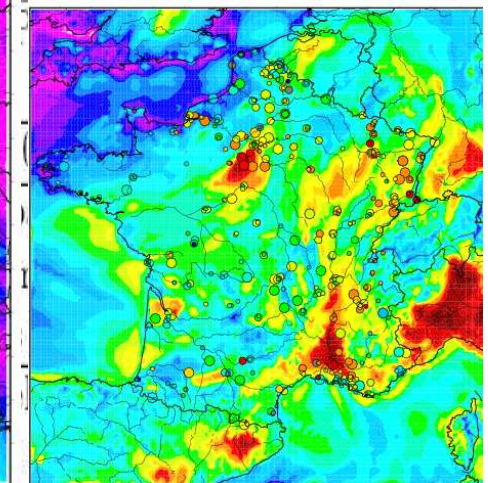
MOCAGE

© Météo-France 22/06/05 03:07

Modèle à aire limitée

9,5 km

Legend : Ozone (µg.m<sup>-3</sup>) Surface obs du 20050622 MAX model: ech:J0

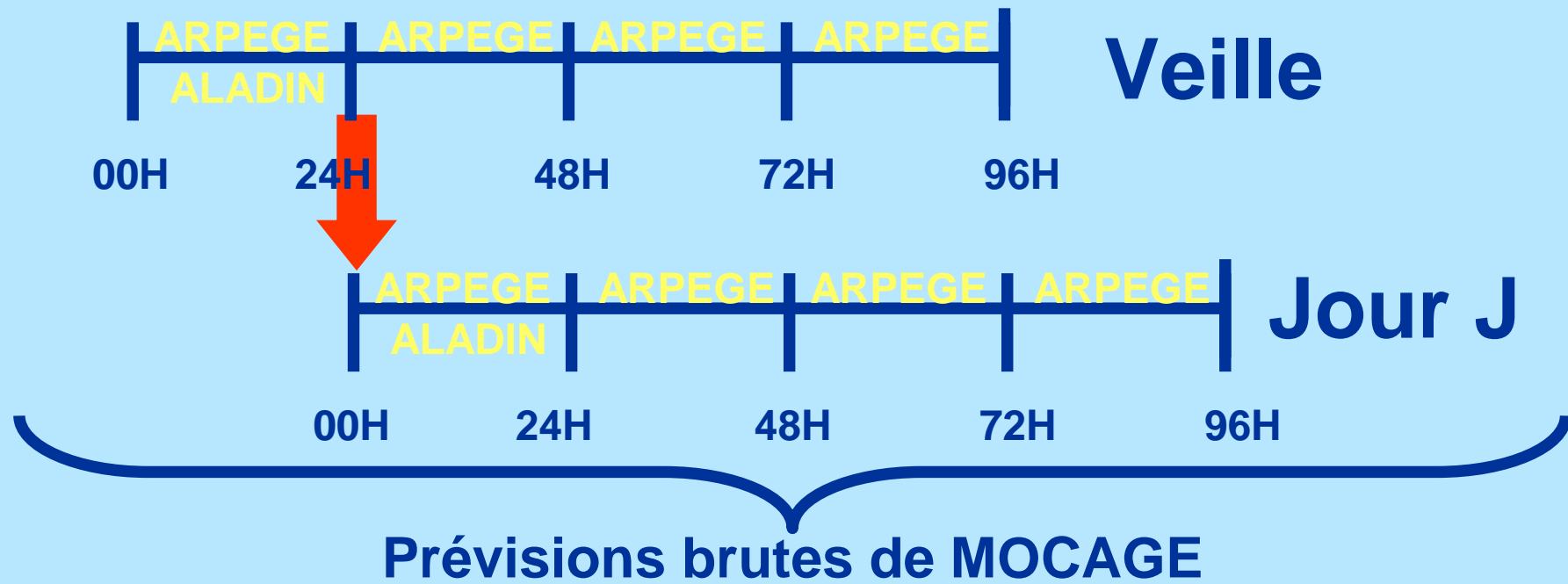


MOCAGE

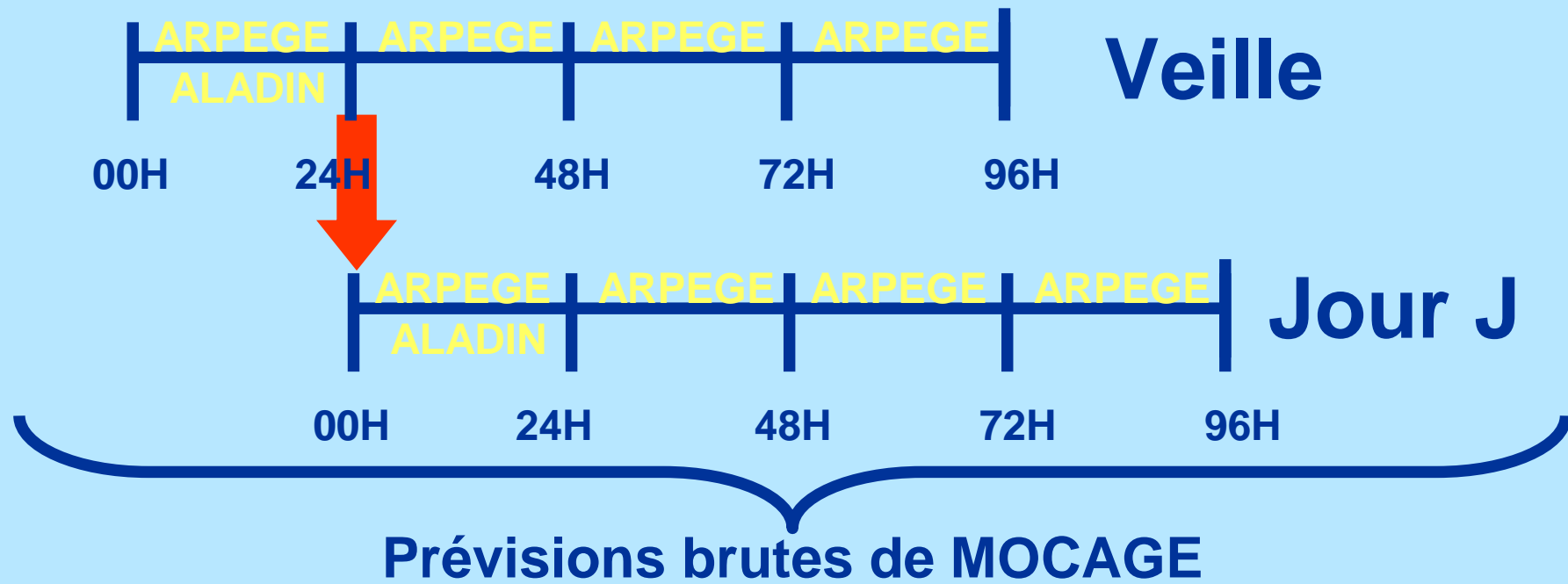
© Météo-France 23/06/05 14:12



# PREVISIONS ESTIVALES



# PREVISIONS ESTIVALES



Pour chaque site :  
Adaptation statistique

# PREVISIONS ESTIVALES

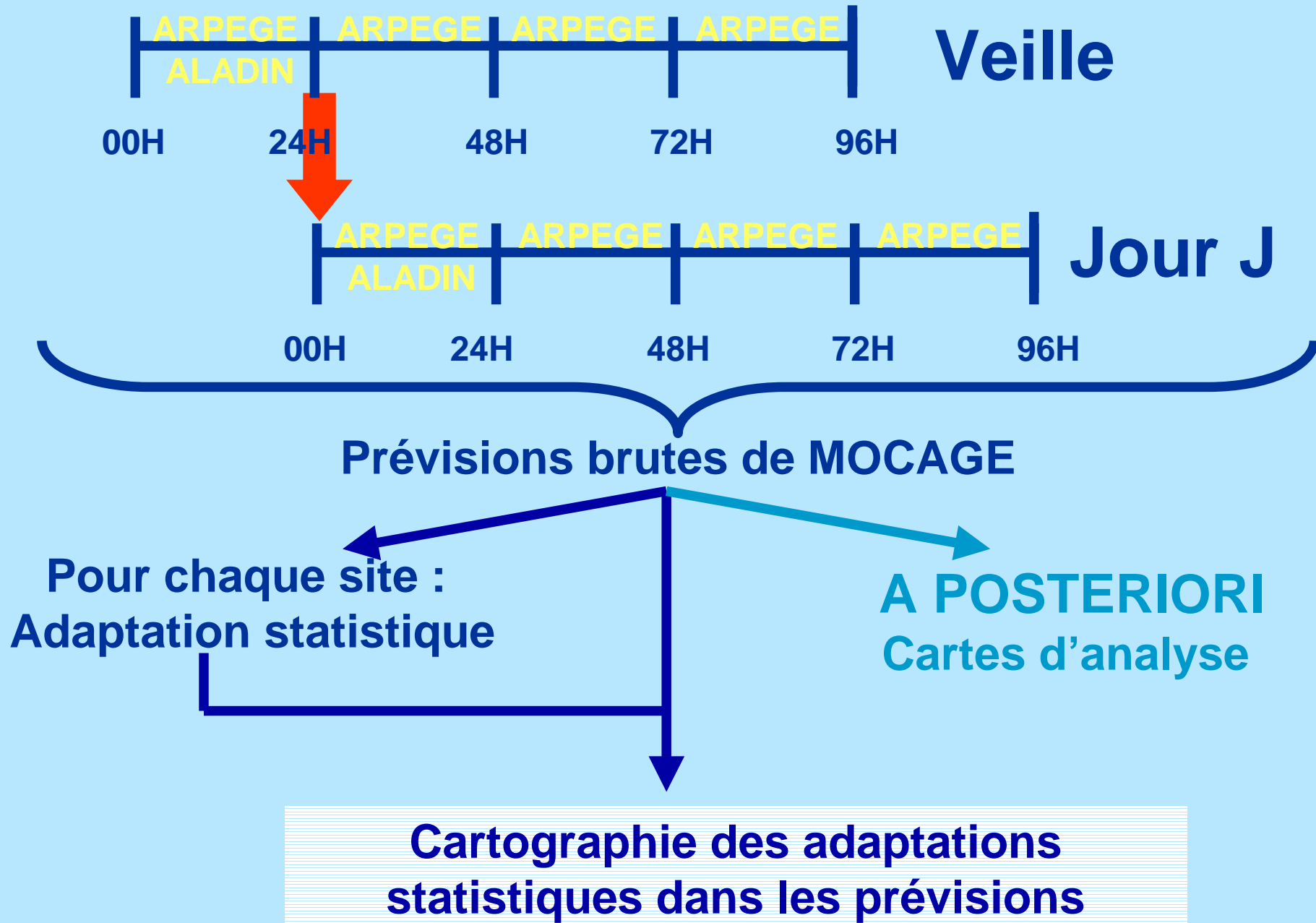


Prévisions brutes de MOCAGE

Pour chaque site :  
Adaptation statistique

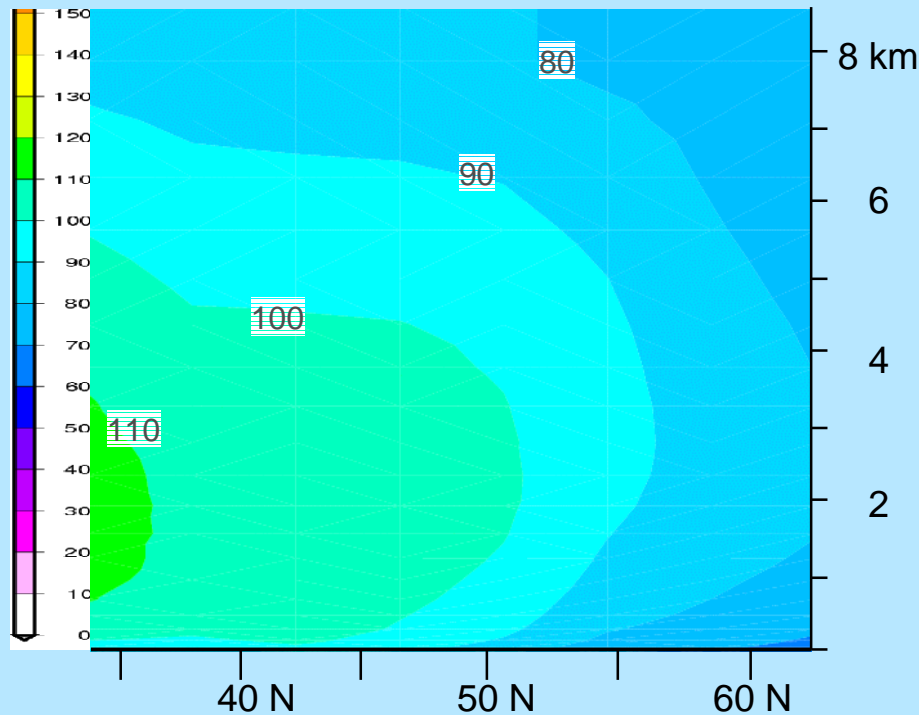
Cartographie des adaptations  
statistiques dans les prévisions

