

III Simulation

1) Echelle spatio-temporelle

La première étape de la simulation consiste à définir l'espace qui va être régi par les équations préalablement définies. En effet ces équations vont décrire un phénomène météorologique dont l'étendue au sein de l'atmosphère reste incluse dans une certaine **échelle de variation** (verticale et surtout horizontale), et dont l'évolution continue peut être séparée en **intervalles de temps réguliers**. Cette étendue et ces intervalles de temps s'écarteront assez peu d'un ordre de grandeur qui caractérise dans l'espace et le temps le phénomène étudiée.

Cet ordre de grandeur dépend fortement du type de phénomène ; par exemple, un **orage** aura une étendue comprise entre quelques kilomètres et quelques dizaines de kilomètres, et une durée comprise entre quelques dizaines de minutes et quelques heures.

Ainsi il existe de nombreuses échelles adaptées aux phénomènes observés.

D'abord les **microéchelles**, qui s'étendent de quelques centimètres à quelques kilomètres et durent de quelques secondes à quelques dizaines de minutes. Ces échelles concernent les phénomènes marqués, tels les tornades, mais aussi les processus de frottement et de turbulence associés à la couche de surface. **Le TEB s'inscrit donc dans cette échelle.**

Ensuite, les **mésoséchelles** s'étendent sur quelques centaines de kilomètres et quelques heures et concernent des phénomènes comme les lignes de grains, les brises de mer ou les ondes de relief. **Cette échelle est celle du modèle Mésos-NH de Météo-France.**

Enfin au-delà des mésoséchelles se situe la **macroéchelle**. Elle constitue le cadre du modèle **Arpège** de Météo-France qui inclut un modèle de maille plus fine : **Aladin** (voir figure 9). La macroéchelle comprend :

- l'**échelle synoptique** allant de quelques centaines à quelques milliers de kilomètres et se prolongeant quelques jours en moyenne (cette échelle constitue le cadre du suivi opérationnel des perturbations tempérées)
- l'**échelle subsynoptique** légèrement plus réduite (cyclones tropicaux)
- l'**échelle suprasynoptique** plus étendue (dépressions et anticyclones)
- l'**échelle globale** (adaptée à la prévision de la circulation générale et des variations du bilan radiatif)

Le fonctionnement de l'atmosphère peut alors être interprétés comme résultant de continus transferts d'énergie et de mouvement entre échelles successives : d'où la nécessité de **modèles emboîtés**, comme Arpège et Aladin.

2) Réglages, simulation et résultats

Un modèle numérique, comme le TEB, pour faire de bonnes prévisions, fait l'objet de nombreux réglages. En effet puisqu'il constitue une **paramétrisation** d'un modèle de plus grande échelle spatio-temporelle, il doit être compatible avec ce dernier. Plus exactement il doit fournir des

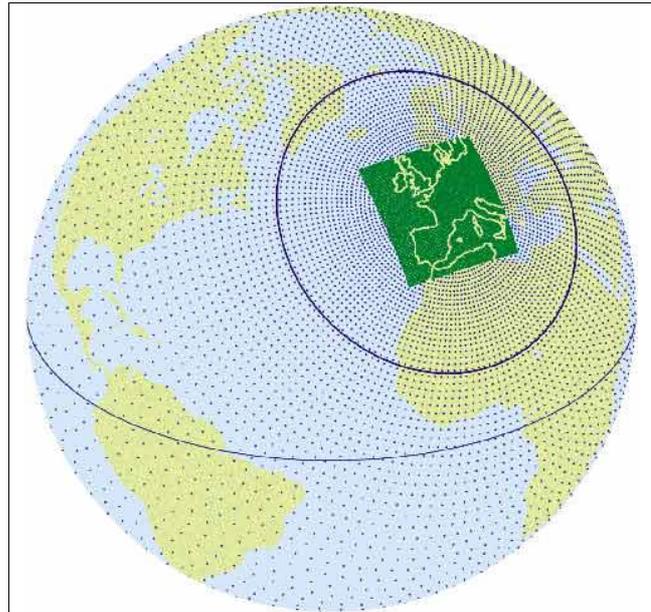


Figure 9 : Découpage en points de grille pour le modèle opérationnel Arpège en service début 2000. En vert la portion de la planète utilisée pour le modèle Aladin.

prévisions correctes des variables de surface servant à la détermination du temps sensible (précipitations, ensoleillement), et ce sur **une durée suffisamment longue** pour rendre compte de l'évolution générale du climat.

