



HAL
open science

Contribution à l'étude des processus atmosphériques de méso-échelle en zone de relief marqué

Sandrine Anquetin

► **To cite this version:**

Sandrine Anquetin. Contribution à l'étude des processus atmosphériques de méso-échelle en zone de relief marqué. Océan, Atmosphère. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2003. tel-00142750

HAL Id: tel-00142750

<https://theses.hal.science/tel-00142750>

Submitted on 20 Apr 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MEMOIRE DE RECHERCHE
présenté par

Sandrine ANQUETIN - LEVI ALVARES

Pour l'obtention du diplôme

D'Habilitation à Diriger les Recherches

De l'Université Joseph Fourier, Grenoble I.

Spécialité : Sciences de la Planète

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PROCESSUS
ATMOSPHERIQUES DE MESO-ECHELLE EN ZONE DE
RELIEF MARQUE

Date de soutenance

26 Mai 2003

Composition du jury

Hervé ANDRIEU, DR. LCPC, Nantes	Rapporteur
Nadine CHAMERLIAC, DR. CNRS, Clermont-Ferrand	Rapporteur
Mathias ROTACH, Scientist, ETH Zürich	Rapporteur
Jean-Pierre CHOLLET, Pr. UJF, Grenoble	Examineur
Jean-Dominique CREUTIN, DR CNRS, Grenoble	Examineur
Charles OBLED, Pr. INPG, Grenoble	Président

Mémoire préparé au Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement
L.T.H.E. - UMR 5564 (CNRS, UJF, INPG, IRD)



Copyright D. Whiteman

Mais où passe le vent quand il ne souffle pas ? (Solenn, 1998)

En mémoire à tous ces émerveillements que la vie nous réserve.

SOMMAIRE

Introduction générale	5
<u>Chapitre 1</u> :	8
Modélisation non-hydrostatique des processus atmosphériques de méso-échelle	
Les modèles utilisés	
Quelques points particuliers concernant la modélisation aux échelles locales	
<u>Chapitre 2</u> :	15
Vers une modélisation fine de l'atmosphère urbaine	
Éléments de dynamique de l'atmosphère urbaine	
L'échelle de la rue	
De la Submésoscale à la méso-échelle	
Conclusions	
<u>Chapitre 3</u> :	24
Transport vertical et processus de mélange dans une vallée	
Mécanismes de formation et de destruction des inversions de vallées	
Dispersion d'un traceur passif en zone de relief marqué	
Conclusions	
<u>Chapitre 4</u> :	31
Variabilité spatiale des précipitations dans la région Cévennes - Vivarais	
Interaction pluie - relief	
Mise en place d'un cadre de validation quantitative des précipitations simulées avec MesoNH	
Caractérisation hydrologique des épisodes convectifs	
Conclusions	
<u>Perspectives</u> :	40
Climatologie des pluies en zone de relief marqué - Impact hydrologique	
Des recherches intégrées dans le cadre de l'OHMCV	
La mesure GPS : un complément d'observation à l'OHMCV	
Modélisation des systèmes précipitants à caractère orographique	
Modélisation des systèmes convectifs de méso-échelle	
Vers une approche couplée atmosphère - hydrologie	

Références liées à mes activités de recherches	46
Curriculum Vitæ	49
Liste complète des publications et communication	57
Publications dans une revue à comité de lecture	
Publications dans une revue sans comité de lecture	
Ouvrages	
Communications	
Thèses, rapports de stages et DEA	
Conférences invitées	
Mémoires de thèse, DEA, stages encadrés	

INTRODUCTION

Depuis 1992, mon activité scientifique est axée vers l'étude des basses couches de l'atmosphère où on s'attache à comprendre et à modéliser le forçage surfacique (quantité de mouvement, flux de chaleur latent et sensible, topographie) sur la dynamique et la microphysique de l'atmosphère dans ses premiers kilomètres. Les mécanismes de transport vertical dans la couche limite atmosphérique contrôlent la qualité de l'air dans les zones urbanisées, la répartition spatio-temporelle des précipitations et le transport de la neige dans les régions montagneuses.

Par exemple, l'ozone troposphérique, issu d'une réaction entre hydrocarbures et oxydes d'azote alimentée par le rayonnement solaire, est un oxydant redoutable qui s'attaque à la végétation et au système respiratoire humain. Les valeurs maximums sont enregistrées dans les périphéries des villes et non dans les zones où les émissions des polluants primaires sont les plus fortes. Pour mieux prévoir (et donc à terme, mieux gérer), la dynamique des basses couches doit faire l'objet d'une attention toute particulière.

Il en est de même pour l'aménagement du territoire face au risque d'inondation. La réponse hydrologique à un forçage pluviométrique sera d'autant plus pertinent en terme de prévision que le signal pluviométrique précis (en quantité et en localisation).

Ces deux problèmes sont des questions où la demande sociétale est forte, et les mécanismes qui y sont associés sont des problèmes fondamentaux qui doivent encore retenir toute notre attention. Rappelons que la *Loi sur L'air et L'utilisation Rationnelle de l'Energie* (dite loi Lepage, mise en application au 1^{er} janvier 1997) stipule dans son premier article « ...*Cette action d'intérêt général consiste à prévenir, à surveiller, à réduire ou à supprimer les pollutions atmosphériques...* » car il "*est reconnu à chacun le droit à respirer un air qui ne nuise pas à sa santé*". La *Loi sur l'Eau* (3 janvier 1992) a pour objectif de proposer un cadre législatif pour une gestion équilibrée, en outre, « *de la conservation et du libre écoulement des eaux et de la protection contre les inondations* ».

La méconnaissance de ces mécanismes liés au transport et au mélange dans les basses couches entraîne des difficultés importantes lorsque l'on souhaite proposer des outils de gestion

et de prévention de la qualité de l'air ou lorsque l'on souhaite affiner les prévisions à petite échelle de la répartition spatio-temporelle des précipitations.

Mon outil d'investigation est la modélisation non-hydrostatique tridimensionnelle de l'atmosphère. Pour les applications dédiées à l'évaluation de la qualité de l'air comme pour celles dédiées au risque d'inondation, l'imbrication d'échelles ainsi que la définition des interfaces sont des problématiques communes. A ces échelles, l'interaction sol - atmosphère est importante à bien reproduire à travers toutes les hétérogénéités que composent un sol urbain (succession de rues hétérogènes) ou un massif montagneux (délimité par un système de vallées). Le forçage des échelles supérieures doit, également, rendre compte du milieu atmosphérique non fermé et de son caractère fortement instationnaire et turbulent.

Je me suis attachée à comprendre les mécanismes physiques liés au transport vertical et le rôle de la stratification dans le développement de ces mouvements ainsi que les processus liés au mélange des quantités scalaires passifs (traceur) ou qui interagissent avec la dynamique (microphysique). Les échelles caractéristiques sont celles d'une vallée comme celle de Grenoble ou d'un massif montagneux comme celui des Cévennes.

Compte tenu du rôle important de la stratification atmosphérique dans les processus physiques étudiés et de son caractère fortement instationnaire et inhomogène en espace aux échelles proposées, il me semble raisonnable d'aborder cette thématique pour deux études dissociées où la stratification agit différemment : (i) transport d'un traceur passif dans une vallée et effet de la stratification stable, (ii) forçage topographique sur un système précipitant (stratification instable).

A travers ce document, je souhaiterais synthétiser ma contribution personnelle à ces questions en n'oubliant pas que ma démarche s'est enrichie des nombreuses collaborations que j'ai pu avoir avec des chercheurs confirmés et à travers les divers encadrements de jeunes chercheurs qui ont rythmé ces 10 dernières années.

Ce document est organisé en 4 parties.

Dans une première partie, je préciserai le contexte général de modélisation non-hydrostatique des processus atmosphériques de méso-échelle dans lequel mes activités scientifiques se sont placées.