# PREVISIONS ESTIVALES

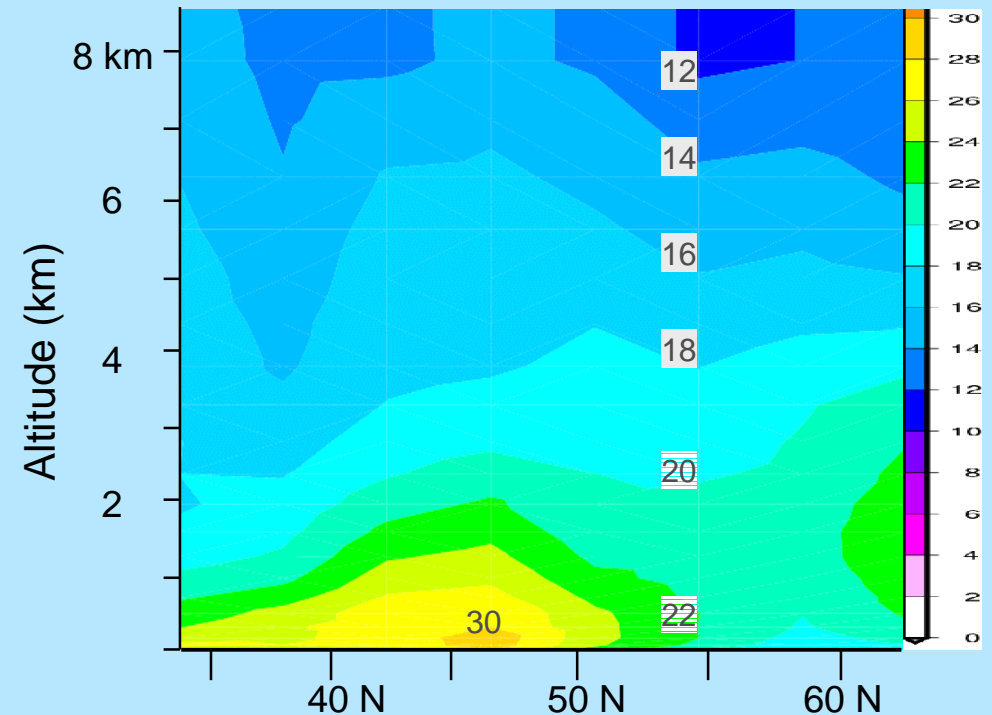




# PREVISIONS ESTIVALES : échelle globale



**Moyenne**  
(juin à septembre 2005)

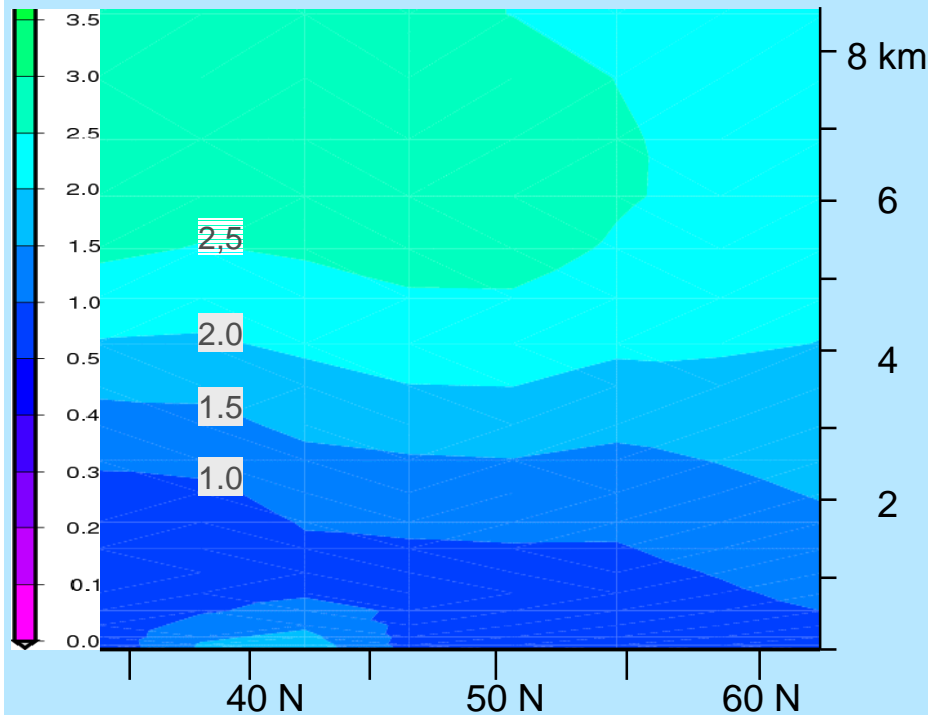


**Ecart-type**  
(juin à septembre 2005)

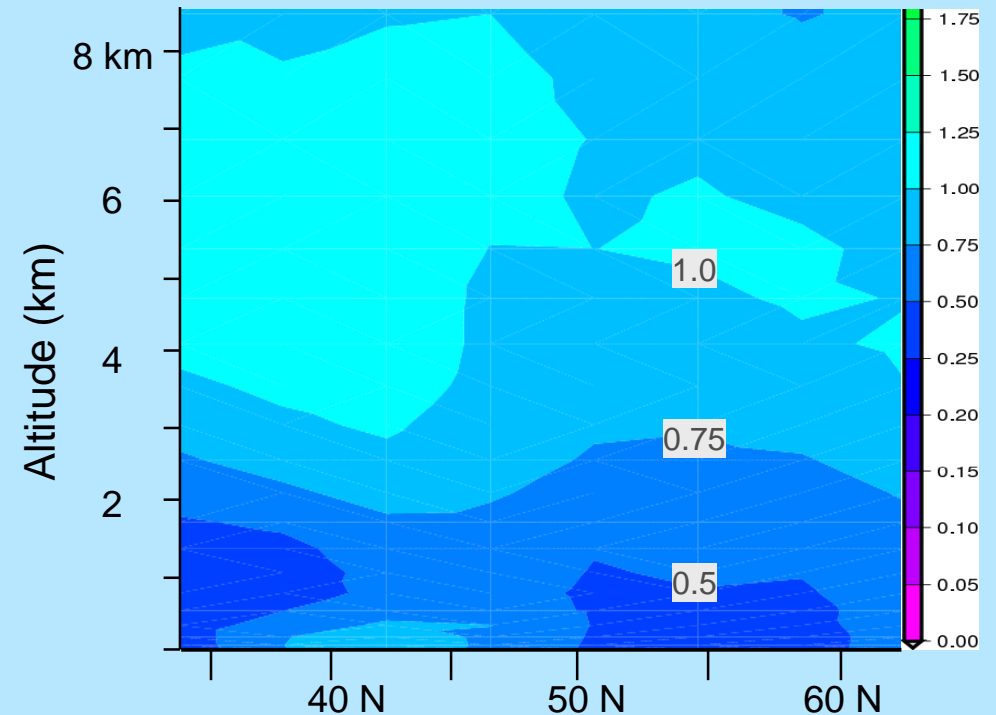


**Pic journalier d'OZONE**  
Coupe verticale méridienne

# PREVISIONS ESTIVALES : échelle globale



**Moyenne**  
(juin à septembre 2005)



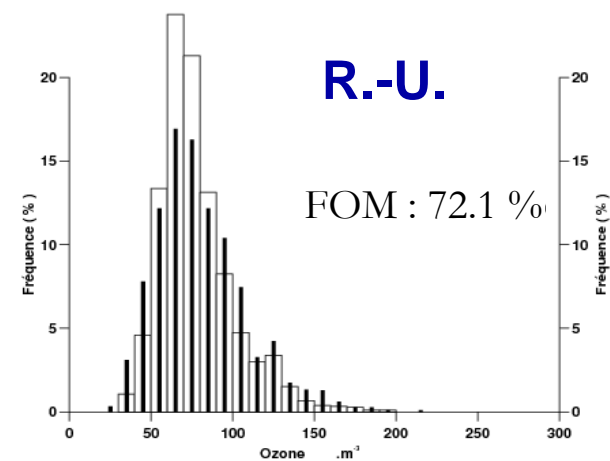
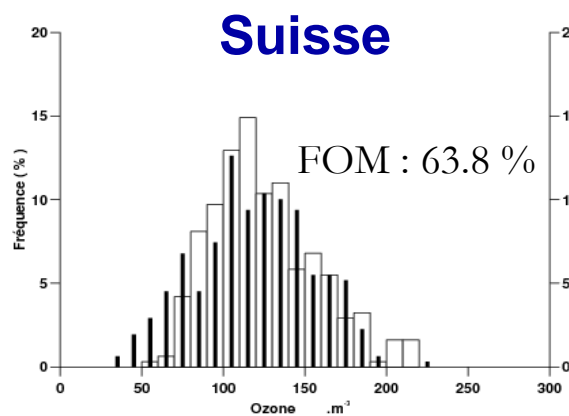
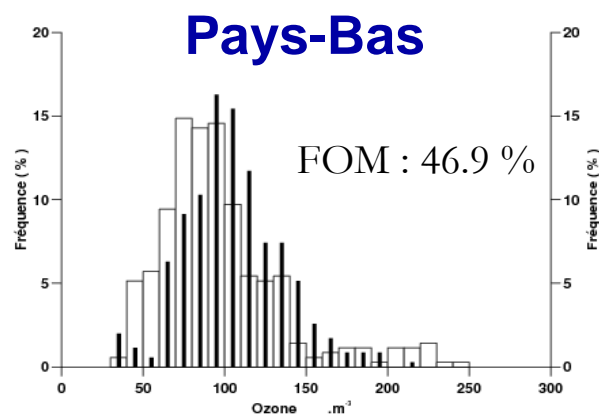
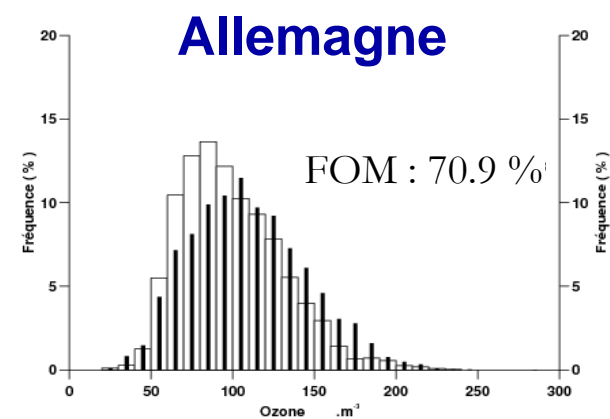
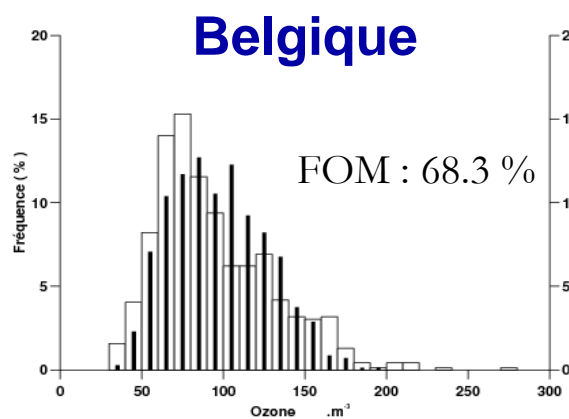
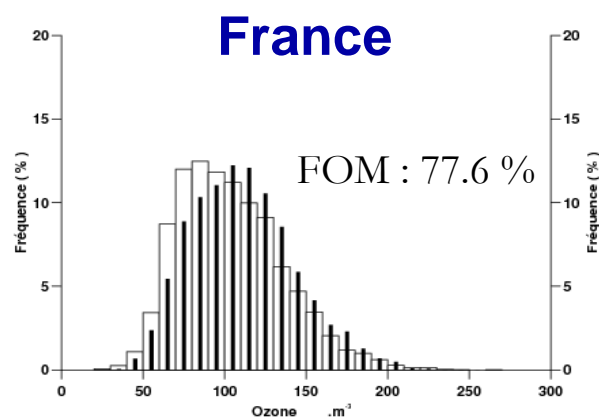
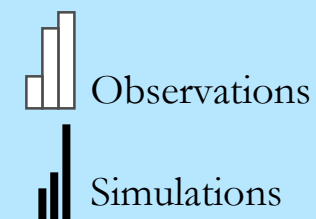
**Ecart-type**  
(juin à septembre 2005)