Malgré ces réglages et l'exactitude croissante des modèles grâce aux nombreuses paramétrisations, les résultats ne peuvent être exactes au-delà d'une certaine limite. Cette **limite de prévisibilité** tient à plusieurs raisons :

- la **non linéarité** des équations d'évolution,
- les **approximations** des modèles numériques pour résoudre ces équations,
- le degré d'incertitude des **mesures** effectuées pour déterminer l'état initial.

En effet les modèles numériques présentent une forte sensibilité aux conditions initiales, en ce sens que deux états initiaux voisins peuvent conduire à des **solutions divergentes** au-delà d'une certaine échéance : le système « atmosphère » est donc **chaotique**. Cette échéance fixe la limite de prévisibilité des modèles. Avec les modèles actuels, cette limite est de l'ordre de **quatre à cinq jours** pour l'échelle **synoptique** (voir **III 1.**). L'effort consiste donc au-delà de cette échéance à prévoir la distribution des diverses valeurs prévues et les probabilités qui leurs sont associées. On parle alors de **prévisions probabilistes**.

Une des méthodes couramment utilisée pour ce genre de prévisions consiste à simuler un grand nombre d'évolutions possibles de l'atmosphère à partir d'états initiaux convenablement perturbés. C'est ainsi qu'est né l'**indice de confiance** affecté à la prévision déterministe.

Un exemple de prévision est montrée sur la figure 11 afin de voir cette limite de prévisibilité. Il s'agit ici d'**inondations ayant touchée la vallée de l'Aude** entre le 12 et le 13 Novembre 1999. La distribution des pluies observée par le réseau de pluviomètres est représentée sur la figure 10, avec un maximum de **551 mm de pluie** en 24 heures à Lézignan. La distribution prévue par le modèle Aladin (résolution horizontale de 10 km) en utilisant les observations du 11 Novembre 1999 à 12 heures est représentée sur la figure 11.

Le risque de pluie sur l'Aude a bien été prévu (cercle rouge) mais de nombreuses différences peuvent être observées. D'abord le maximum prévu est de **246,2 mm**, alors que le maximum observé est de **551 mm**. Ensuite on peut voir de vastes zones de pluies prévues (en vert) qui n'ont pas eu lieu. Enfin l'emplacement et la valeur des fortes pluies ne coïncident pas toujours avec les observations. C'est pourquoi ces prévisions numériques ont besoin d'être analysées et améliorées par les **prévisionnistes**.