Puis, je présenterai mes contributions personnelles autour de trois thèmes :

- + les perturbations liées à une agglomération sur la dynamique et la microphysique des basses couches de l'atmosphère,
- + le transport et le mélange dans une vallée idéalisée, et notamment l'impact de la dynamique locale gouvernée par l'alternance jour - nuit sur la dispersion d'un traceur passif. Le site de Grenoble a fait l'objet d'une étude particulière où nous avons mis en place une campagne de traçage SF₆ afin de valider nos simulations,
- + et enfin, à travers la base de données de la campagne de mesures Cévennes 86-88, l'analyse des données radar et les résultats de simulations mettent en évidence le rôle joué par le relief sur le renforcement et la localisation des précipitations.

Ce mémoire n'aurait un sens sans perspectives, elles feront l'objet d'une dernière partie.

Dans la suite de ce document, une référence soulignée indique une publication reproduite dans l'Annexe de ce mémoire.

Chapitre 1 :

MODELISATION NON-HYDROSTATIQUE DES PROCESSUS

ATMOSPHERIQUE DE MESO-ECHELLE

Recrutée en 1992 au CNRS et affectée au Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (LEGI) à Grenoble, mon projet de recherche était centré sur la modélisation des écoulements atmosphériques à l'échelle d'une agglomération. Plus précisément, il s'agissait de progresser dans la simulation détaillée des écoulements turbulents de la basse atmosphère au-dessus d'une zone urbanisée à orographie quelconque pour permettre l'étude du transport, de la diffusion et des transformations des constituants de la photochimie réactive.

En 1991, aucune équipe universitaire ou CNRS n'avait encore développé de modèle numérique de recherche pour ces échelles locales (contrairement aux échelles globales ou régionales). Le seul groupe qui ait eu une politique permanente de recherches en ce domaine était le Département Environnement Aquatique et Atmosphérique de la DER de l'EdF, qui avait mis en œuvre des modèles de l'atmosphère à toutes les échelles, depuis l'échelle locale (MERCURE / ESTET) jusqu'à l'échelle globale (modèle du LMD).

Météo-France et le Laboratoire d'Aérodynamique engageaient une démarche de recherches dédiées à la modélisation non-hydrostatique de l'atmosphère afin d'évaluer la faisabilité d'une telle approche pour la prévision du temps. Ces réflexions se sont matérialisées autour du modèle MesoNH (Lafre et al., 1997) actuellement mis à la disposition de la communauté scientifique.

Parallèlement à cette réflexion, l'intérêt croissant pour l'étude de la qualité de l'air à l'échelle d'une agglomération a conduit le CNRS à mettre en place un Groupement de Recherche pluridisciplinaire regroupant 11 équipes¹ dont 4 du secteur industriel. Le GdR CNRS n°1102 « Atmosphère Urbaine Sub-mesoéchelle. SUBMESO », coordonné par P. MESTAYER (DAH, ECN, Nantes), avait pour objectif scientifique d'harmoniser et de coordonner les recherches fondamentales et finalisées sur la dynamique, la physique, la microphysique et la photochimie de

¹ *Dynamique de l'atmosphère* : ECN (Mestayer, Sini, Rosant), LEGI (Chollet, Anquetin), IMFT (Georges, Bonneton), ECL (Ayrault, Mejean)

Chimie de l'atmosphère : LISA (Toupance, Aumont), CORIA (Coppalle, Paranthoën)

Microphysique de l'atmosphère : LaMP (Chaumerliac, Cautenet)

Secteur industriel : EdF (Carissimo, Marchand), CSTB (Sacré, Delaunay), IFP (Martin, Salles), Dassault (Courty, Marion).

l'atmosphère urbaine. Dans ce contexte, une partie de mon activité scientifique a été dédiée au développement du modèle SUBMESO en s'enrichissant des développements acquis par ailleurs.

I. Les modèles utilisés

En 10 années de recherche consacrées à la modélisation atmosphérique de méso-échelle en zone de relief, j'ai été amené à travailler avec deux modèles dans des contextes de développement et d'utilisation bien différents.

Le modèle SUBMESO, développé dans le cadre coopératif du GdR « Submeso », a pour vocation de fédérer les recherches françaises dédiées à l'atmosphère urbaine. Sa modularité permet d'introduire facilement de nouvelles paramétrisations physiques ou des nouveaux modules.

Le modèle MesoNH (Lafore et al., 1997), développé conjointement par le CNRM (Météo-France) et le Laboratoire d'Aérodynamique (CNRS), a été développé dans une perspective plus opérationnelle et avec des moyens plus importants. Il est devenu au fil des ans un modèle communautaire dont la version est maintenue à l'IDRIS par le Laboratoire d'Aérodynamique.

(i) Le modèle SUBMESO

Ma participation dans le modèle SUBMESO a concerné le développement et le suivi du code. Sur la base du modèle ARPS3.1 (CAPS de l'Université d'Oklahoma), nous avons développé un modèle de dynamique de l'atmosphère, non-hydrostatique, 3D, compressible, de structure complètement modulaire qui a été couplé, à Grenoble, avec le modèle de cinétique chimique MOCA développé au LISA. Le développement de cet outil a constitué l'essentiel de mon activité de recherches de 1992 à 1996, ainsi que de mes encadrements de jeunes chercheurs (B. Daval, Maîtrise de Mécanique 1994 ; F. Eberl, DEA MMGE 1995 ; D. Grainger, DEA CPCA 1996 ; C. Guilbaud, thèse 1996). Disponible pour la communauté scientifique autre que celle appartenant au GdR, j'ai également implanté SUBMESO au Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research, à Davos afin que les chercheurs de cet institut puissent le coupler avec un module de transport de neige.

Ces différents développements ont conduit à la mise en place de la version SUBMESO1.0 qui intègre des modélisations sous-mailles de type LES, un modèle de sol rural, une microphysique chaude et froide, un schéma radiatif et un module de cinétique chimique. Un mailleur a été développé spécifiquement pour faciliter le maillage de zone de relief marqué dans un système de coordonnées curvilignes.

Le caractère très modulaire de SUBMESEO a permis les développements récents effectués à l'École Centrale de Nantes. Ils concernent :

- la paramétrisation du sol urbain, SM2-U (Guilloteau, 1998),
- des modèles statistiques en un point ($k-\epsilon$, $k-\epsilon-\theta^2$) (Abart, 1999)
- des schémas de discrétisation précis au second ordre sur un maillage quelconque et l'utilisation de maillages curvilignes sans restriction (Abart, 1999)
- l'imbrication de maillages adaptatifs (Penelon, 2002)
- le forçage avec des conditions synoptiques simplifiées (Penelon, 2002).

(ii) *Le modèle MesoNH au LTHE - Grenoble*

Le modèle MesoNH possède un ensemble relativement complet de paramétrisations pour représenter les différents processus atmosphériques : Turbulence, rayonnement, microphysique, convection, échanges sol - atmosphère. En particulier, le schéma microphysique régit les équations pronostiques de trois catégories d'hydrométéores solides (glace primaire, grésil et agrégats) ainsi de deux espèces liquides (eau liquide nuageuse et eau liquide précipitante) selon une paramétrisation de microphysique chaude de type Kessler. Le modèle MesoNH dispose également du schéma de microphysique chaude C2R2 plus évolué et développé par Cohard (1999). Ce schéma apporte une meilleure description des processus microphysiques de formation des précipitations que le schéma de microphysique chaude de type Kessler et prend en compte le contenu en aérosols de l'air. Pour les modèles à faible résolution, un schéma de convection est également activé pour représenter les processus convectifs sous-mailles.

La version de MesoNH utilisée au LTHE est celle maintenue à l'IDRIS par le Laboratoire d'Aérodynamique. Les modifications apportées concernent essentiellement la mise en place de fichiers compatibles avec les outils de posttraitement du laboratoire afin de réaliser cette étape en interne. Par ailleurs, nous avons adapté les routines originelles afin de les rendre compatibles avec l'utilisation de MesoNH dans sa version « cas idéalisés » en utilisant le schéma de microphysique C2R2.