**Pic journalier de PAN**  
Coupe verticale méridienne

# PREVISIONS ESTIVALES : échelle continentale

## Histogrammes des pics journaliers d'ozone

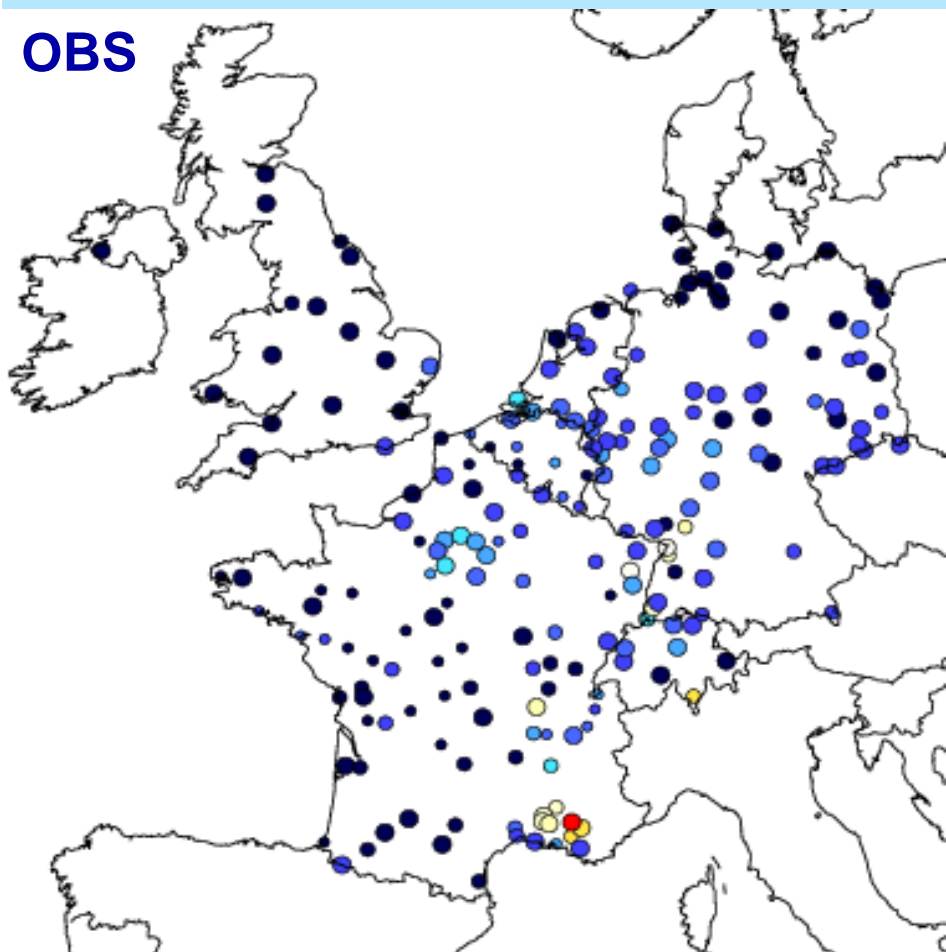


# PREVISIONS ESTIVALES : échelle continentale

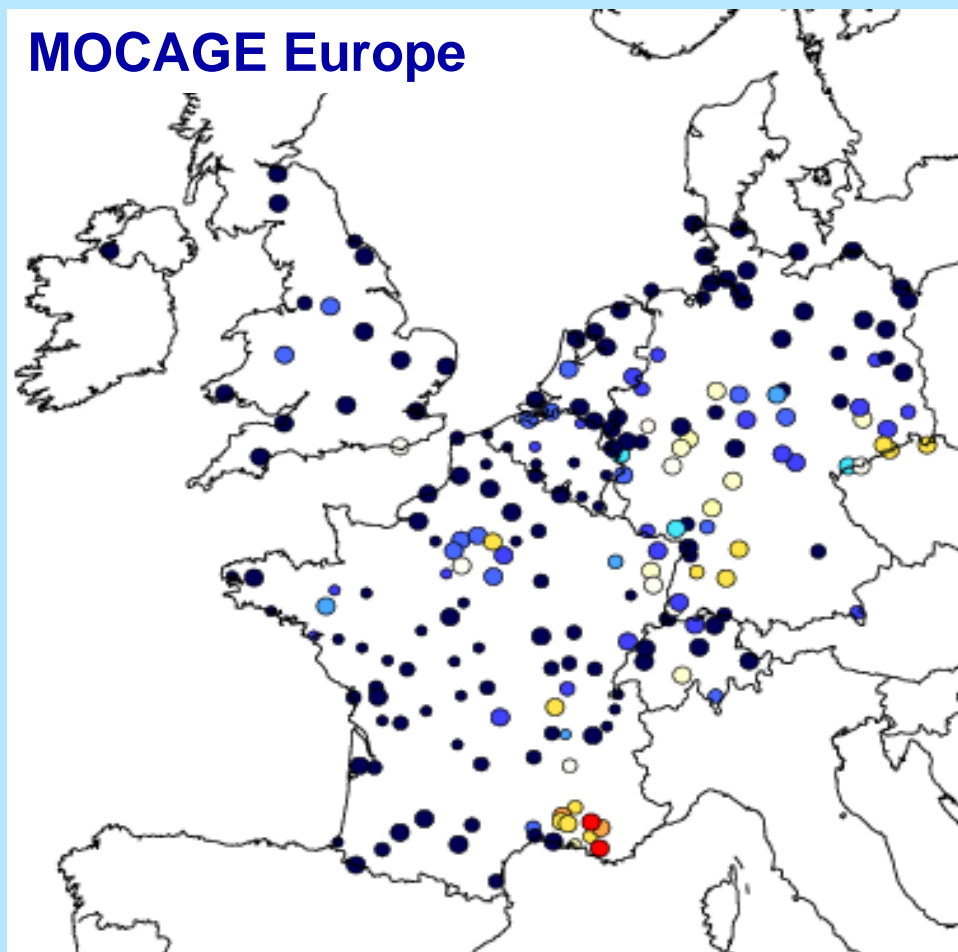
Nombre de jours de dépassement du seuil de  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  d'ozone



OBS



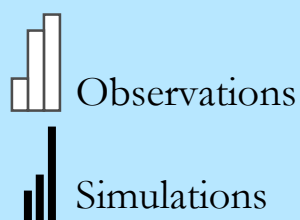
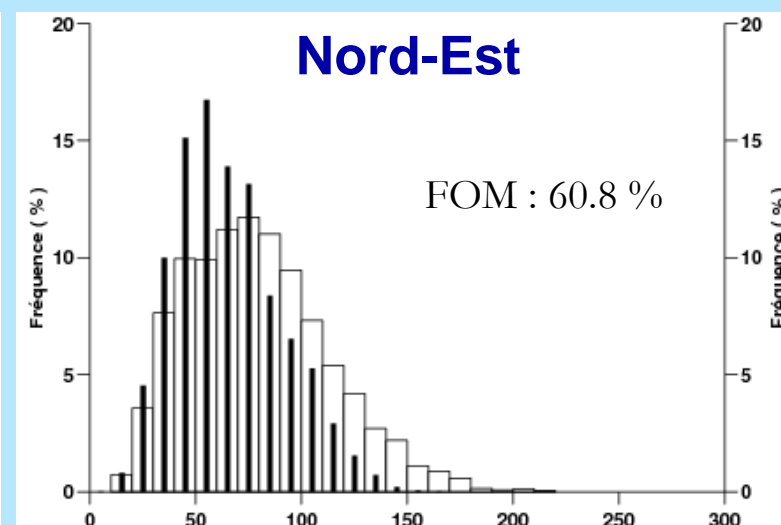
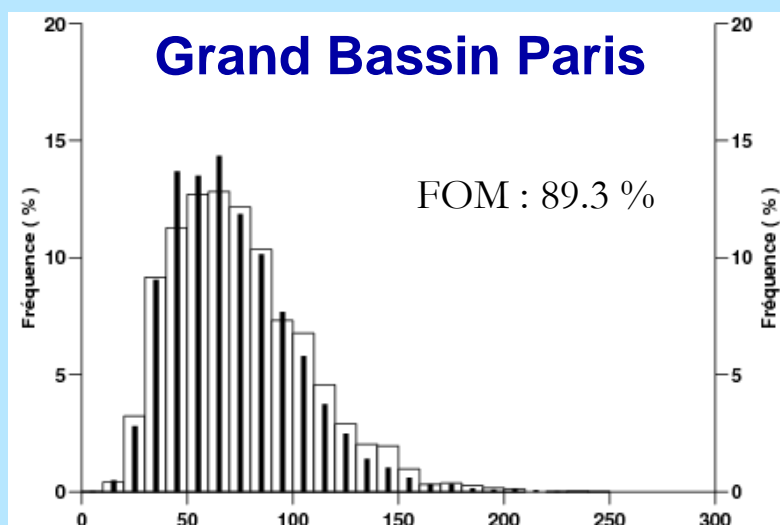
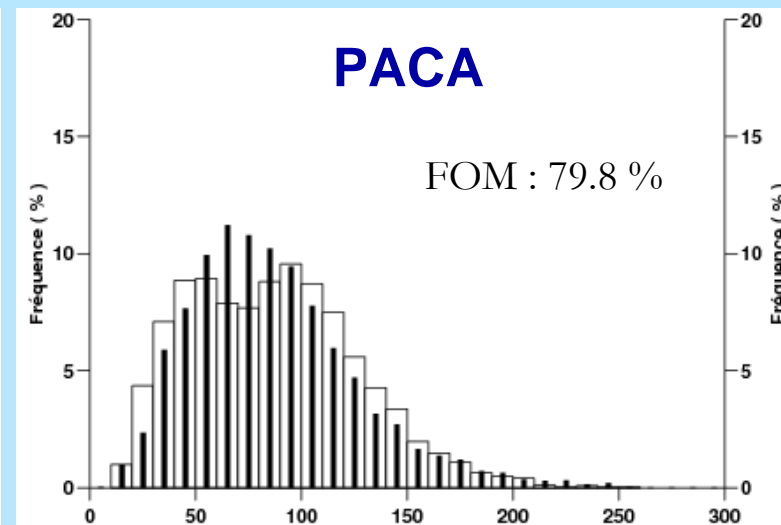
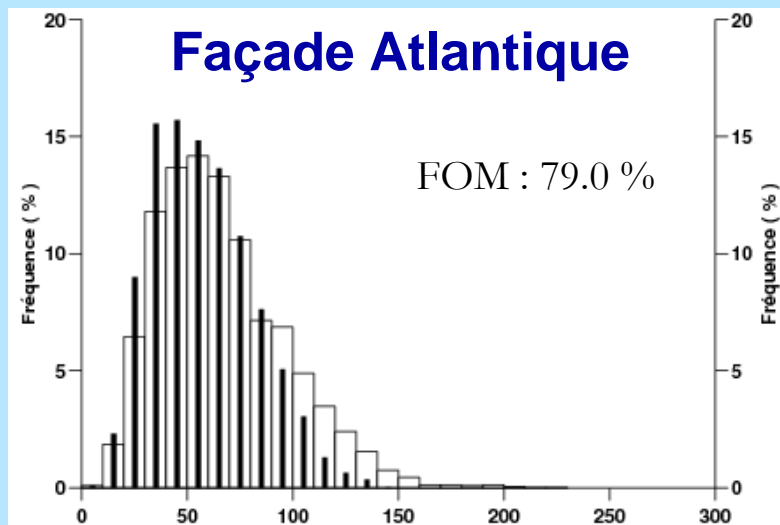
MOCAGE Europe





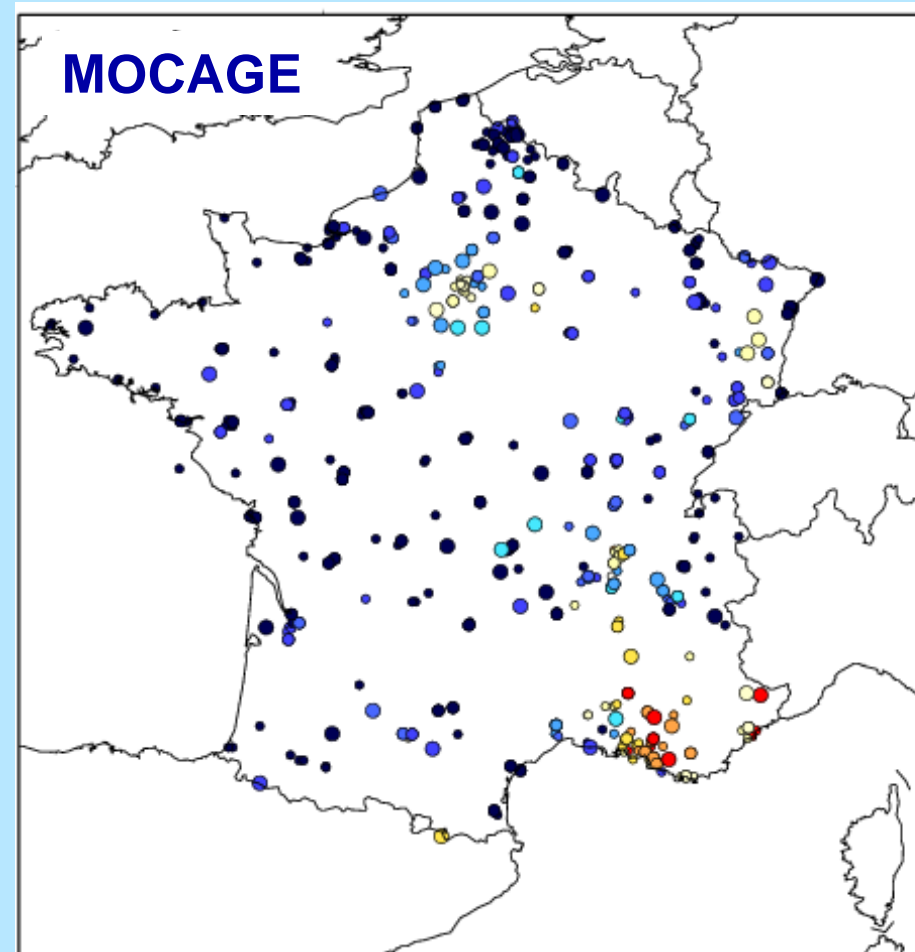
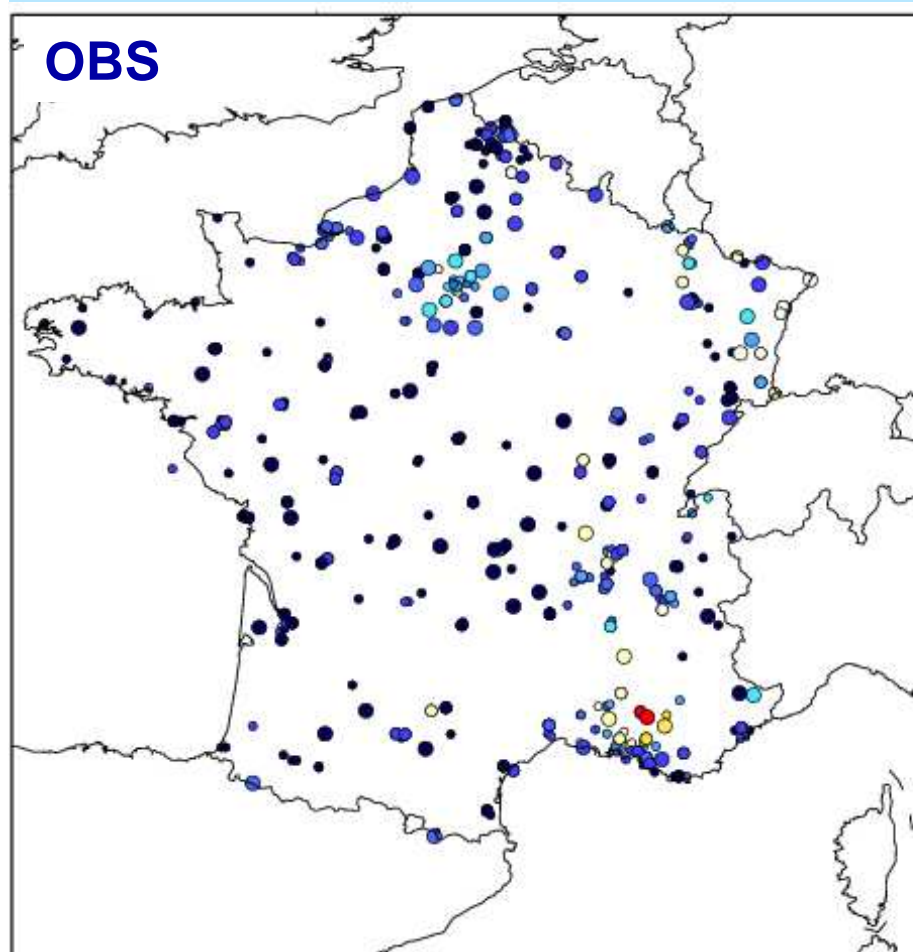
# PREVISIONS ESTIVALES : échelle régionale