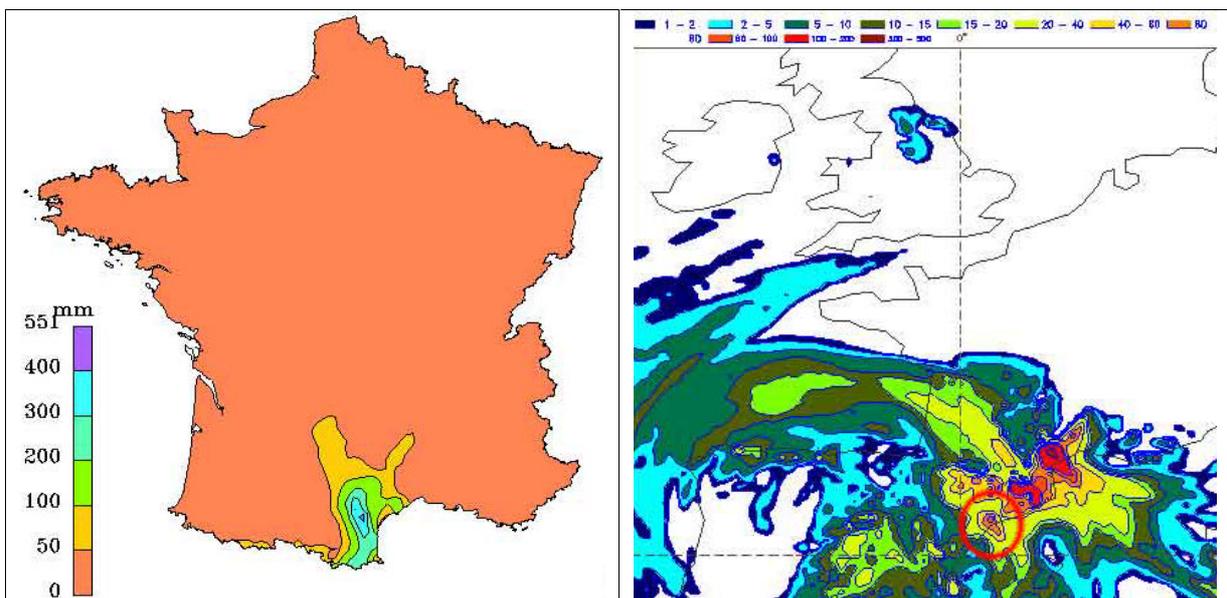


Figure 10 : Observations

Figure 11 : Prévisions

La simulation dans le cas du schéma de surface TEB

1) Echelle spatio-temporelle

La simulation est effectuée sur la ville de **Marseille**. Le domaine modélisé correspond à une aire précise du centre ville. On peut choisir deux approches : une **statique** et une **dynamique**.

L'approche statique stipule que les paramètres de surface autour du site de mesure sont **homogènes**. On définit alors une aire circulaire centrée sur le site de mesure principal et les paramètres de surfaces sont calculés.

L'approche dynamique prend en compte les **sources de flux turbulents** en fonction du vent changeant et des conditions de stabilité de l'air.

Cette étude se fera dans le cadre de l'**approche statique**.

On définit alors une aire circulaire d'**un kilomètre** de diamètre centrée sur le mât de mesure (voir photo satellite 2).



Photo 2 : Aire de simulation

Les paramètres de surface pour ce domaine utilisés plus tard par le modèle pour la simulation sont calculés et regroupés dans le tableau suivant :

Proportions des différentes surfaces		Propriétés des toits	
Surface naturelle	0.136	Matériaux	Tuile ou gravier sur béton, bois et isolants
Eau	0.000	<u>Albédo</u>	0.22
Surface urbaine	Routes : 0.269	Fraction d'énergie émise	0.90
	Bâtiments : 0.595	ZOM_{toit}	0.15 m
Paramètres géométriques du TEB		Propriétés des parois	
Hauteur des bâtiments	15.6 m	Matériaux	Pierre et volets en bois
Aspect du canyon : rapport Hauteur/Largeur	1.63	<u>Albédo</u>	0.20
Proportion Parois/Plans	1.14	Fraction d'énergie émise	0.90
ZOM (longueur de rugosité aérodynamique)	1.90 m	Conditions initiales	
		Intérieur des bâtiments	22°C
Propriétés de la route		Sol en profondeur	17°C
Matériaux	Béton et asphalte sur sol sec	Mesures d'albédo Mesure des températures de surface	
<u>Albédo</u>	0.08		
Fraction d'énergie émise	0.94		
ZOM_{route}	0.05 m		

Etant donné le trafic important dans Marseille, un **flux thermique** Q_{trafic} dû à la **circulation** a été inclus aux simulations et affecté des valeurs suivantes : **15 W.m⁻²** le jour et **2 W.m⁻²** la nuit. A noter que ce flux est relativement petit comparé aux divers flux de rayonnement mesurés sur le site.