Compte tenu du choix des paramétrisations physiques (non-hydrostatique, turbulence, microphysique chaude et froide, modèle de sol, rayonnement...) introduites dans les modèles SUBMESO et MesoNH, ces deux modèles peuvent « à priori » être utilisés pour des échelles identiques. Ceci dit, quelques différences liées à la résolution numérique des équations et

associées à l'environnement humain de développement de ces modèles font que ces deux modèles sont tout à fait complémentaires à l'échelle de la communauté scientifique française.

Le choix de résoudre les équations compressibles dans le modèle SUBMESO fait que d'un point de vue numérique ce code est purement explicite. Plus coûteux en temps de calcul qu'un modèle anélastique (MesoNH), il n'en demeure pas moins que ses évolutions sont plus faciles à mettre en œuvre : modification de conditions aux limites, schémas de discrétisation, nouvelles paramétrisations... Dans un objectif de recherche, ce modèle apporte une grande souplesse d'utilisation et de développement de nouveaux concepts physiques.

Le modèle MesoNH, développé plus particulièrement dans un contexte à vocation opérationnelle, bénéficie de tout un ensemble de modules qui permet de réaliser des « retours d'expériences » remarquablement facilement (forçage avec les données ECMWF ou Aladin, base de données « sol » ...). Les simulations « plus académiques » sont également facilitées.

Ces 10 années dédiées à l'étude des basses couches de l'atmosphère en zone de relief marqué, m'ont conduit à m'investir plus particulièrement sur les questions de modélisation développées dans la suite.

II. Quelques points particuliers concernant la modélisation aux échelles locales.

(iii) Les échelles associées

La dynamique de l'atmosphère est décrite par les équations de Navier-Stokes qui reposent sur des concepts de conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie. Par une analyse aux ordres de grandeur bâtie sur les échelles caractéristiques du mouvement (échelles spatiales horizontale et verticale, échelle temporelle), le système d'équations est modifié conduisant ainsi à des méthodes de résolution différentes en fonction des échelles étudiées.

Afin de rendre compte de la forte instationnarité des mouvements atmosphériques à l'échelle d'une agglomération ou d'un massif montagneux (échelle spatiale horizontale de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres) et notamment l'importance de la représentation des effets convectifs liés au cycle diurne (alternance jour - nuit) qui agissent sur la variation de l'accélération verticale tout particulièrement en zone de relief marqué, la formulation non-hydrostatique des équations de la dynamique de l'atmosphère s'impose.

Pour l'atmosphère urbaine, la gamme d'échelles se situe entre celles associées à un quartier (quelques km², Δx inférieur à 100m), jusqu'à celles d'une agglomération (de l'ordre de 50 km², Δx = quelques centaines de mètres). On s'attache par ailleurs à reproduire le cycle diurne complet afin de mettre en évidence le caractère fortement instationnaire de ces écoulements et de la réactivité associée.

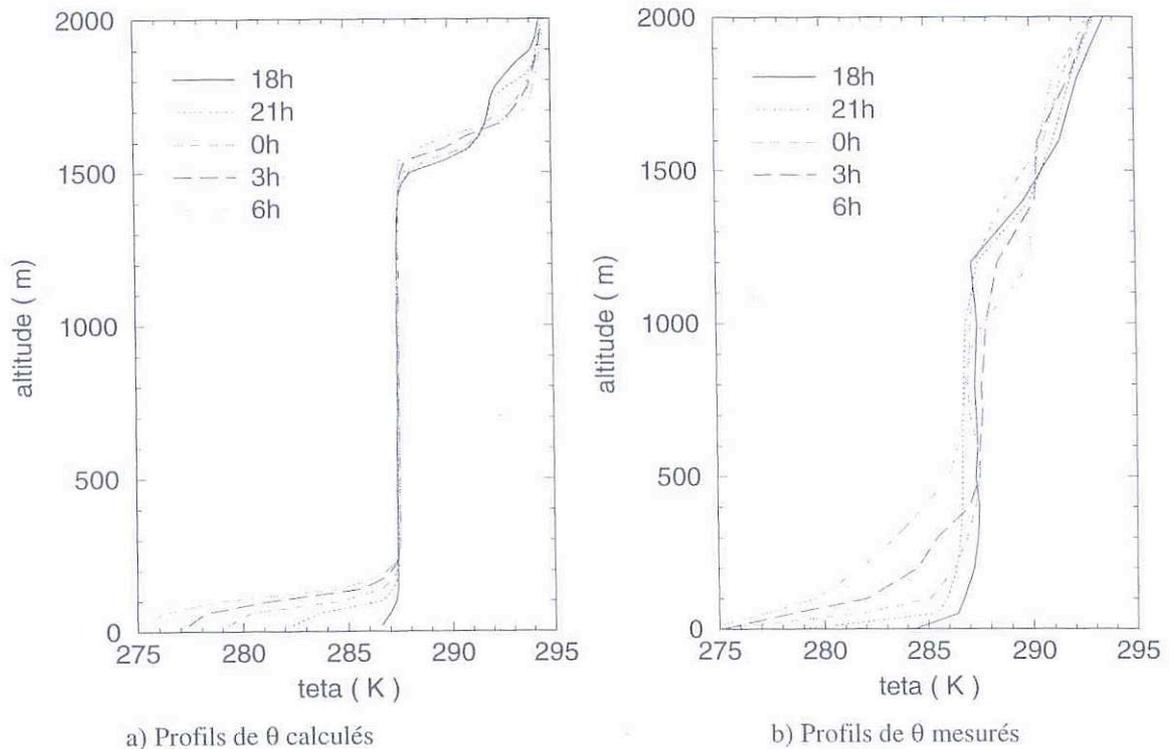
(iv) *La modélisation de la turbulence*

La couche limite atmosphérique est le lieu d'interactions complexes entre la dynamique, la thermique, les processus physico-chimiques et radiatifs, la présence de vapeur d'eau etc ... Dans cette couche, la turbulence est une propriété essentielle qui pilote les phénomènes de transport et de mélange.

L'évolution fortement instationnaire de la turbulence atmosphérique ainsi que le contexte local nous ont fait préférer la modélisation des grandes échelles (ou encore LES en anglais) par rapport à l'approche de modélisation statistique en un point (modèle k- ϵ par exemple).

Pour étudier la dynamique non-hydrostatique des ondes de gravité générées par un relief, le projet coordonné par P. Bonneton (IMFT) concernait l'étude expérimentale et la modélisation numérique non-hydrostatique, en se concentrant plus particulièrement sur des situations d'ondes déferlantes où la turbulence est dominante. Une des caractéristiques originales était d'associer l'expérimentation dans la veine hydraulique de Météo - France (CNRM/SPEA, IMFT/HIRE) à la simulation numérique non-hydrostatique (MesoNH, SUBMESO). L'association des deux outils aux capacités exploratoires complémentaires nous a permis de les valider ainsi que de les comparer, sur une même expérimentation (G. Gognon, Maîtrise de Mécanique 1996 ; Anquetin et Bonneton, 1996).

Cette étude nous a permis d'identifier et de poser un cadre de validation des processus de mélange en situation de forte stratification. Les mouvements verticaux d'une particule d'air dans une couche stable et dans la couche turbulente résiduelle de l'atmosphère et les interactions entre couches sont des processus difficiles à caractériser (Guilbaud et al., 1997), notamment et, tout particulièrement, pendant les périodes de transition (jour - nuit, nuit - jour). Les modèles sous-maille classiquement utilisés (Smagorinski, 1963 ; Moeng, 1984) ont tendance à sous estimer la turbulence résiduelle nocturne qui peut continuer à agiter les très basses couches de l'atmosphère.



Cette figure présente une comparaison de l'évolution temporelle des profils verticaux de température potentielle pendant la transition jour - nuit pour l'expérience de Wangara. L'épaisseur de la couche stable nocturne est fortement sous estimée par la simulation et son intensité sur estimée. Le modèle sous maille "inhibe" donc trop rapidement la turbulence en période nocturne.