## Histogrammes des amplitudes journalières d'ozone



# PREVISIONS ESTIVALES : échelle régionale

Nombre de jours de dépassement du seuil de  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  d'ozone



# PREVISIONS ESTIVALES : échelle régionale

## Adaptation statistique (AS) pour les prévisions d'ozone

- AS par modèles de régression linéaire multiple
- AS spécifique à chaque site et à chaque échéance
- Contexte de type opérationnel

### Prédicteurs :

- [O3] brut prévu par MOCAGE
- T, HU, FF prévus
- Tx,  $\Delta T$  prévus
- FF(0h) prévu
- Type de jour (semaine ou week-end)

### Période d'apprentissage :

- juin/juillet 2002
- août 2003
- mai/juin/début juillet 2005

Moyenne  $\sim 115 \mu\text{g.m}^{-3}$

### Période de test :

- Fin juillet/août/septembre 2005

Moyenne  $\sim 100 \mu\text{g.m}^{-3}$

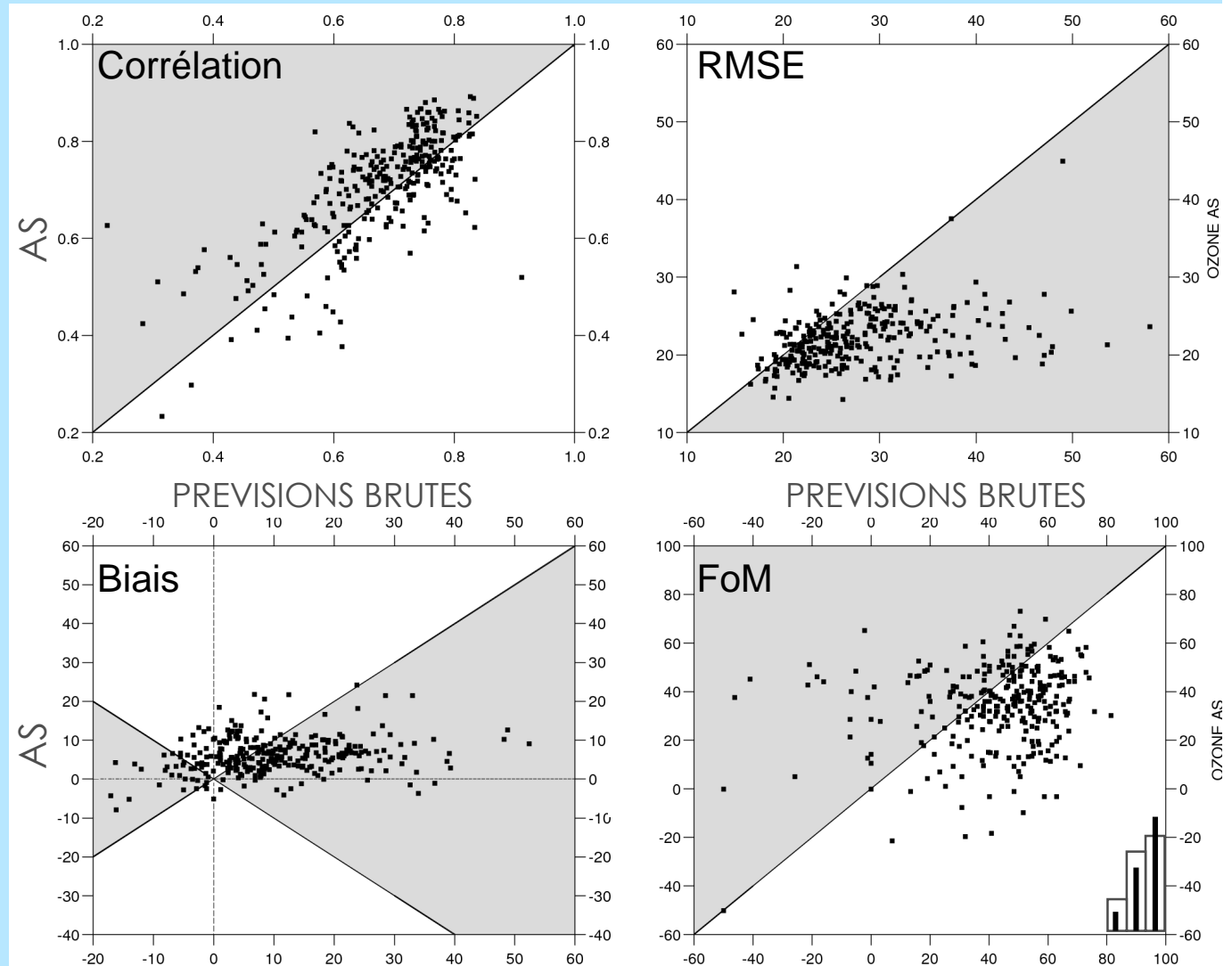
# PREVISIONS ESTIVALES : échelle régionale

Adaptation statistique :

Performances sites à sites sur les pics journaliers d'ozone

- 1 site de mesure

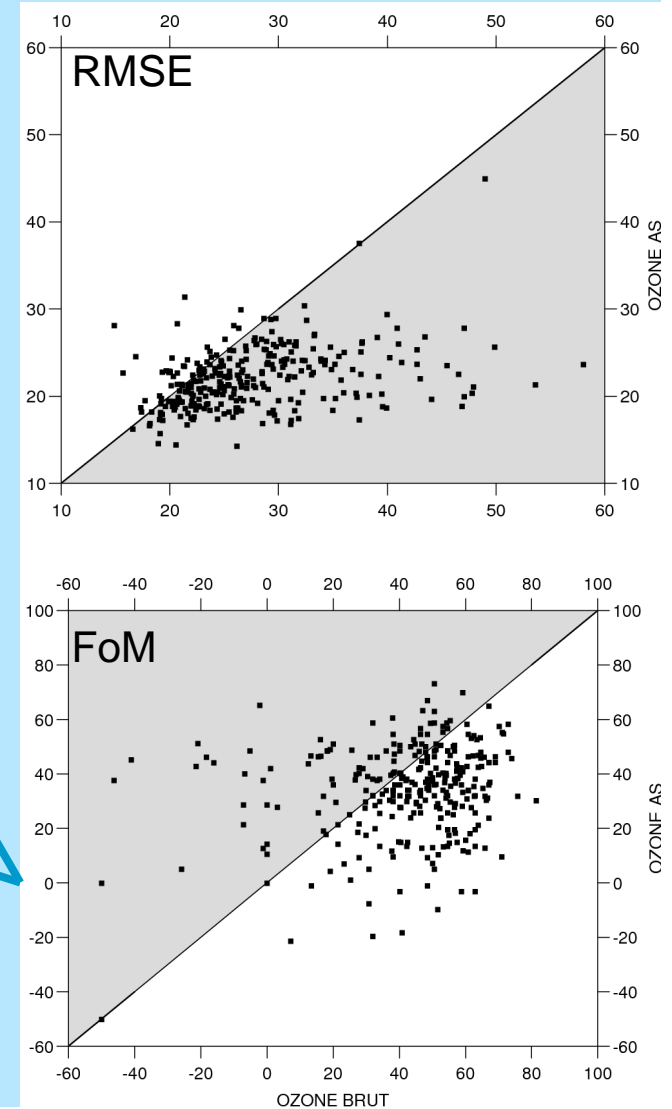
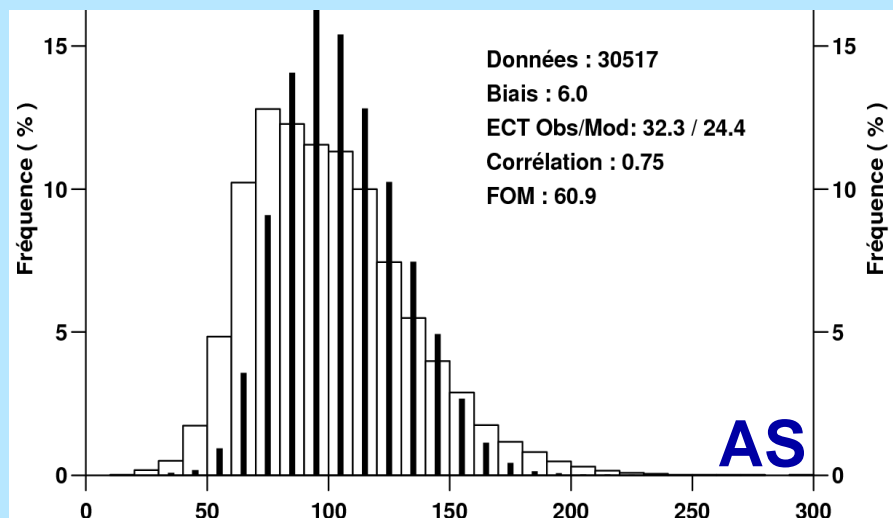
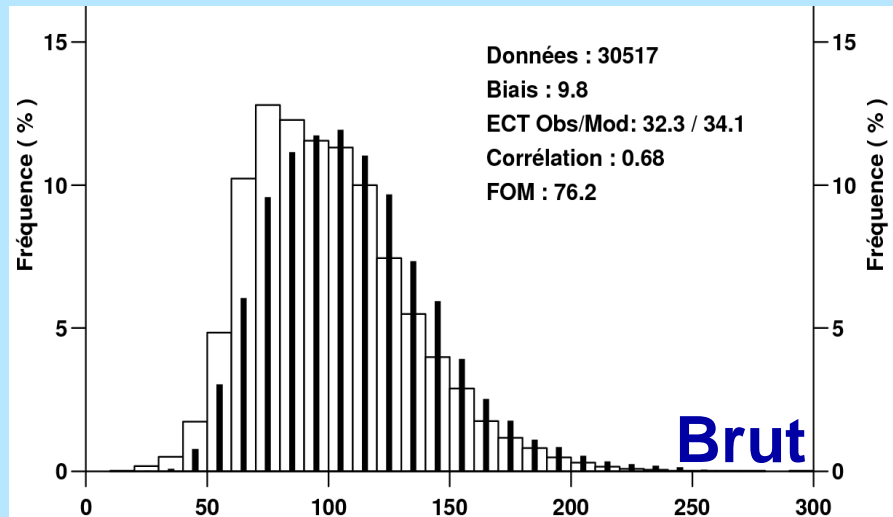
■ Meilleur score pour l'AS