La simulation est lancée avec les **conditions initiales** collectées par le mât de mesure et les appareils de mesure d'albédo et de température de surface, et ce pour deux niveaux de **forçage** (voir détail des relations (4) et (5)) : **34.6 m** et **43.9 m**. Le pas de temps est de **30 minutes**.

2) Résultats et réglages pour la T° au-dessus du canyon

La température au-dessus du canyon T_a prévue par le TEB est comparée à une moyenne effectuée à partir de T° prises dans cinq rues du centre-ville (voir photo 3). Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 12.

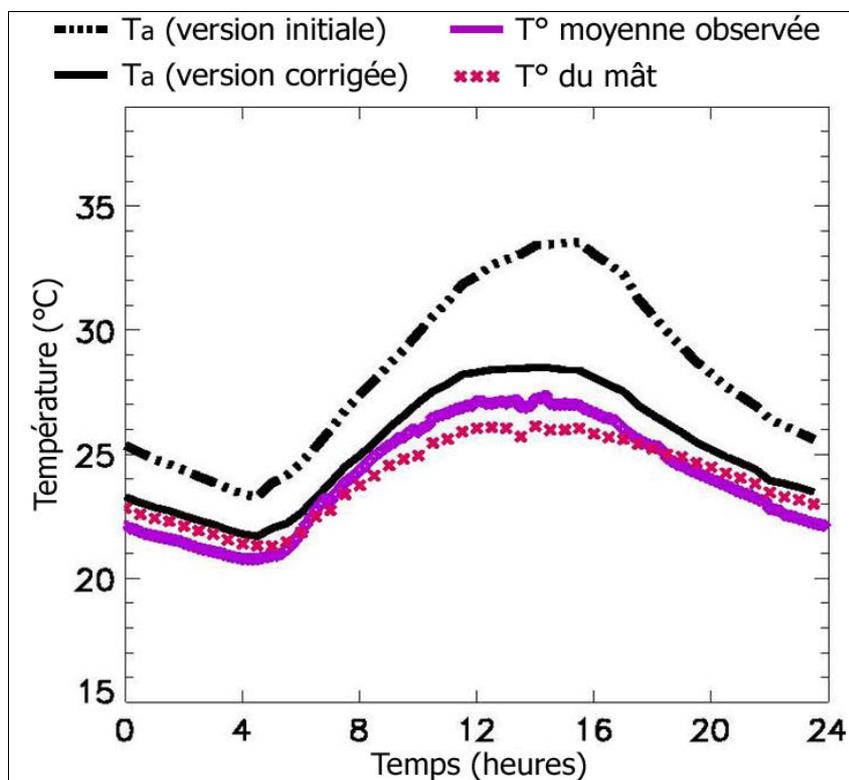


Figure 12 : Résultats de la prévision de T_a



Photo 3 : Mesure de la température à la surface d'une rue de Marseille

La première version du TEB surestime alors T_a de **4°C pendant la nuit**, et de **6 à 10°C pendant la journée**.

Les observations montrent alors que la différence de T° entre l'air à l'intérieur du canyon et l'air au-dessus des toits est faible, tandis que la T° à la surface des

parois et de la route est très élevée. Si le modèle surestime T_a , c'est peut-être parce qu'il prend trop en compte **les T° élevées de la route et des parois** en sous-estimant l'influence de la T° de l'atmosphère sur la température à l'intérieur du canyon, qui est considérable puisque la température de l'air à l'intérieur du canyon est presque égale à celle au-dessus des toits.

Des recherches sur la dispersion des polluants ont déjà mis en évidence **des processus de ventilation** à l'intérieur des canyons dépendant des conditions thermiques et de la géométrie de la rue. D'autres recherches ont prouvé que la différence de T° entre l'air à l'intérieur de la rue et la surface des parois (ou des routes) est **élevée**, mais que la différence de T° entre l'air à l'intérieur du canyon et l'air à sa surface T_a est **faible**.