(Bouvier, DEA MFT 1999)

Améliorer l'évaluation de cette turbulence résiduelle est essentiel pour mieux estimer les capacités de mélange de l'atmosphère. L'objectif était donc de tester les modèles sous-maille existants (Freedman and Bornstein, 1998 ; Schumann, 1991) sur des situations atmosphériques de références (expérience de Wangara, Clark et al., 1971). Le travail de Bouvier (DEA MFT, 1999) a permis de mettre en place les différentes paramétrisations du code SUBMESO, et une première étude montre que l'approche de Schumann répond au mieux à nos exigences. En effet, dans ce modèle sous-maille la longueur de mélange est réduite dans les zones stables ; seule la longueur de mélange présente dans les équations de la chaleur et de l'humidité est modifiée. Cette paramétrisation est motivée par le fait que dans les zones stables, des ondes de gravité apparaissent qui diffusent la quantité de mouvement mais pas les scalaires. Ces ondes de gravité compensent alors l'amortissement dû à la turbulence.

(v) *Le modèle de sol*

Les processus de surface doivent faire l'objet d'une paramétrisation fine afin de prendre en compte le bilan énergétique au niveau d'un sol fortement hétérogène. Sur la base des travaux de Noilhan et Planton (1989), Guilbaud (1996) a implanté le modèle SM2-Isba dans la version initiale de SUBMESO. Ce travail a fait l'objet d'un effort de validation quantitative sur deux campagnes sur sites (EFEDA, HAPEX-SAHÉL).

Construit de façon très modulaire, ce modèle de sol a pour vocation d'évoluer vers un modèle mixte Urbain et Rural. La ville sera caractérisée par :

- des surfaces analogues à celles du milieu rural (espaces verts, terrains vagues ...),
- des surfaces urbaines, imperméables avec stockage ou non de l'eau et une percolation sans retour possible,
- des échelles de temps à caractériser pour la température et l'humidité.

Chapitre 2 :

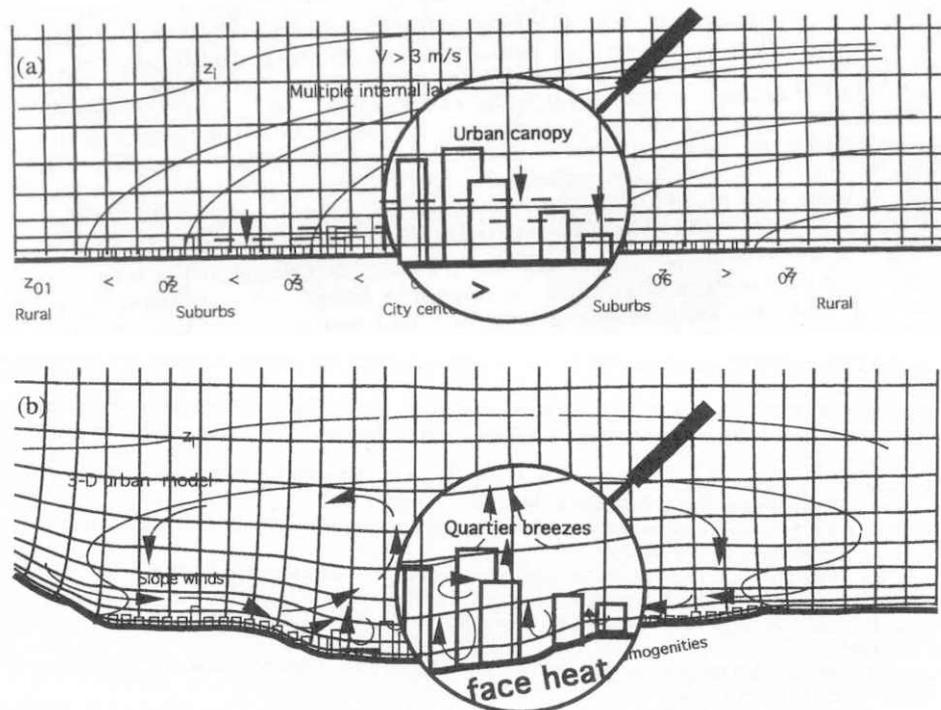
VERS UNE MODELISATION FINE DE L'ATMOSPHERE URBAINE

I. Elément de dynamique de l'atmosphère urbaine

L'évaluation de la pollution induite par une zone urbaine impose la prise en considération d'un domaine d'échelles très étendues, depuis la méso-échelle (méso β , L= 200 km, T= quelques heures à un jour) jusqu'à l'échelle moléculaire des réactions chimiques, en passant par les échelles intermédiaires associées aux mouvements turbulents responsables des mélanges et de la dilution.

Au-dessus d'un sol homogène et plat, la couche de surface est définie comme étant la couche de quelques dizaines mètres à une centaine de mètres d'épaisseur où la force de Coriolis n'influe pas sur la structure de l'écoulement, les champs turbulents sont horizontalement homogènes et leurs distributions verticales dépendent essentiellement des conditions de surface (flux de quantité de mouvement, flux de chaleur). Dans cette couche, les flux de quantités transportés sont indépendants de l'altitude (cette couche est d'ailleurs appelée « couche à flux constant ») et, la répartition des vitesses moyennes suit une loi logarithmique. Au-dessus d'une zone urbaine, cette structure est fortement perturbée par l'hétérogénéité des surfaces conduisant ainsi au développement d'une succession de couches internes qui seraient déclenchées en considérant que le sol urbain serait formé d'une succession de quartiers relativement homogènes définis chacun par une hauteur de rugosité équivalent, une hauteur de déplacement et un flux de chaleur.

Une revue synthétique des différentes approches de la caractérisation du couvert urbain est présentée dans Mestayer and Anquetin (1994). Dans cette revue, nous introduisons trois échelles distinctes mais fortement imbriquées qui caractérisent la dynamique à l'échelle d'une agglomération : l'échelle de la rue (dont le rapport d'aspect hauteur / largeur conditionne la structure de l'écoulement et les capacités de mélange), l'échelle du quartier (groupe de bâtiments qui a des propriétés aérodynamiques et dispersives homogènes) et celle de l'agglomération. Ces échelles spatiales sont associées à des échelles temporelles propres qu'il convient de prendre en compte dans les modèles numériques.



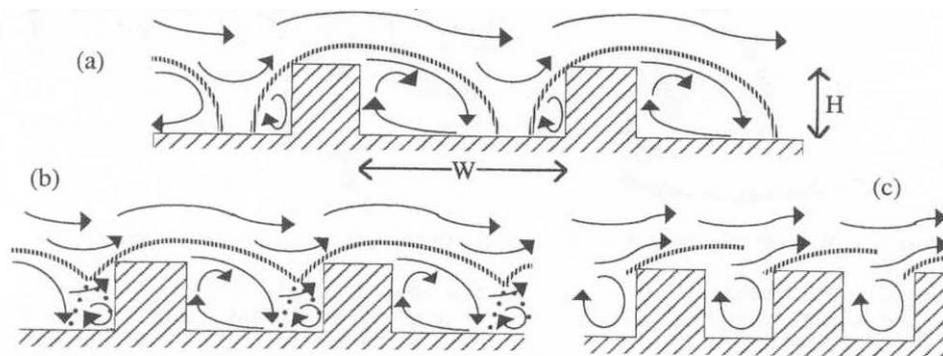
Cette figure schématise la perturbation des basses couches de l'atmosphère par un site urbanisé en fonction des conditions météorologiques. Par conditions de vents forts (a), la ville sera "vue" comme une succession de sols aérodynamiquement différents qui conditionnent le développement de couches internes. Lorsque le vent est faible (b), on observe un couplage fort entre les effets thermiques et dynamiques. Les interactions entre l'intérieur et l'extérieur de la rue délimiteront l'échelle du quartier à laquelle se met en place un régime de vent analogue aux effets de brise à l'interface mer - terre. La combinaison de l'ensemble des quartiers crée alors au-dessus de l'agglomération un îlot qui délimite les échanges verticaux.