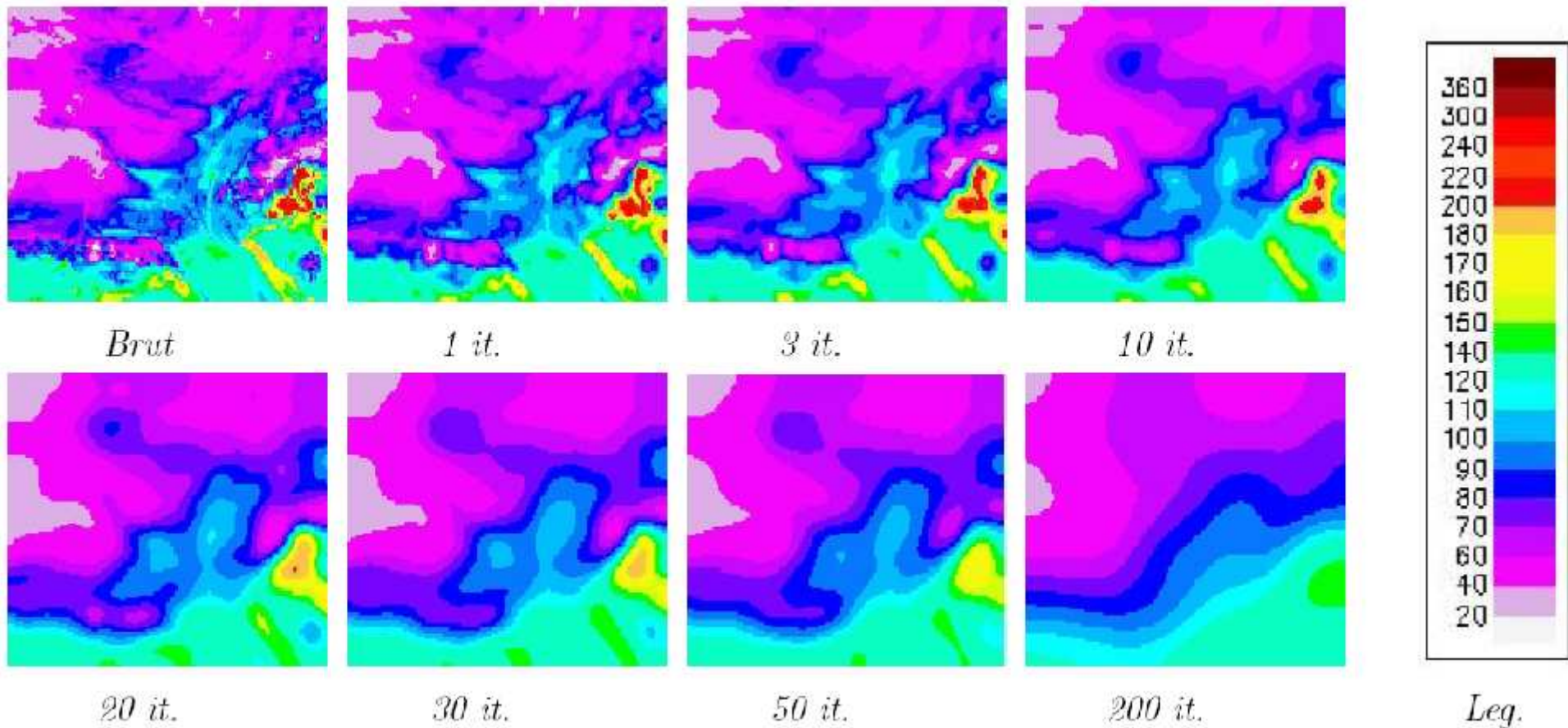
# PREVISIONS ESTIVALES : échelle régionale

## Adaptation statistique : performances sur les pics journaliers d'ozone



# PREVISIONS ESTIVALES

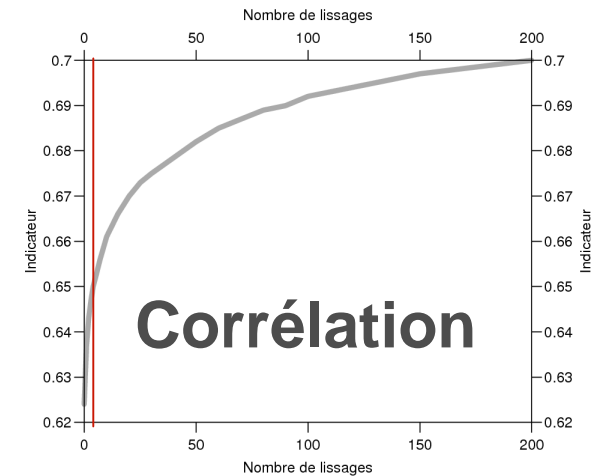
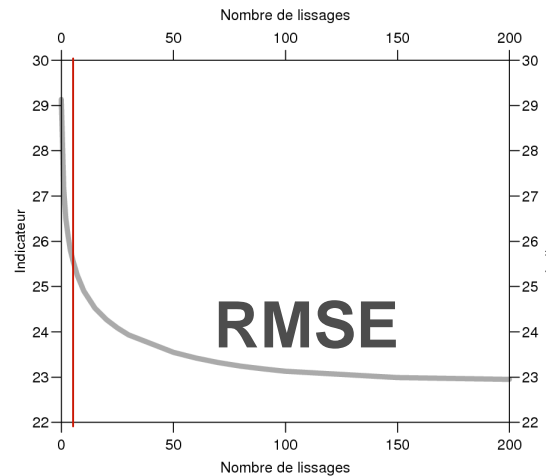
Impact de la taille des structures simulées sur les scores.



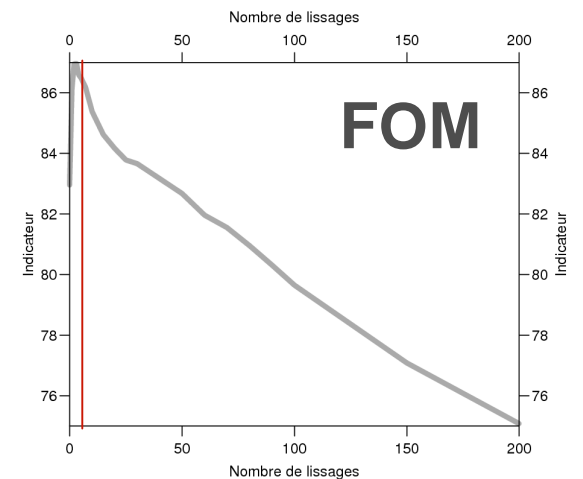
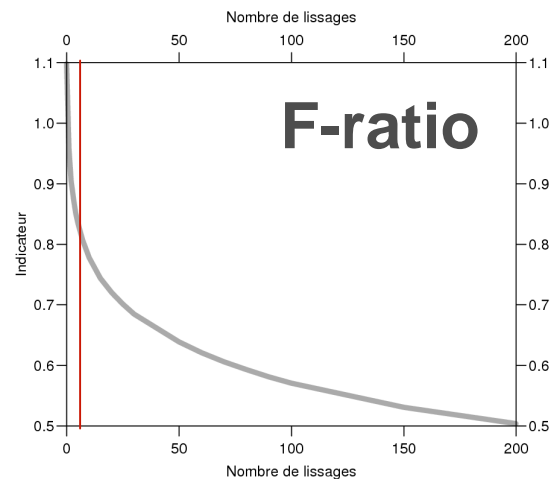
# PREVISIONS ESTIVALES

Impact de la taille des structures simulées sur les scores.

Scores améliorés  
par lissage



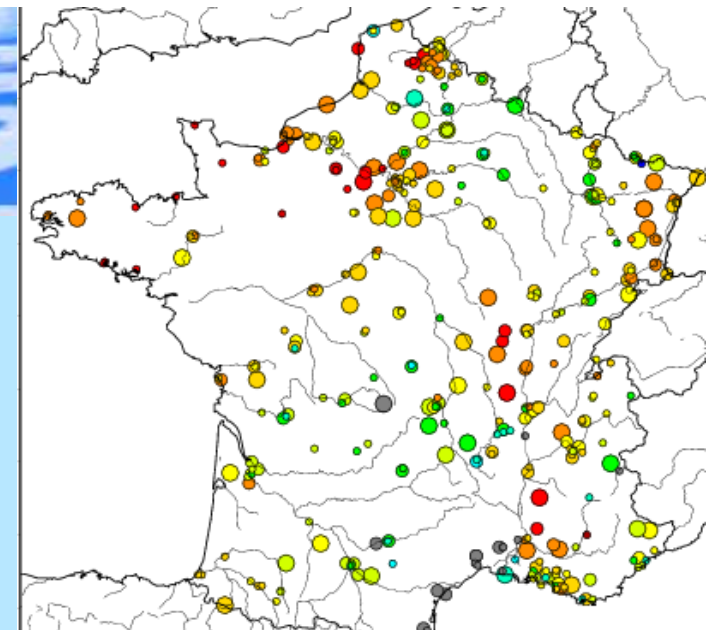
Scores détériorés  
par lissage



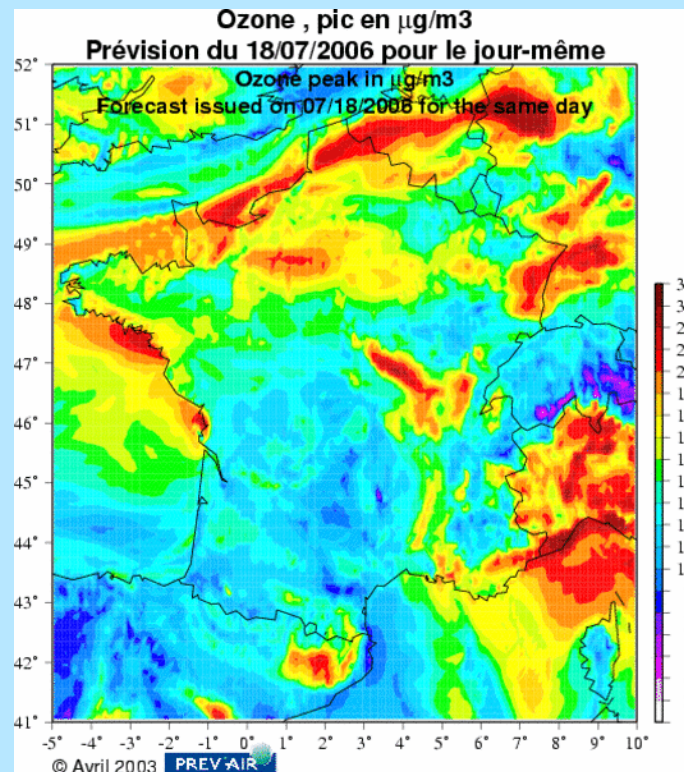


# Pic d'ozone du 18 juillet 2006

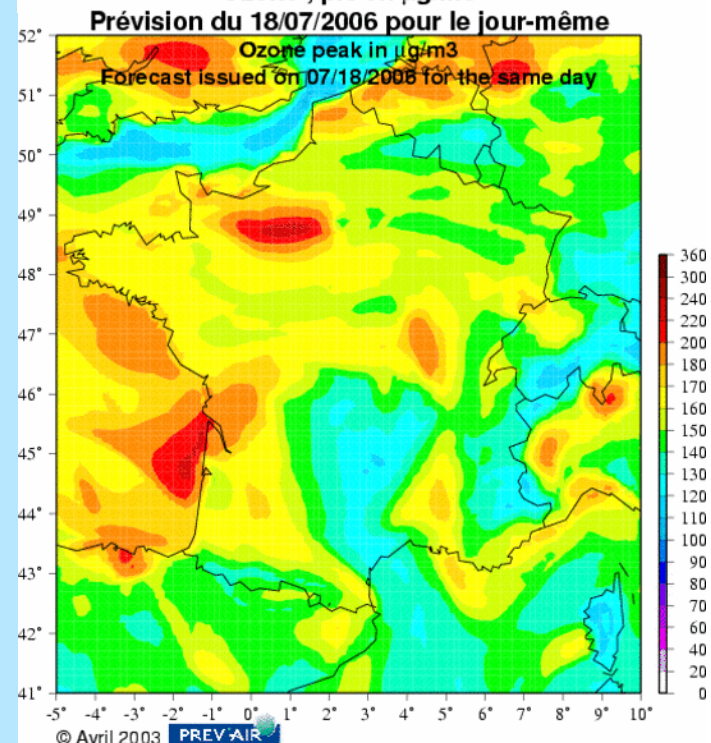
Observations françaises in-situ  
et prévisions J0 de PREV'AIR



Ozone , pic en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$



MOCAGE



CHIMERE

Ministère de l'Écologie  
et du Développement Durable

INERIS

ADEME  
Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Énergie

CNRS  
CENTRE NATIONAL  
DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

Institut  
Pierre  
Simon  
Laplace

METEO  
FRANCE



# Conclusion sur la partie prévisions estivales

## Prévisions effectuées en routine depuis l'été 2001

### Mise en évidence des forces et faiblesses du modèle :

- Bonne reproduction des distributions observées  
spectre de valeurs, particularités régionales, variabilité
- Localisation correcte des grandes zones photochimiques

MAIS

- « Sur-estimation spatiale » des épisodes pollués
- Identification de zones problématiques pour le modèle  
à l'échelle continentale : le Sud de l'Allemagne  
à l'échelle régionale : le Nord-Est (Strasbourg et Metz)

=> Mise en place d'une **adaptation statistique sur site**

**Nécessité d'une analyse conjointe d'indicateurs pertinents pour comparer deux prévisions**

# Plan de l'exposé

- I- Introduction générale et présentation du modèle MOCAGE
- II- Exploitation de la campagne ESCOMPTE
- III- Les prévisions du « temps chimique »
- IV- Lien entre chimie et météorologie