On peut conclure de ces résultats que la résistance thermique entre l'air à l'intérieur du canyon et l'atmosphère (R_{sup} , voir figure 5) est **très faible**. Pour corriger la valeur de R_{sup} et l'abaisser, il faut donc augmenter la **vitesse de ventilation de l'intérieur de la rue**, c'est-à-dire

augmenter la longueur de rugosité aérodynamique de la ville $Z_{0Mville}$ (voir relation (5)). Les valeurs des différentes longueurs de rugosité utilisées sont regroupées dans le tableau ci-contre.

	Version initiale	Version corrigée
$Z_{0Mroute}$	0.05 m	0.05 m
Z_{0Mtoit}	0.15 m	0.15 m
$Z_{0Hroute}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$
Z_{0Htoit}	$7.5 \cdot 10^{-4}$	$7.5 \cdot 10^{-4}$
Z_{0Hsup}	$Z_{0Mville} / 200$	$Z_{0Mville}$

Après correction, la prévision est bien meilleure et **diffère de l'observation de seulement 2°C**, ce qui est acceptable étant donné que la T° observée est une moyenne sur différentes rues dont la T° varie en fonction de la distance du littoral, de la végétation, de la géométrie de la rue et de la nature des bâtiments.

Il faut noter que T_a dépend des différentes **températures de surface** de la route, des parois et des toits (voir relation (1)) calculées également par le TEB grâce à plusieurs **calculs radiatifs** (énergie absorbée par les différentes surfaces, proportion de rayons incidents absorbés...). L'exactitude de la prévision de T_a est donc aussi due à la bonne prévision de ces températures de surface, comme le montre la figure 13.

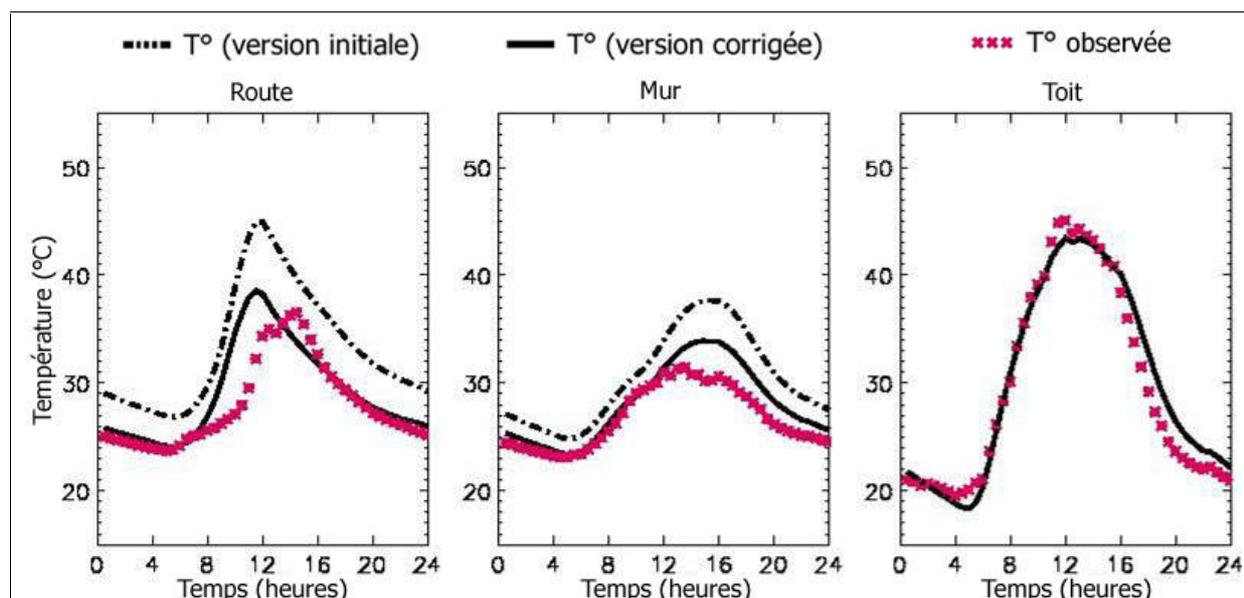


Figure 13 : Comparaison entre les valeurs observées et calculées des différentes températures de surface.