(Mestayer and Anquetin, 1994)

II. L'échelle de la rue

La dynamique de l'atmosphère qui se développe à cette échelle (L = quelques dizaines de mètres, T est de l'ordre de la minute) a un impact considérable sur la quantité de polluant inhalée par le piéton ainsi que sur la mouillabilité des surfaces bâties modifiant ainsi le bilan énergétique à ces échelles. L'investigation de cette échelle a fait l'objet de mon travail de doctorat mais a été poursuivie par la suite à travers mes collaborations avec l'équipe « Dynamique de l'Atmosphère Habitée » (DAH) de l'Ecole Centrale de Nantes.

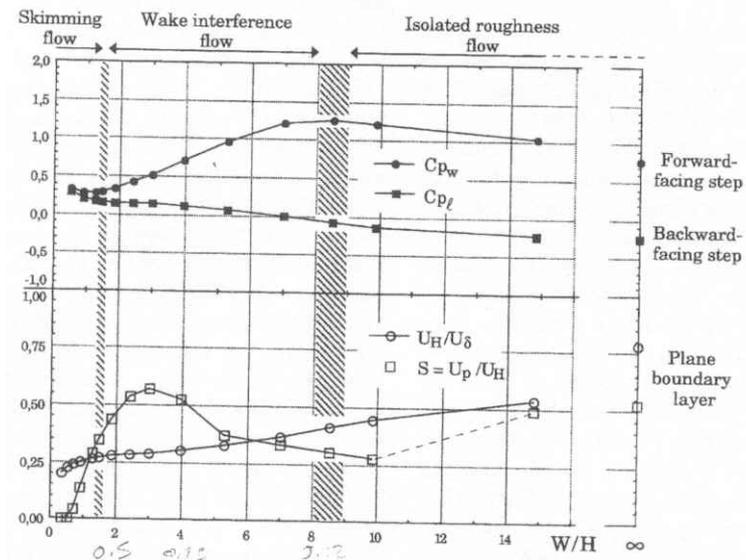
Les résultats de simulation obtenus avec le modèle CHENSI² (3D, moyenne de Reynolds, maillage rectiligne cartésien non-homogène) montrent que la structure des champs de vitesse et de turbulence dans la rue est un enjeu pour connaître la qualité de l'air respiré par les piétons. Ces champs résultent de la combinaison de l'advection dynamique induite par le vent et de la convection thermique générée par les différences de température entre les surfaces de la rue (ensoleillement, type de matériau). Cette dynamique dépend donc de la géométrie de la rue et des conditions météorologiques locales (Sini et al., 1996). Les résultats principaux font apparaître l'influence du rapport de forme d'une rue (hauteur / largeur) sur la typologie de l'écoulement induit par le vent. Les seuils de transition des différentes configurations sont identifiés en terme de régime d'écoulement, de qualité de ventilation et d'échelle de temps de dispersion.



Cette figure présente une schématisation des régimes d'écoulement en fonction des échelles caractéristiques de la rue (largeur W , hauteur H). Ces trois régimes aérodynamiques ((a) rugosité isolée (*isolated roughness flow*), (b) interférence de sillages (*wake interference flow*), (c) écoulement rasant (*skimming flow*)) mettent en évidence l'impact du rapport d'aspect de la rue (W/H) sur les échanges verticaux entre l'intérieur et l'extérieur de la rue. L'idée est donc de définir les bornes qui délimitent ces trois régimes afin de pouvoir quantifier les flux verticaux à la seule lecture du plan d'occupation des sols de la ville.

(Hussain and Lee, 1980)

² Valorisation du logiciel CHENSI.3 dans le cadre d'une convention interne du Laboratoire de Mécanique des Fluides, UMR 6598, CNRS et Ecole Centrale de Nantes.



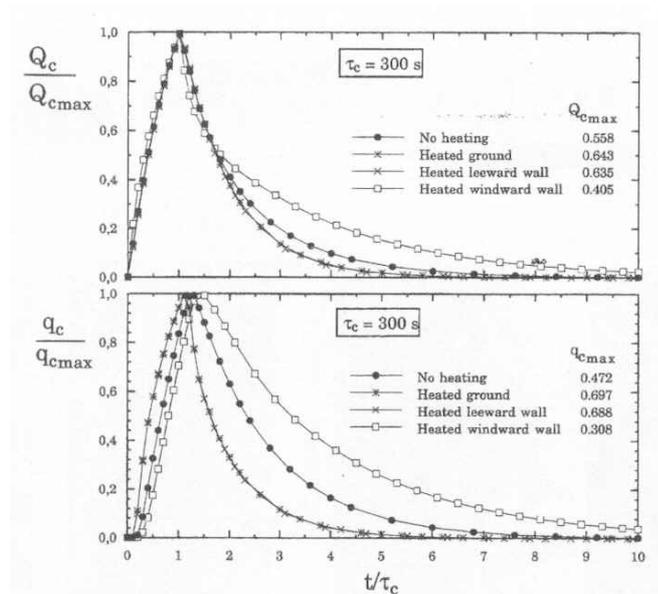
L'idée sous jacente à cette figure est d'estimer les valeurs de W/H associées aux transitions d'un régime à un autre à partir de l'évolution du coefficient de pression moyenné le long des deux faces de la rue (C_{p_w} : Coefficient de pression moyen le long de la face au vent; C_{p_l} : Coefficient de pression moyen le long de la face sous le vent). On estime les valeurs seuils des trois régimes à partir des changements de pente des courbes de C_{p_w} et C_{p_l} .

L'effet "d'abris" provoqué par la géométrie de la rue est exprimé par S le rapport de la vitesse au niveau piéton U_p et la vitesse au-dessus des toits sur l'axe de la rue U_H . Cette figure montre la dépendance très forte de cette variable avec la géométrie de la rue.

Dans cette étude, les effets thermiques ne sont pas pris en compte.

(Sini et al., 1996)

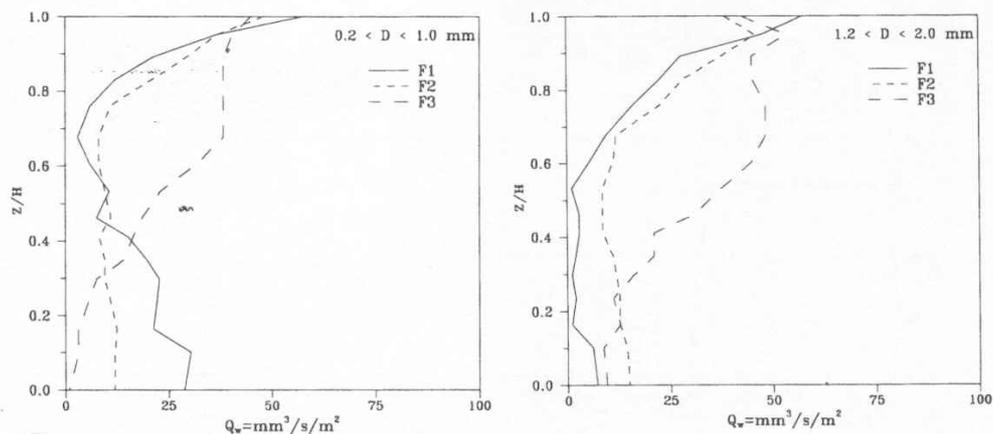
En appliquant un chauffage sur chacune des faces que composent la rue (face sous le vent, puis sol, puis face au vent), on met en évidence le rôle essentiel du chauffage pariétal sur la structure de l'écoulement et les conditions de son action pénalisante ou favorisante sur les transferts verticaux de polluants.



Cette figure présente l'évolution temporelle de la concentration d'un traceur passif émis au-dessus des toits en fonction des conditions d'ensoleillement. Q_c exprime la valeur moyenne à l'intérieur de la rue alors que q_c indique la valeur moyenne dans la partie basse de la rue. Le rapport d'aspect de la rue est de 0.9 ce qui correspond, pour une atmosphère neutre, à un régime d'écoulement marqué par la présence d'un seul vortex dans la rue (écoulement rasant). La convection à l'intérieur de la rue va modifier drastiquement la dynamique de l'atmosphère (présence de deux vortex de sens opposé) et donc réduire les échanges verticaux. La pénétration du traceur dans la rue sera plus longue mais sa dilution également plus longue, imposant ainsi le "piéton" a des valeurs fortes plus longtemps.