## Objectifs :

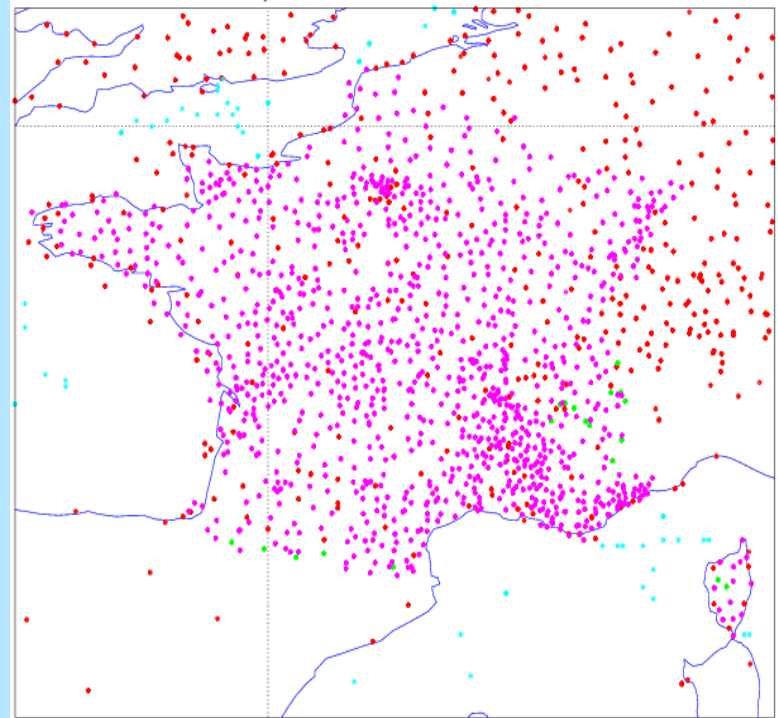
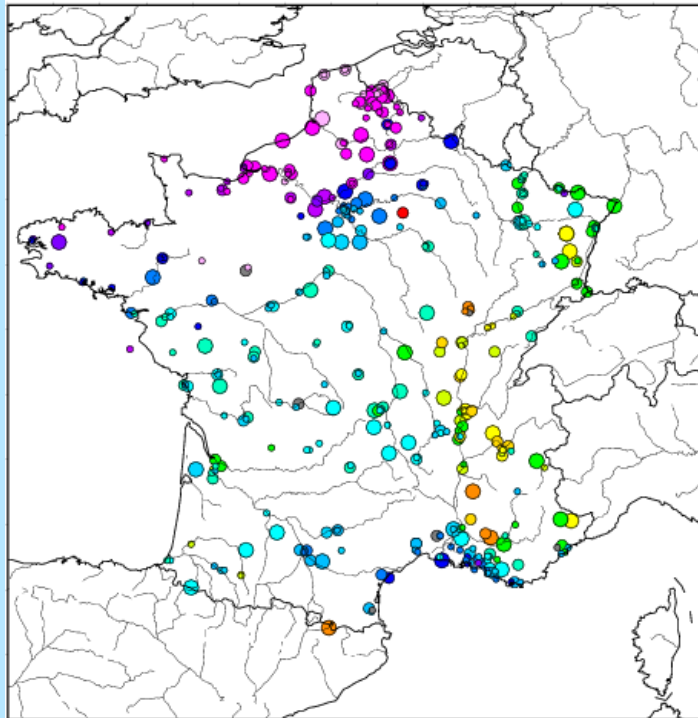
- Mieux comprendre l'impact de la météorologie sur la chimie et dégager les paramètres pertinents pour notre système de modélisation
- Départager la part des erreurs due au forçage météorologique de celle due au modèle de chimie-transport lui-même

# Chimie et météorologie

4 jours de prévisions : Mocage J0 - Aladin 12H-36H  
Mocage J1 - Arpège 36H-60H  
Mocage J2 - Arpège 60H-84H  
Mocage J3 - Arpège 72H-96H

Réseaux utilisées : **AASQAs** (BASTER)  
[ozone]

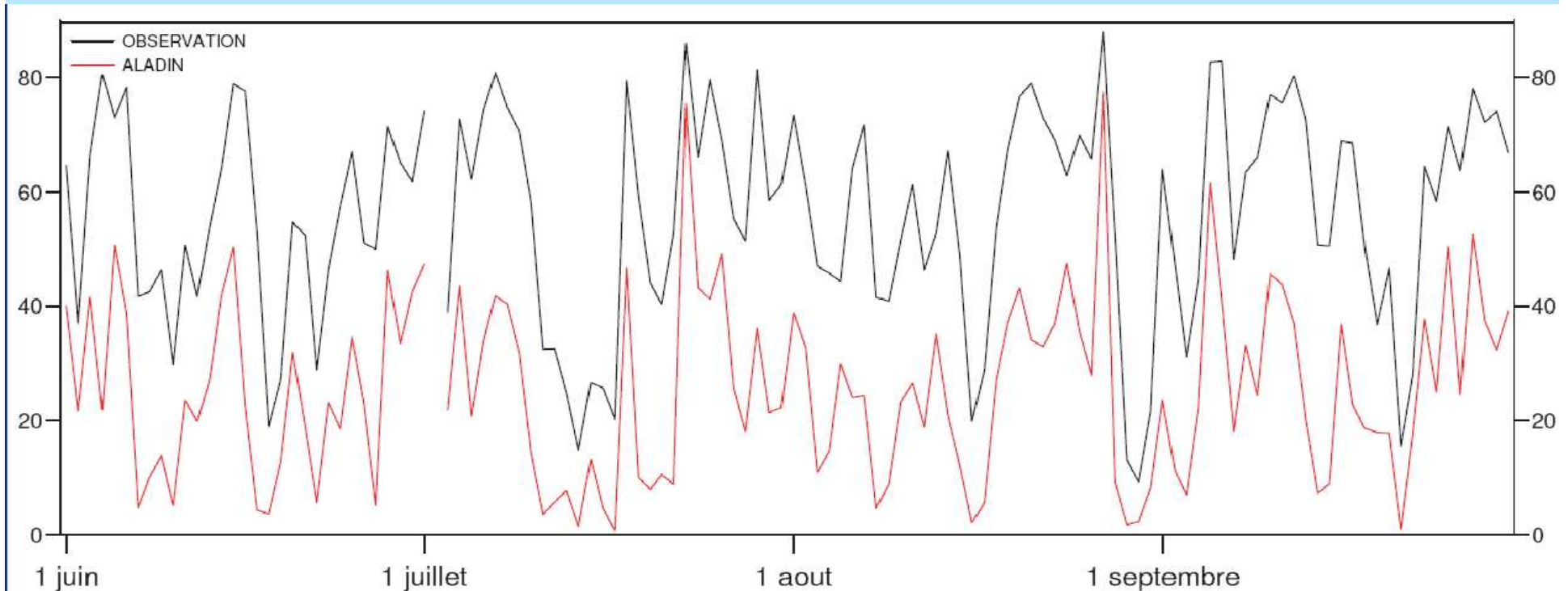
**SYNOP + RADOME**  
T, P<sub>mer</sub>, DD et FF, Hu, RR, Nébul



# Chimie et météorologie

## Performances des prévisions météorologiques utilisées

	T (K)			NEBT (%)			FF (m.s <sup>-1</sup> )			HU (%)		
	$\overline{prev}$	biais	EQM	$\overline{prev}$	biais	EQM	$\overline{prev}$	biais	EQM	$\overline{prev}$	biais	EQM
J0 <sup>a</sup>	23.09	0.44	2.41	25.47	-30.86	43.87	3.73	0.03	1.73	54.39	-0.70	14.13
obs	22.66			55.95			3.70			55.08		





# Chimie et météorologie

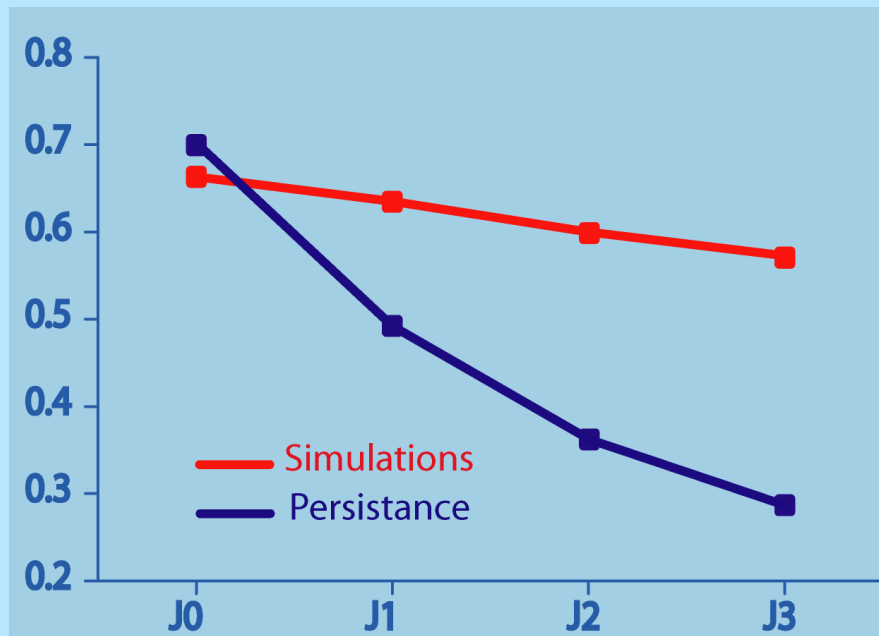
## Evolution des performances de MOCAGE avec l'échéance

La configuration du modèle MOCAGE est la même.

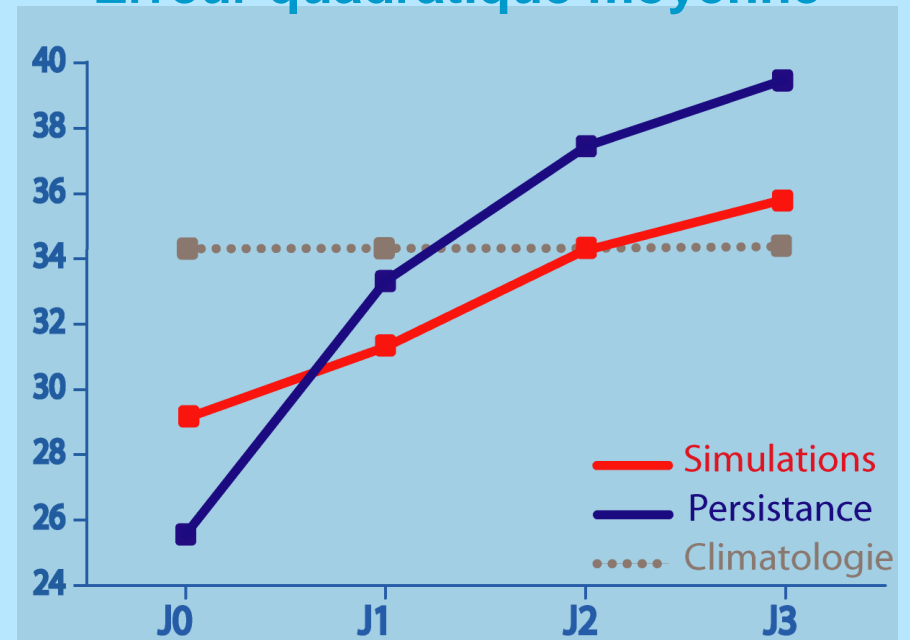
Seuls changent :

- les échéances du forçage météorologique utilisé
- les champs initiaux de concentrations