Après réglage, le TEB est donc opérationnel pour la ville de Marseille. Le TEB a ensuite été testé sur **Paris** après avoir été **inclus au modèle MésO-NH** de plus grande échelle (mode **on-line**, voir **II 1. B.**) et les différentes simulations ont une fois de plus été validées par les observations.

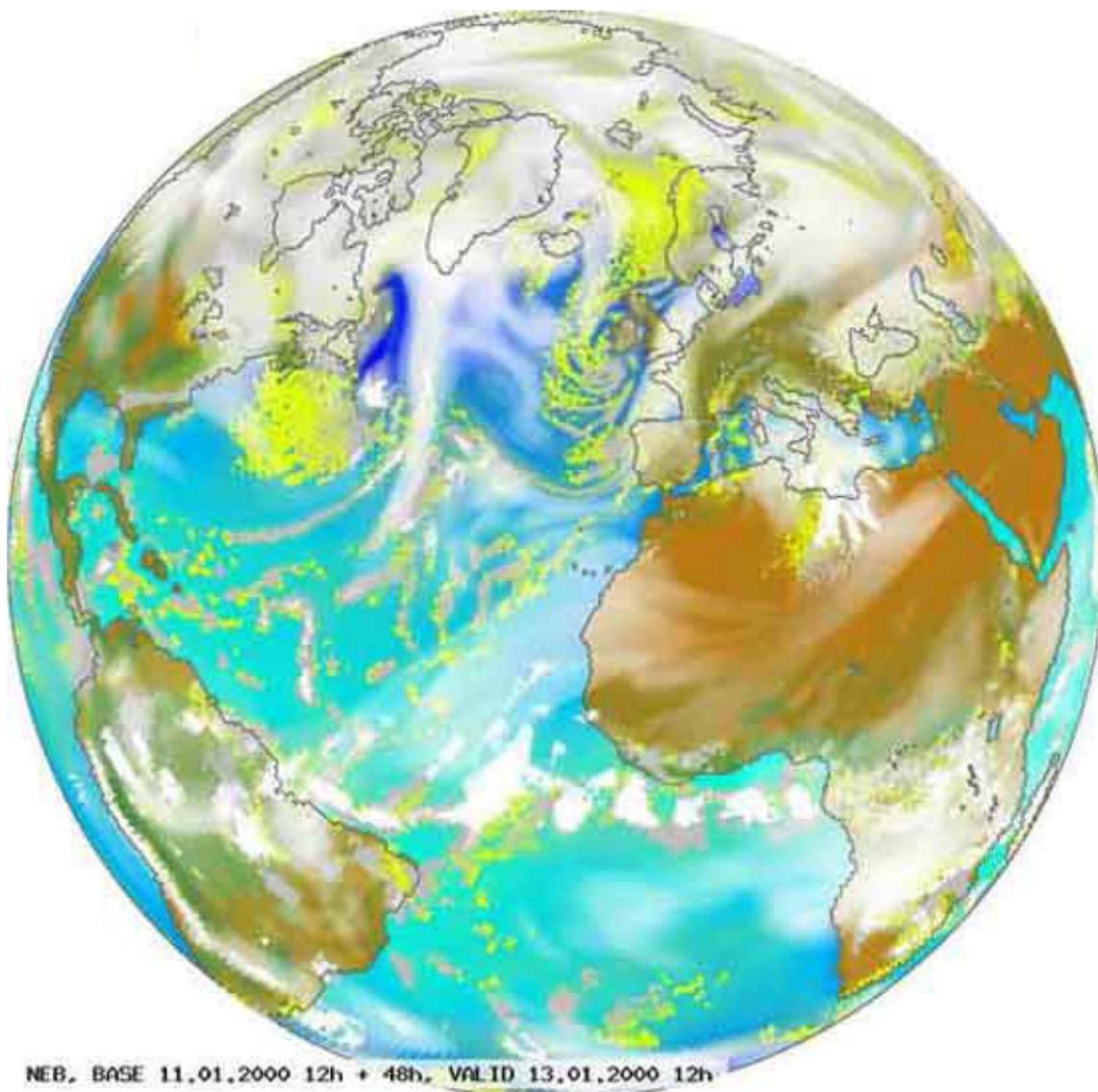
L'îlot de chaleur urbain (ensemble des température de surface T_a) est très bien modélisé (au degré près) ainsi que plusieurs autres phénomènes (brise urbaine ou panache urbain, brouillard...).