(Lévi Alvarès, 1991 ; Sini et al., 1996)

En parallèle à ces travaux, un modèle couplé Eulérien - Lagrangien (Edson et al., 1996) a été développé dans le cadre du séjour post doctoral de Jim EDSON à l'Ecole Centrale de Nantes (1990 - 1991). Ce modèle, développé ensemble, permet de simuler le transport turbulent de gouttelettes en tenant compte des processus d'évaporation. Il a été utilisé pour simuler les trajectoires des gouttes à l'intérieur d'une rue, mettant ainsi en évidence l'impact de leur taille caractéristique sur la mouillabilité des parois (Lakehal et al., 1995). On montre que la dispersion turbulente gouverne fortement les trajectoires des hydrométéores et donc leur impact sur les parois qui délimitent la rue.



Cette figure présente une comparaison de l'humidité de la façade au vent d'une rue en fonction du diamètre des gouttes pour trois types de modèles Lagrangien (F1= Edson et al., 1996, F2 = Mostafa and Mongia's, 1987 identique à F1 mis à part le calcul de la vitesse de chute; F3 = Mostafa and Mongia's, 1987 où le modèle de turbulence s'appuie sur une équation du second ordre).

On observe que les petites gouttes sont plus affectées par la structure de l'écoulement (un seul vortex) que les grosses gouttes et que le modèle F1 (Edson et al., 1996) est plus à même à reproduire ce phénomène.

(Lakehal et al., 1995)

Le développement de ces modèles a pour objectif de mieux appréhender les phénomènes physiques à cette échelle et notamment de rendre compte des échanges verticaux entre l'intérieur de la rue et le niveau au-dessus des toits. L'équipe DAH continue des simulations académiques pour des configurations de rues de plus en plus complexe qui ont conduits à des paramétrisations introduites dans le modèle de urbain SM2-U (Guilloteau, 1999) couplé à SUBMESO (Dupont, 2001).

III. De la sub-meso échelle à la méso-échelle : vers un besoin de mesures de qualité pour une meilleure prise en compte de l'interdisciplinarité des phénomènes.

Motivées par l'évaluation de la pollution induite par une zone urbaine, des équipes françaises de recherche se sont associées pour développer des outils de recherches dédiés à la simulation de la dynamique non-hydrostatique des basses couches de l'atmosphère. On peut citer, par exemple : AZUR/MERCURE, CHIMERE, SUBMESO. Construits sur les bases de modèles météorologiques meso-échelles, ils sont dotés de capacités spécifiques ou de sous-modèles

destinés à leur permettre de simuler la couche limite atmosphérique au-dessus d'une agglomération située en zone de relief marqué. Ces développements spécifiques concernent, outre les maillages et schémas de discrétisation, la modélisation des sols et de la canopée urbaine, et la modélisation de la turbulence. Ces modèles ont été mis en œuvre sur quelques situations réelles permettant d'en tester les capacités. Le déficit de données expérimentales qualifiées rend leur validation difficile. La campagne ESCOMPTE (Juillet 2001, Toupance et al., 2001) a notamment été réalisée pour atteindre cet objectif.

Sur le plan Grenoblois, il s'agissait d'identifier et de regrouper les différents acteurs scientifiques motivés par cette thématique. Le projet TEPAG (Transport et Evolution des Pollutions sur l'Agglomération Grenobloise) (Anquetin et al., 1995), soutenu par le Pôle Européen Scientifique et Universitaire de Grenoble, et coordonné conjointement par J.-P. Chollet et P. Foster (GRECA), avait pour objectif de construire un ensemble d'outils qui contribuent à la prise de décisions favorables à la santé des populations et une optimisation globale des coûts. De 1994 à 1996, 6 équipes pluridisciplinaires Grenobloises³ se sont associées pour faire émerger une synergie locale qui a conduit ultérieurement à l'émergence de plusieurs projets locaux, régionaux et nationaux. Ce premier projet coopératif nous mettait fortement en avant car le modèle à base physique de la dynamique de l'atmosphère était une des premières étapes à franchir. Par ailleurs, l'intérêt particulier porté à l'agglomération grenobloise, justifié par les caractéristiques physiques et chimiques de la pollution qui s'y développe : pollution d'origine essentiellement locale et forte influence du relief, a fortement orienté mon activité personnelle ainsi que mes différents encadrements de jeunes chercheurs (S. Dumont et F. Gruffaz, ENSHMG 1993 ; P. Llusia et J.-B. Escoufier, ENSHMG 1993 ; N. Chabert, DEA MMGE 1995 ; C. Guilbaud, 1996).

En 1996, 8 équipes pluridisciplinaires de la région Rhône-Alpes dont le réseau de mesure ASCOPARG se retrouvent autour du projet IMPAS (Impact de la Pollution Atmosphérique urbaine sur la Santé humaine) coordonné par P. Masclat (LESAM, ESIGEC, Université de Savoie) et financé par la région Rhône-Alpes. Il s'agissait d'établir un modèle de prévision de l'impact sur la santé des populations des polluants atmosphériques liés à l'activité humaine. Les limitations de nos outils numériques ont très rapidement conduit ce projet vers des aspects plus métrologiques,

³ *Dynamique de l'atmosphère* : LEGI (Chollet, Anquetin), LESI (Faivre Pierrret)

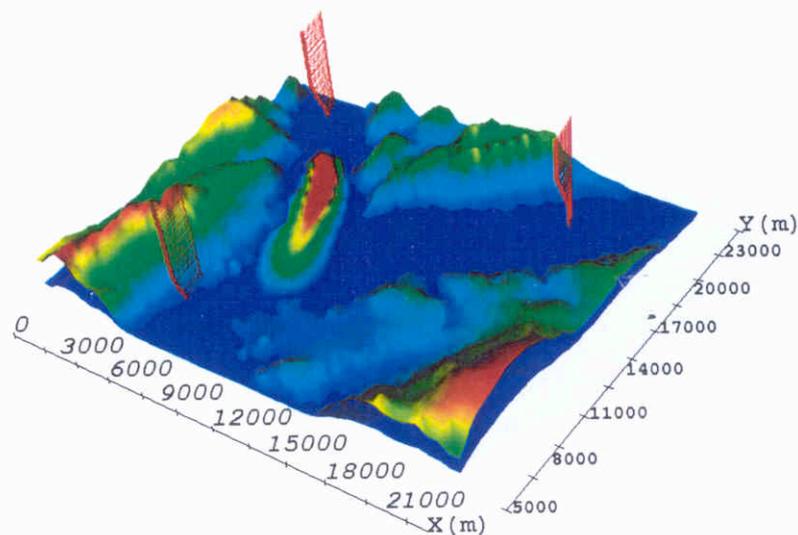
Chimie de l'Atmosphère : GRECA (Foster, Jacob)

Médecine : Laboratoire de Santé publique (Zmirou), Laboratoire de Toxicologie (Maitre, Stoklov)

Aménagement de l'espace urbain : Institut d'Urbanisme de Grenoble (Novarina).

nous désengageant partiellement de ce projet. En effet, il était scientifiquement primordial de mettre en regard les mesures en continu du réseau à celles plus ponctuelles obtenues à partir de capteurs portatifs, caractérisant ainsi la partie réellement inhalée par le piéton. Malheureusement, le modèle de dynamique de l'atmosphère, SUBMESO, ne pouvait pas prendre en considération une telle diversité d'échelles (échelle meso- α , échelle de la rue, échelle du piéton) et n'avait à cette époque pas de paramétrisation du couvert urbain.