### Corrélation

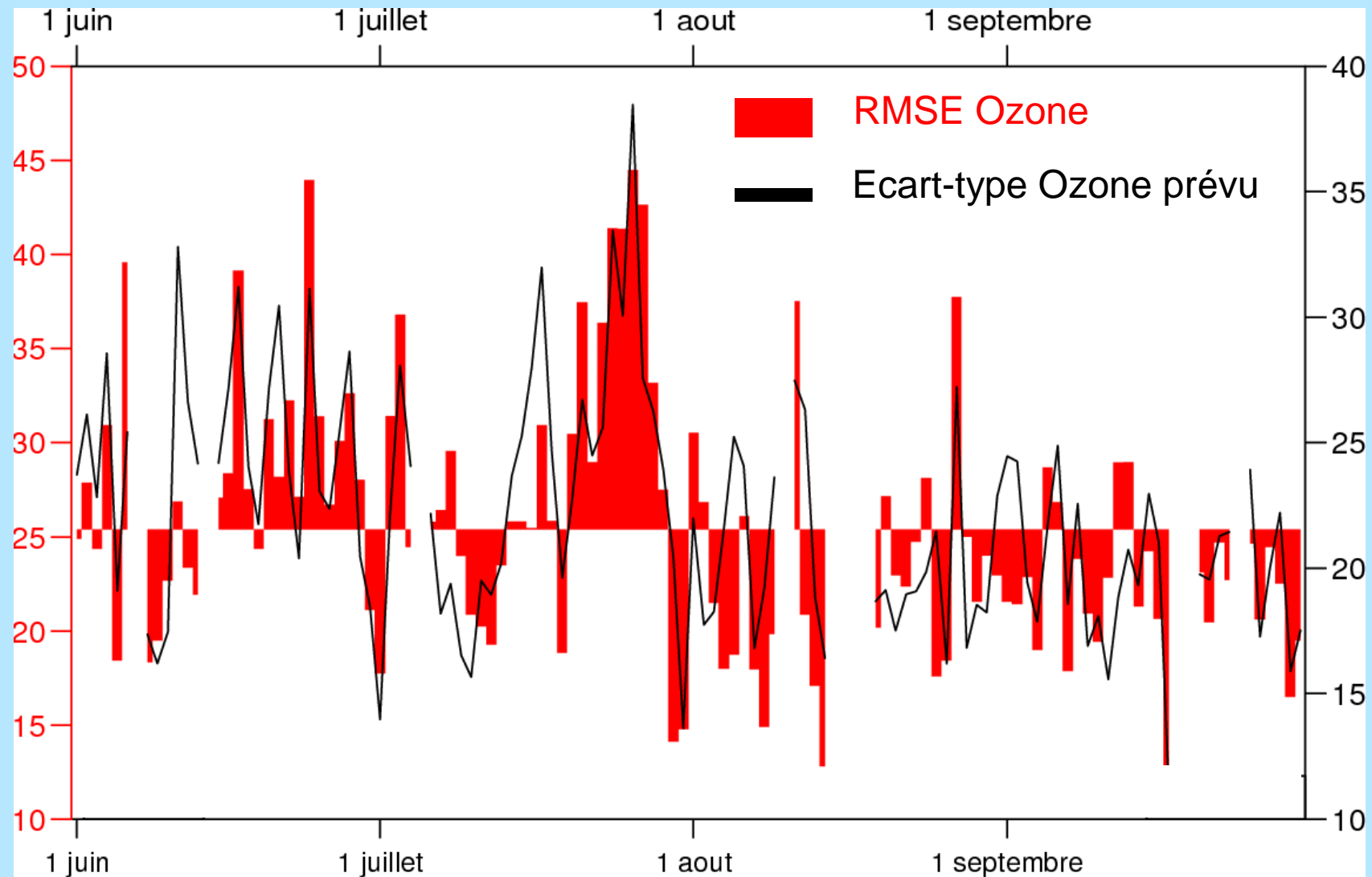


### Erreur quadratique moyenne



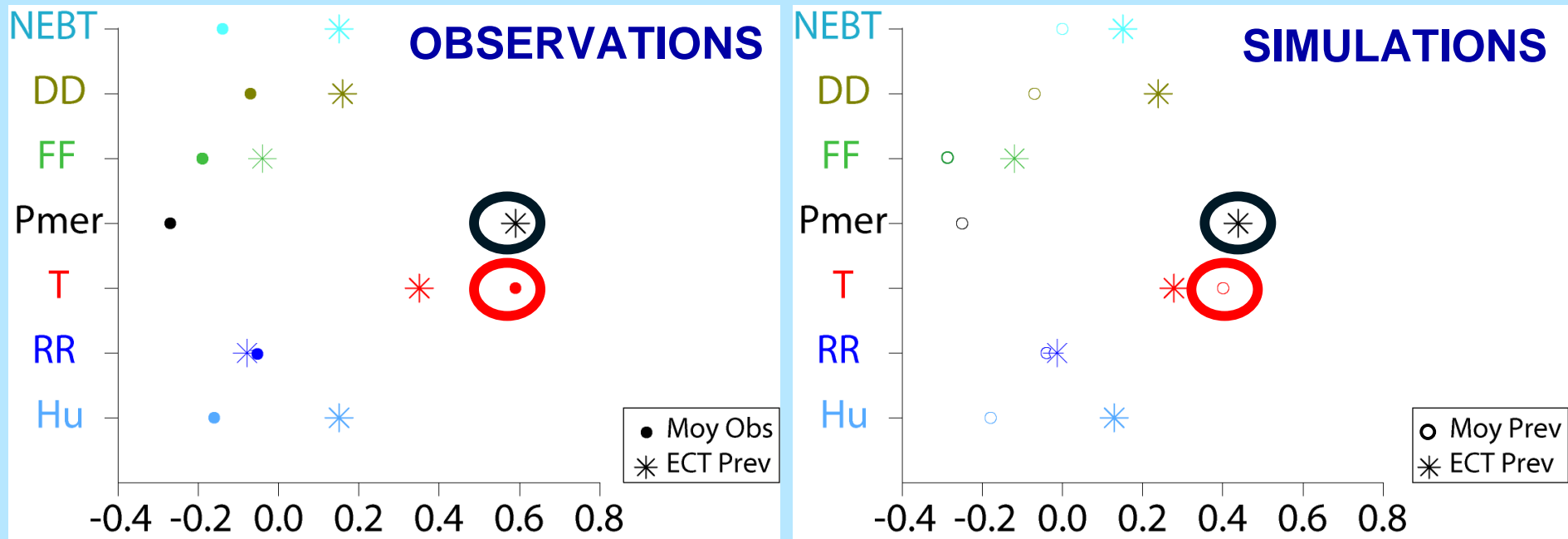
# Chimie et météorologie

Quels paramètres météorologiques pilotent l'hétérogénéité du champ d'ozone?



# Chimie et météorologie

Quels paramètres météorologiques pilotent l'hétérogénéité du champ d'ozone?

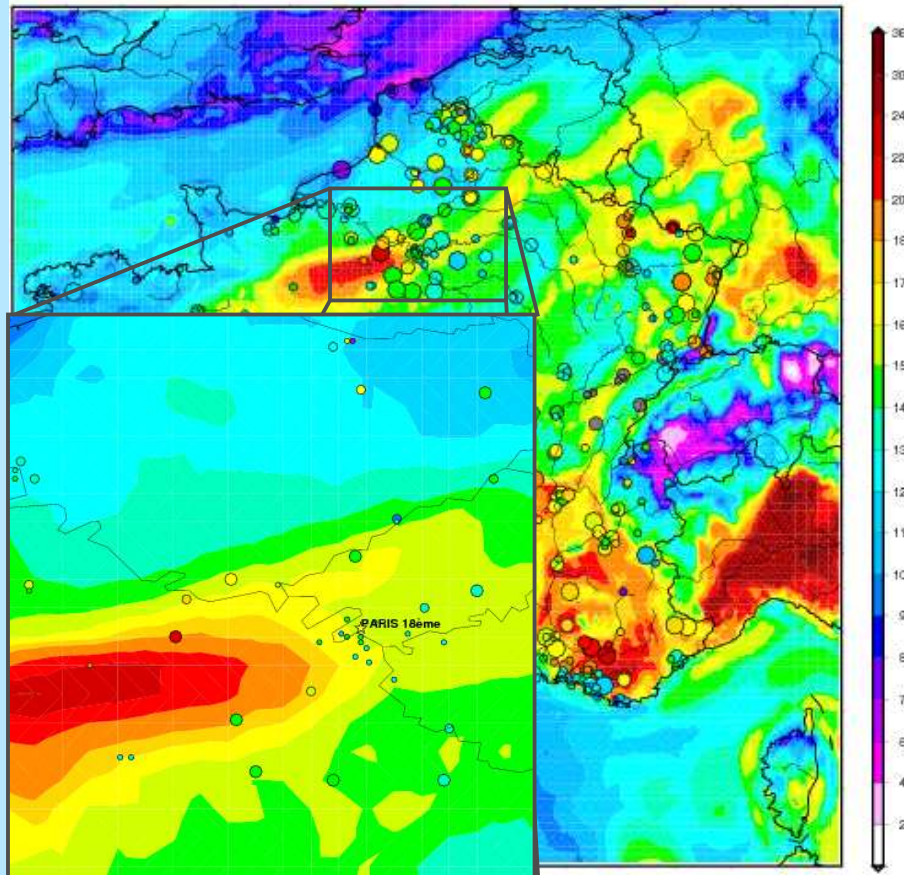


Corrélation entre **écart-type** des concentrations d'ozone et paramètre météorologique

# Chimie et météorologie

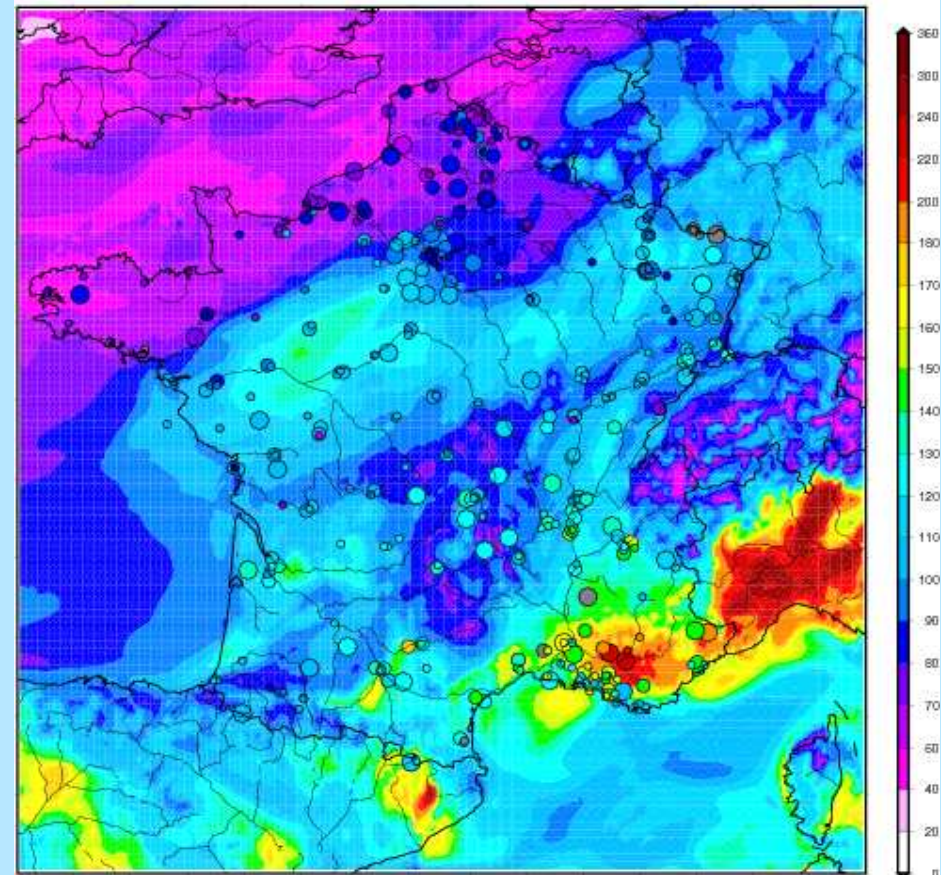
Quels paramètres météorologiques pilotent l'hétérogénéité du champ d'ozone?

Legend : Ozone ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) Surface obs du 20050627 MAX model: ech:J0



**Moyenne en température**  
**Hétérogénéité locale**

Legend : Ozone ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) Surface obs du 20050902 MAX model: ech:J0



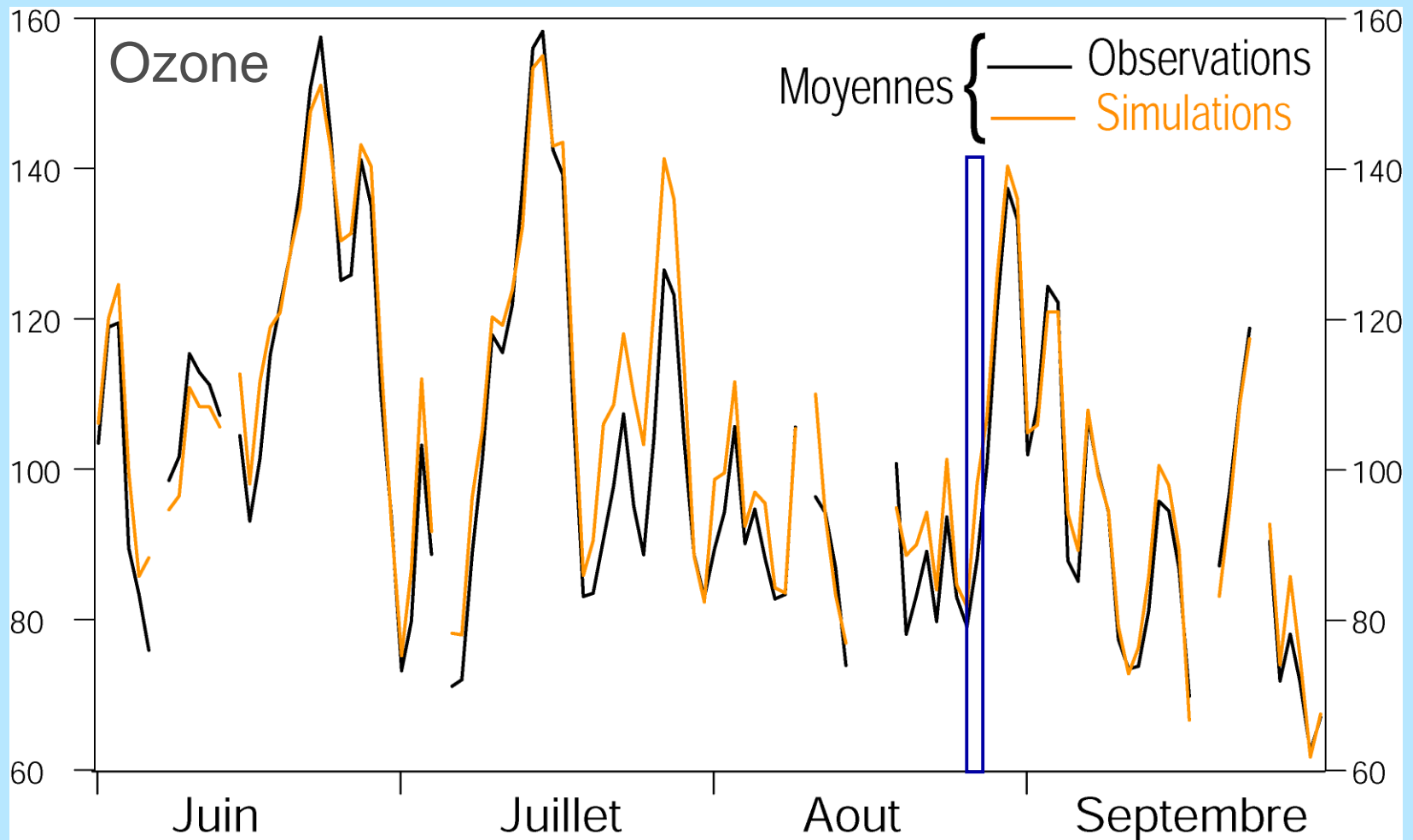
**Ecart-type de pression**  
**Hétérogénéité synoptique**



# Chimie et météorologie

Quelles erreurs sur quels paramètres météorologiques pilotent les erreurs sur le champ d'ozone?