Le TEB, qui à ce jour est encore en test, devrait être implanté dans un **nouveau modèle opérationnel** de Météo-France, d'une résolution très élevée (2 Km sur l'horizontale), et dont la mise en fonctionnement est prévue pour 2008.

Les modèles numériques de prévision du temps sont devenus, par les nombreuses paramétrisations et le développement des ordinateurs, des outils fiables et indispensables à la prévision météorologique. En **1999**, la qualité de la prévision à **72 heures** d'échéance était supérieure à celle que l'on obtenait en **1980** à seulement **24 heures** d'échéance. Ces améliorations continuent avec de nombreuses recherches visant à prendre en compte **l'évolution de l'océan et son couplage avec l'atmosphère**, à améliorer **l'assimilation** et la détermination des conditions initiales, à **augmenter la résolution** et enfin à mieux quantifier l'incertitude des prévisions grâce au développement des **prévisions probabilistes**.

Mais la modélisation ne fait que reproduire le réel, et le maillage est dans la réalité remplacé par des **masses d'air** bien différenciées, séparées par des surfaces de discontinuité : les **fronts**. Par conséquent une petite erreur du modèle sur le positionnement d'un front peut se traduire localement par une prévision totalement fautive. Une bonne prévision ne peut donc se faire sans l'expertise d'un prévisionniste connaissant **les limites du modèle et les climats régionaux**. Ce dernier pourra ajuster les prévisions numériques et les traduire en terme de temps observable (précipitations, températures maximale et minimale, brouillards, orages, force du vent...).

Cette étude se terminera sur une image qui aurait émerveillé tout climatologue du début des années 80 : l'image de synthèse d'une prévision à **48 heures d'échéance** réalisée par Météo-France (les nuages les plus bas sont en jaunes, les moyens en gris et les plus élevés en blancs).



Bibliographie

Etude générale :

- Numéro spécial de la revue La Météorologie, n°30, Juin 2000
- Pour la science n°233 (03/1997), Turbulence et Superordinateurs
- Découverte n°294 (01/2002), Introduction aux expériences numériques
- L'air de notre temps, de Gérard Lambert, aux éditions Seuil
- Quel climat pour demain, de Sylvestre Huet, aux éditions Calmann-Lévy
- Sites internet de Météo-France et du CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques)
www.meteo.fr et www.cnrm.meteo.fr
- Site du Laboratoire de Météorologie Dynamique de Jussieu
http://www.lmd.jussieu.fr/pcmdi-mirror/Climat/LMD_Climat_frame.html
- Site du CEA (Commissariat à l'Energie Atomique) : dossier sur le climat
<http://www.cea.fr/fr/magazine/dossierMag.asp?th=5#id51>
- Site du CNRS, dossier sur le Climat
<http://www.cnrs.fr/dossiers/dosclim/index.htm>

Etude du schéma de surface TEB :

- Modelling the Surface Energie Balance of an old Mediterranean city core, un article de Aude Lemonsu, Valery Masson (CNRM) et C.S.B. Grimmond (université d'Indiana), paru dans le « Journal of Applied Meteorology » en Janvier 2003.
- Illustrations réalisées grâce au logiciel de modélisation 3D Studio MAX.

Remerciements

Un grand merci à **Valery Masson** pour ses nombreuses explications et sans qui cette étude n'aurait pas été possible.

Merci beaucoup à **Sylvie Verant** et **Sylvain Cheinet** (LMD) pour leurs explications passionnantes.