Par ailleurs et dans le cadre d'une collaboration entre le Service de Protection du CENG et le LEGI, L. Machado da Silva, boursier brésilien, a effectué sa thèse sous la direction scientifique de J.-P. Chollet. Associée à ce travail dans sa partie modélisation, j'ai néanmoins aidé à la mise en place de campagnes expérimentales de dispersion du traceur passif SF₆, émis à partir du site de CEA. Ce traceur était suivi et mesuré à partir de chromatographe embarqués dans des véhicules sillonnant l'agglomération grenobloise. Ces 2 campagnes (Juin et Octobre 1995) offraient ainsi un cadre de validation du code SUBMESO pour des études de dispersion en site complexe (Machado da Silva et al., 1997).



Cette figure illustre le champ du traceur passif simulé soumis à un vent de Nord de 7 m/s et émis à partir du site du CEA (Nord-Ouest de Grenoble). Le panache ainsi simulé a fait l'objet d'une comparaison avec le modèle de dispersion opérationnel HARMATAN du CEA qui s'appuie sur une description gaussienne du rejet.

(Machado da Silva, 1998)

IV. Conclusions

De janvier 1994 à décembre 1998, ma participation au GdR CNRS n°1102 « Atmosphère Urbaine Sub-mesoéchelle. SUBMESO » a été très active. Ma participation a concerné la mise en place, le développement et le suivi du code de calcul SUBMESO.

La valorisation scientifique de mes travaux concerne majoritairement des études plus phénoménologiques. En effet, le caractère particulièrement pluridisciplinaire de cette thématique impose une mise en œuvre collective très organisée où les moyens humains et matériels sont bien coordonnés.

En 2002, la communauté scientifique française autour de l'atmosphère urbaine s'est élargie et la campagne ESCOMPTE (Toupance et al., 2001) témoigne d'un intérêt croissant pour cette thématique où les questions scientifiques restent nombreuses tant sur les mécanismes mis en jeu que sur leurs modélisations et donc leurs prévisions. L'observation détaillée de la couche limite urbaine a fait l'objet de la campagne ESCOMPTE-CLU (Mestayer et al., 2002) dont la base de données ciblée sur ces échelles va permettre d'affiner la modélisation du couvert urbain des modèles atmosphériques de méso-échelle comme Meso-NH et le modèle TEB (Masson, 2000) ou SUBMESO couplé avec le modèle SM2-U (Dupont, 2001).

Chapitre 3 :

TRANSPORT VERTICAL ET PROCESSUS DE MELANGE DANS UNE VALLEE

La climatologie d'un site est liée aux conditions météorologiques régionales ainsi qu'aux particularités locales (urbanisation, environnement topographique ...) Les épisodes de pollution les plus importants (en dehors des contextes accidentels) sont associés à des périodes anticycloniques caractérisées par un temps calme et très souvent un ensoleillement généreux. A l'échelle de l'agglomération et de son environnement proche, les variations de température, d'humidité et la force des vents seront alors déterminées par le type d'urbanisation, la présence ou non d'espaces verts et la topographie environnante. Dans un contexte grenoblois, il était tout naturel de s'interroger sur la contribution orographique à la dynamique locale. En effet, lorsque les vents régionaux ne pénètrent pas dans la cuvette grenobloise, il s'installe un régime de vents locaux créés par l'alternance jour / nuit. On distingue les vents de vallée, qui soufflent parallèlement à l'axe de la vallée, et les vents de pente, soit ascendants et chauds (baptisés vents anabatiques présents en journée), soit descendants et froids (les vents catabatiques qui prennent naissance la nuit). Ces vents sont générés par le réchauffement ou le refroidissement de la surface. La présence des vallées, ainsi que l'urbanisation, vont influencer ce cycle naturel et notamment vont avoir un impact considérable sur la formation et la destruction de l'inversion de température qui se crée au-dessus du site.

Afin de rendre compte de la dynamique atmosphérique à l'échelle d'un site comme celui de Grenoble, nous avons idéalisé la configuration topographique.

La vallée est certainement la forme géographique où l'effet de la circulation atmosphérique sur les échanges entre le sol et l'atmosphère est le plus complexe en raison notamment de la présence simultanée des forçages thermodynamique et orographique et d'une rugosité hétérogène.

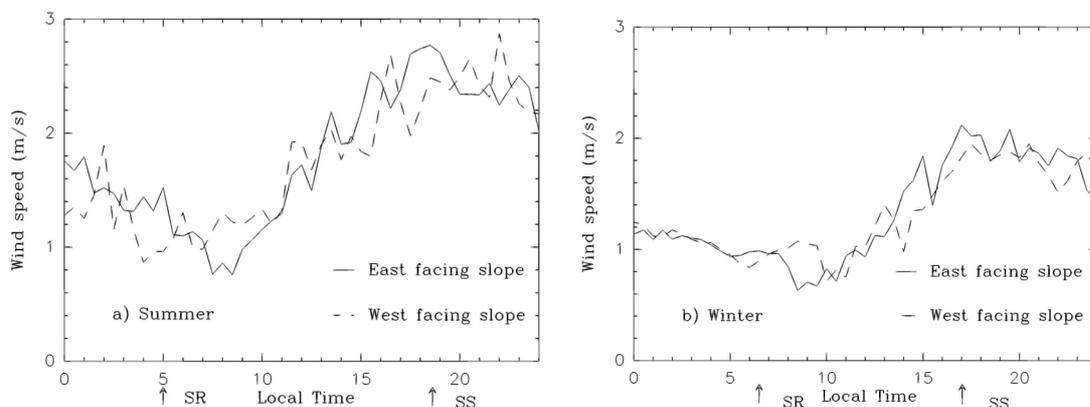
Les mouvements verticaux d'une particule d'air dans une couche stable et dans la couche turbulente résiduelle de l'atmosphère et les interactions entre couches sont des processus difficiles à caractériser, notamment et, tout particulièrement, pendant les périodes de transition (jour - nuit, nuit - jour). On s'intéresse donc à la simulation des cycles atmosphériques nycthémeraux par conditions de vent faible dans des vallées encaissées. On s'attache à mettre en évidence les échelles caractéristiques de la dynamique de la formation et de la destruction des couches d'inversion.

I. Mécanismes de formation et de destruction des inversions de vallées

La thèse de Claude Guilbaud (1996) a contribué à identifier les échelles caractéristiques des inversions de vallées qui rythment le cycle nyctéméral dans les vallées encaissées. Il s'agissait d'aller au-delà des propositions schématiques (Oke, 1987 ; Stull, 1988) qui ne précisait guère les échelles spatiales et temporelles des inversions. Par ailleurs, aucune notion de variations saisonnières n'était proposée. Les résultats de Whiteman (1982) apportaient quelques éléments de réponse concernant l'impact des flux énergétiques à la surface (présence ou absence de neige) sur les mécanismes de destruction des inversions de vallées. Mais ni l'orientation de la vallée ni les aspects tridimensionnels ne faisaient l'objet d'une attention particulière.

Les résultats de simulation avec le modèle SUBMESO dans le cas d'une vallée encaissée (largeur / profondeur > 2) montrent que l'approche tridimensionnelle s'impose dès lors que l'on souhaite représenter le cycle complet de formation et de destruction d'une inversion de vallée.

Anquetin et al. (1998) présentent les échelles de vitesses associées aux mouvements convectifs de la vallée. L'impact de la saison (à travers le flux de chaleur sensible sur les pentes) conduit quasiment à un doublement du module des vents locaux en été.