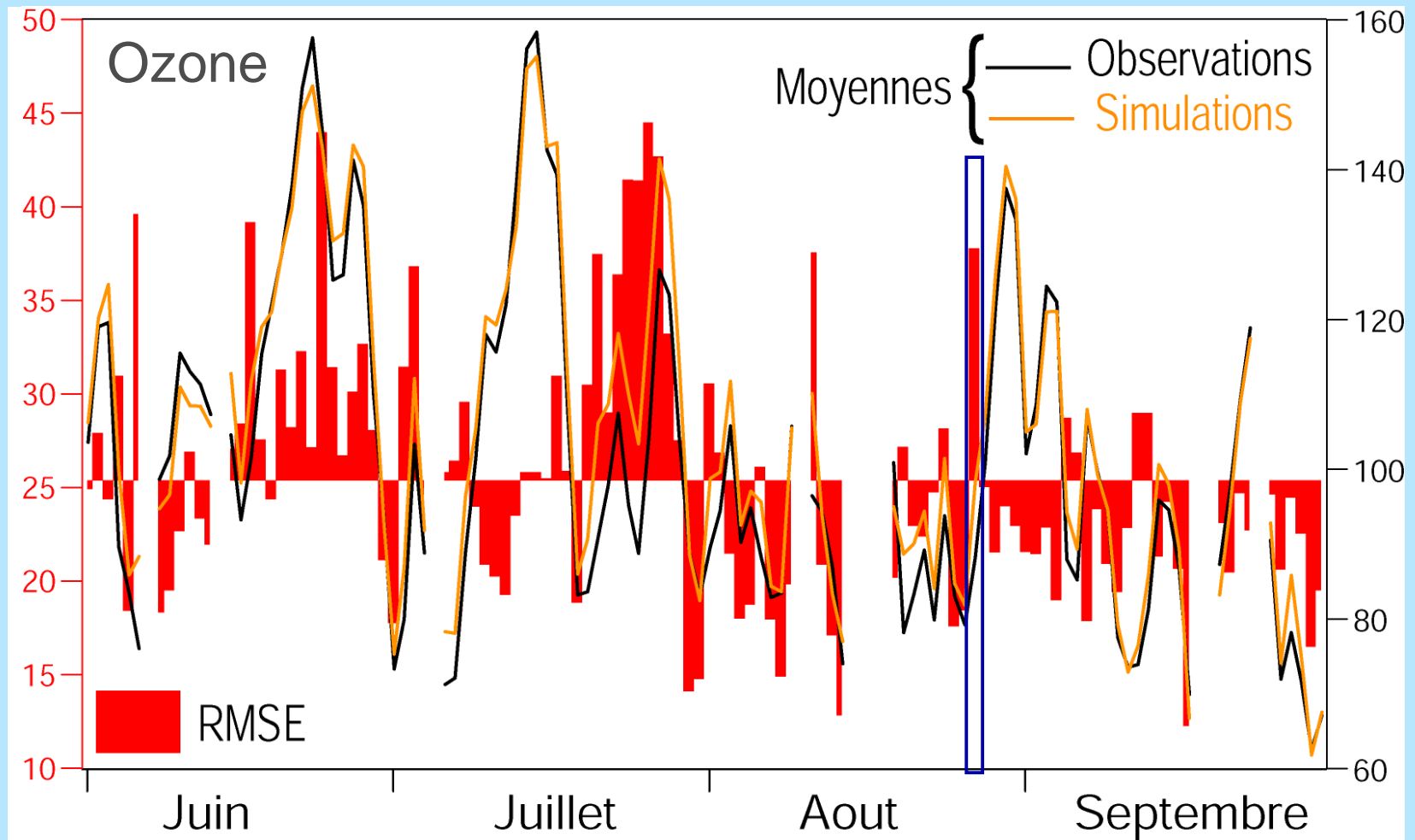
Etude d'un cas particulier : le 27 août 2005



# Chimie et météorologie

Quelles erreurs sur quels paramètres météorologiques pilotent les erreurs sur le champ d'ozone?

Etude d'un cas particulier : le 27 août 2005

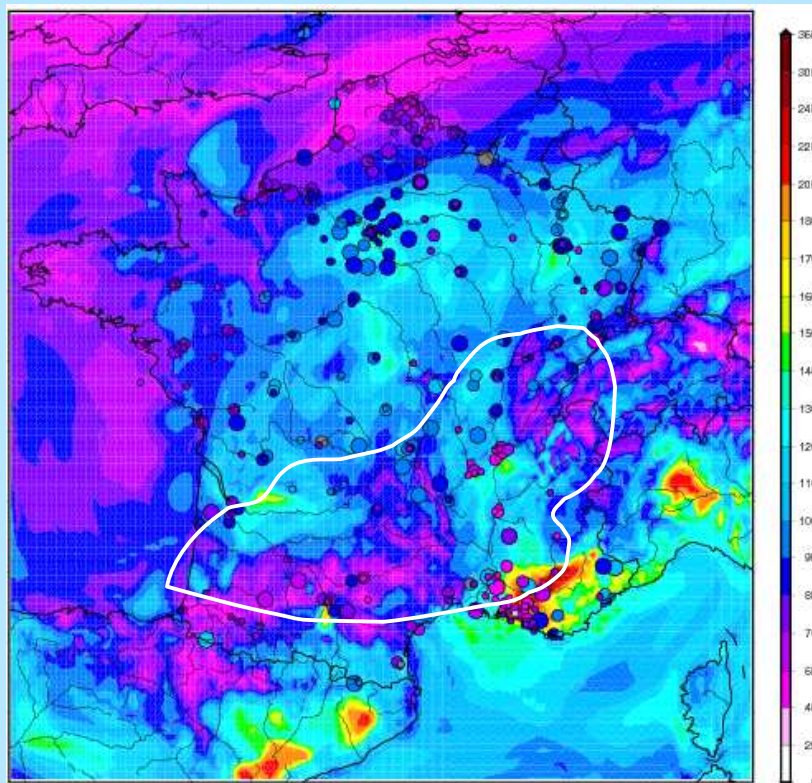


# Chimie et météorologie

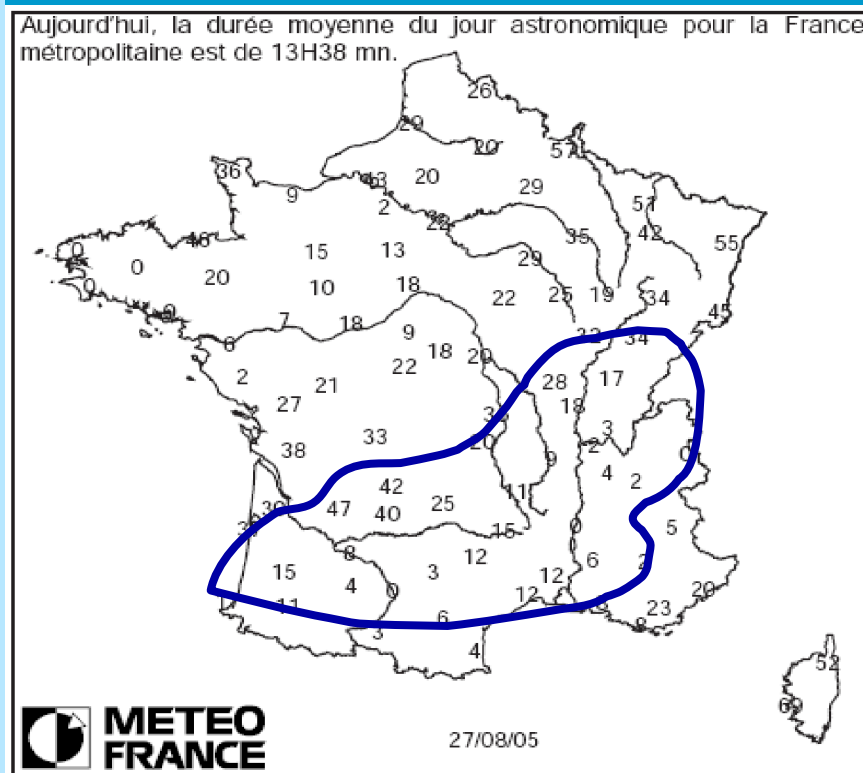
Quelles erreurs sur quels paramètres météorologiques pilotent les erreurs sur le champ d'ozone?

Etude d'un cas particulier :  
le 27 août 2005

A la mi-journée, un corps pluvio-instable s'étend des PO aux pré-Alpes et touche également le sud du Massif Central. L'après-midi [...] les nuages bas qui s'accumulent sur le piémont Pyrénéens laissent toujours s'échapper quelques ondées.



Pic journalier d'ozone

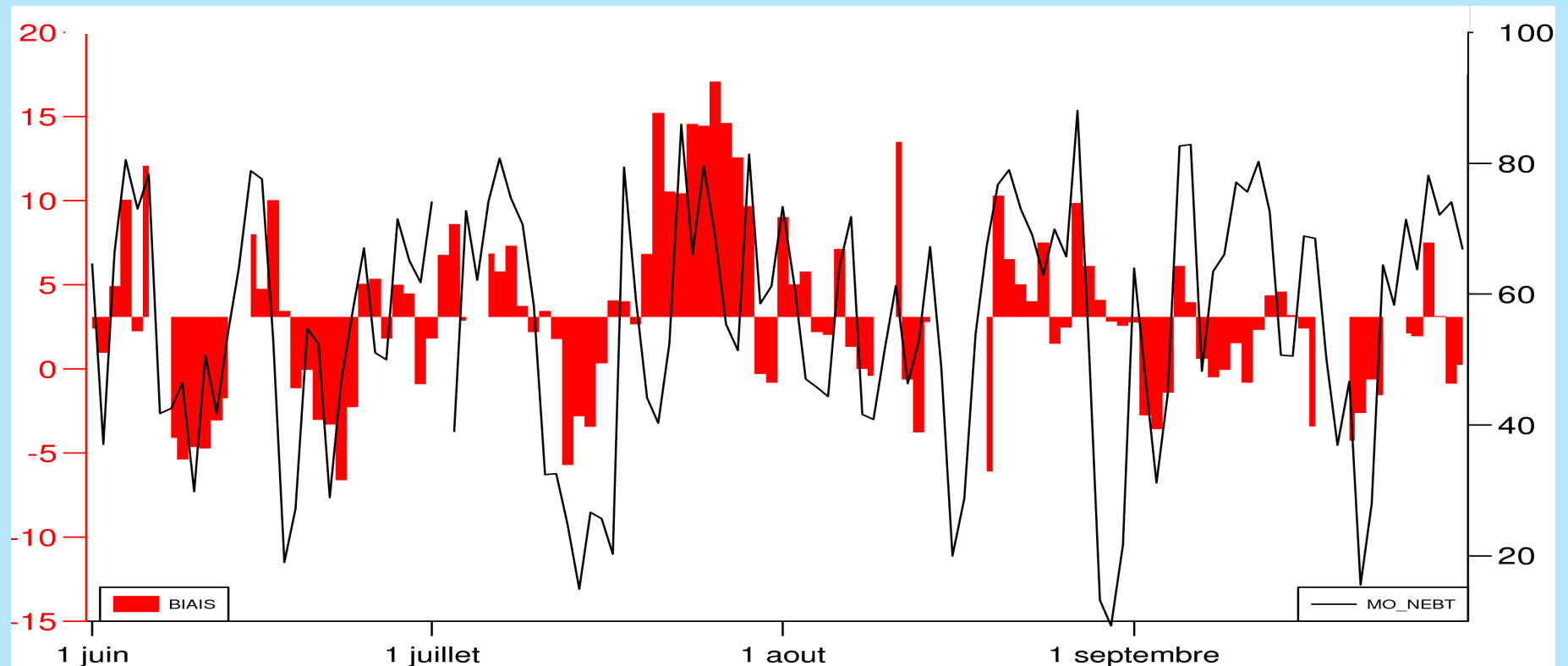


Fraction d'insolation (%)

# Chimie et météorologie

Quelles erreurs sur quels paramètres météorologiques pilotent les erreurs sur le champ d'ozone?

**Biais sur l'ozone** et biais en température (corr ~ 0.45)  
moyenne observée de nébulosité (corr ~ 0.40)



# Chimie et météorologie

Quelles erreurs sur quels paramètres météorologiques pilotent les erreurs sur le champ d'ozone?

**Biais sur l'ozone** et biais en température (corr ~ 0.45)  
moyenne observée de nébulosité (corr ~ 0.40)

**RMSE sur l'ozone** et écart-type de pression (corr ~ 0.45)  
RMSE DD (corr ~ 0.3) FF (corr ~ 0.32)



# Conclusions générales (1)

## **CAMPAGNE DE MESURES (ESCOMPTE)**

**15 journées documentées** : échantillonnage particulier (épisodes exceptionnels)

MOCAGE s'avère capable de simuler des distributions de concentrations d'ozone réalistes en milieu complexe (topographie et émission) sur l'ensemble de la troposphère

Mise en évidence de faiblesses dans la chimie nocturne des  $\text{NO}_x$  et d'un retard au démarrage de la photochimie

L'exercice de modélisation montre que l'évaluation d'un ensemble de modèles est très dépendante de la situation étudiée

# Conclusions générales (2)

## PREVISIONS ESTIVALES

Puissance de la pratique du suivi en routine des prévisions

Mise en place d'une méthodologie de validation basée sur :

- la reproduction du comportement moyen
- la reproduction de la variabilité
- la reproduction des évènements extrêmes

**MOCAGE** montre **une capacité de prévisibilité** à l'échelle de l'AASQA, mais pas encore à l'échelle locale

=> mise en place d'une **adaptation statistique sur site**

Mise en évidence quantitative des liens entre performances du forçage météorologique et performances de la simulation chimique

- Erreurs pilotées par les erreurs sur les paramètres de température et nébulosité
- Variabilité pilotée par la température et la variabilité du champ de pression

# Perspectives

Passage à un forçage météorologique à fine échelle

modèle méso-échelle AROME opérationnel à Météo-France en 2008

Utilisation et exploitation de cadastres d'émissions plus précis

- Europe à 5 km de résolution (GEMS/RAQ-TNO) pour début 2007
- France à 1km de résolution (MEDD)

Participation à la mise en place d'une prévision d'ensemble de la qualité de l'air

projet de recherche GEMS

et sa déclinaison opérationnelle : GMES Atmospheric Service

Assimilation de données in-situ pour initialiser les prévisions en routine