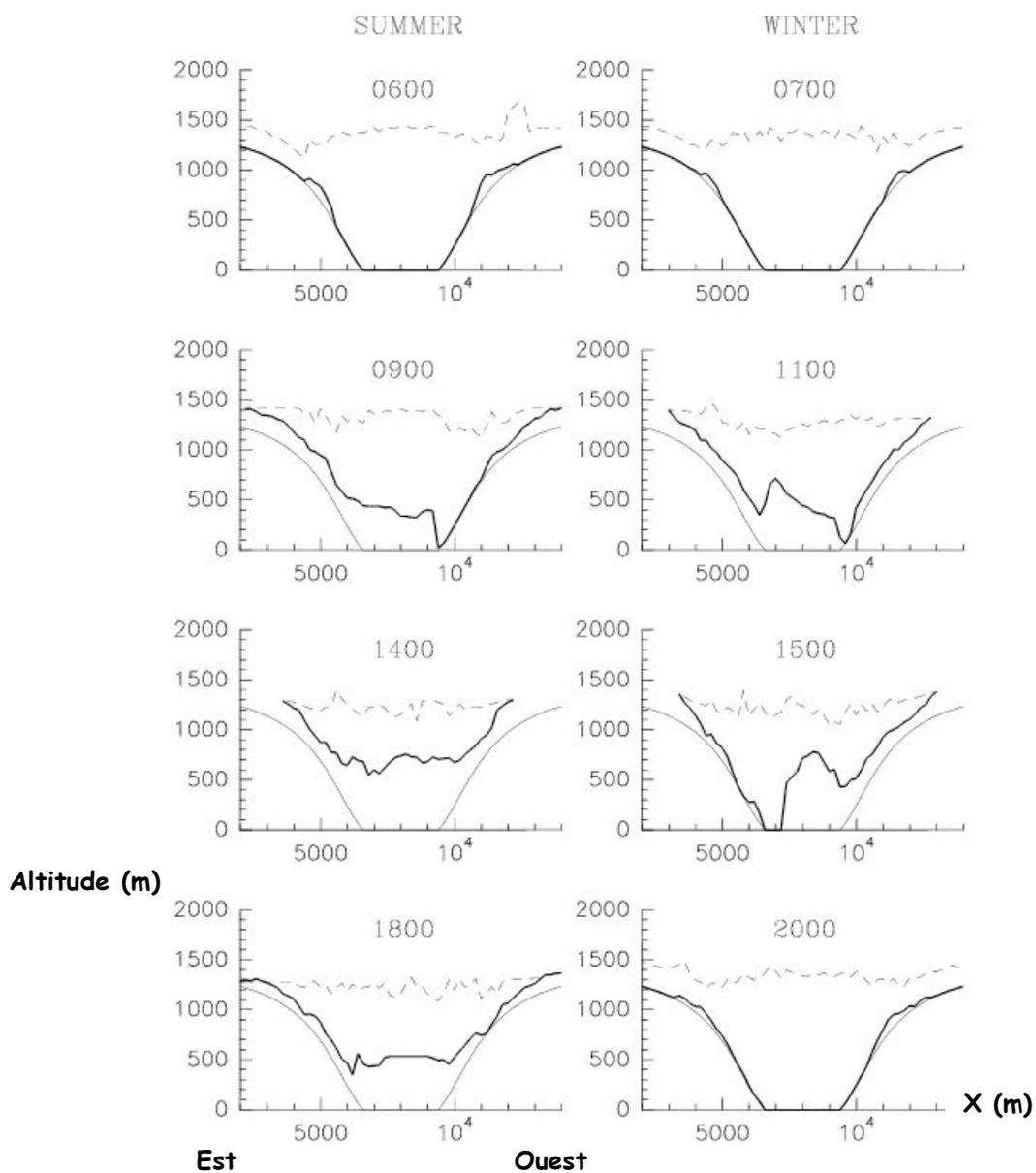


Ces deux figures illustrent la dynamique moyenne le long des pentes est et ouest de la vallée. L'effet de la saison est marqué par l'accroissement du module de vent moyen en été dû à l'ensoleillement plus marqué et plus long schématisé par l'intervalle entre SR (lever du soleil) et SS (coucher du soleil). Notons ici que les effets d'ombrage ne sont pas pris en compte.

(Guilbaud, 1996 ; Anquetin et al., 1998)

Les simulations tridimensionnelles avaient pour objectif de reproduire le cycle diurne dans une vallée stylisée en reproduisant notamment l'alternance des vents de pente moteurs de la dynamique des inversions. Le forçage surfacique à travers le flux de chaleur sensible joue ici un rôle prédominant.

Le choix des paramètres de simulation (type de sol, stratification initiale, géométrie de la vallée) n'a pas pu permettre de détruire entièrement l'inversion de vallée. Malgré ce choix « peu judicieux » de ces paramètres initiaux, on simula, en fait, une situation atmosphérique souvent observée dans la région grenobloise où une inversion de vallée peut se maintenir pendant plusieurs jours (rapport ASCOPARG, pendant l'hiver 1992-1993, ont été observés 35% des journées avec une inversion très marquée, dont 5 jours consécutifs). Guilbaud (1996) et Anquetin et al. (1998) montrent cependant l'impact de la saison sur la forme et les échelles de temps de l'inversion de vallée. La destruction de l'inversion de vallée est fortement liée au bilan énergétique sur les pentes et conduit donc à une inversion de vallée hivernale plus hétérogène dans l'espace. Les échelles de temps sont directement liées à la durée de l'ensoleillement. L'orientation de la vallée a donc un rôle important sur la dynamique locale.



Cette représentation bidimensionnelle de l'évolution temporelle du sommet de la couche convective (ou base de l'inversion de vallée) (trait gras) et du sommet de la couche d'inversion (trait pointillé) est obtenu en moyennant ces deux quantités le long de l'axe de la vallée. L'impact de la saison se traduit par une asymétrie forte de l'inversion de la vallée pendant la saison hivernale.

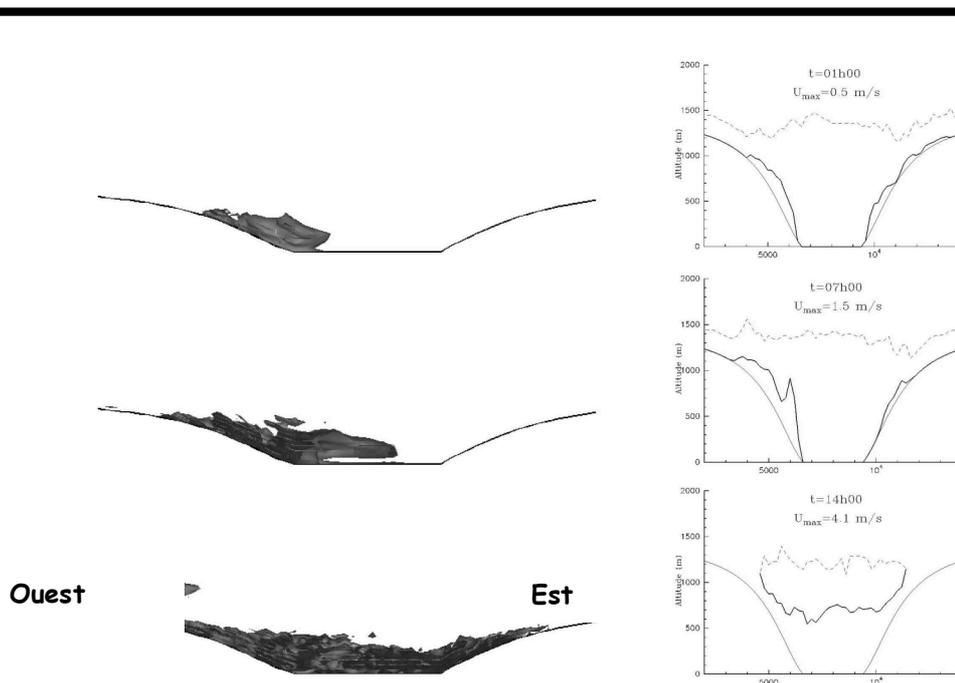
(Guilbaud, 1996 ; Anquetin et al., 1998)

II. Dispersion d'un traceur passif en zone de relief marqué

Dans des configurations de vallées encaissées (comme celles de Grenoble par exemple), les mouvements atmosphériques sont en général peu sensibles aux vents synoptiques en particulier pour les périodes les plus critiques pour la pollution. Ces périodes sont associées à des vents faibles où la convection thermique domine en formant ou non des inversions plus ou moins stationnaires.

Pour appréhender la dispersion des polluants en zone de relief marqué, deux cas de figure ont été étudiés :

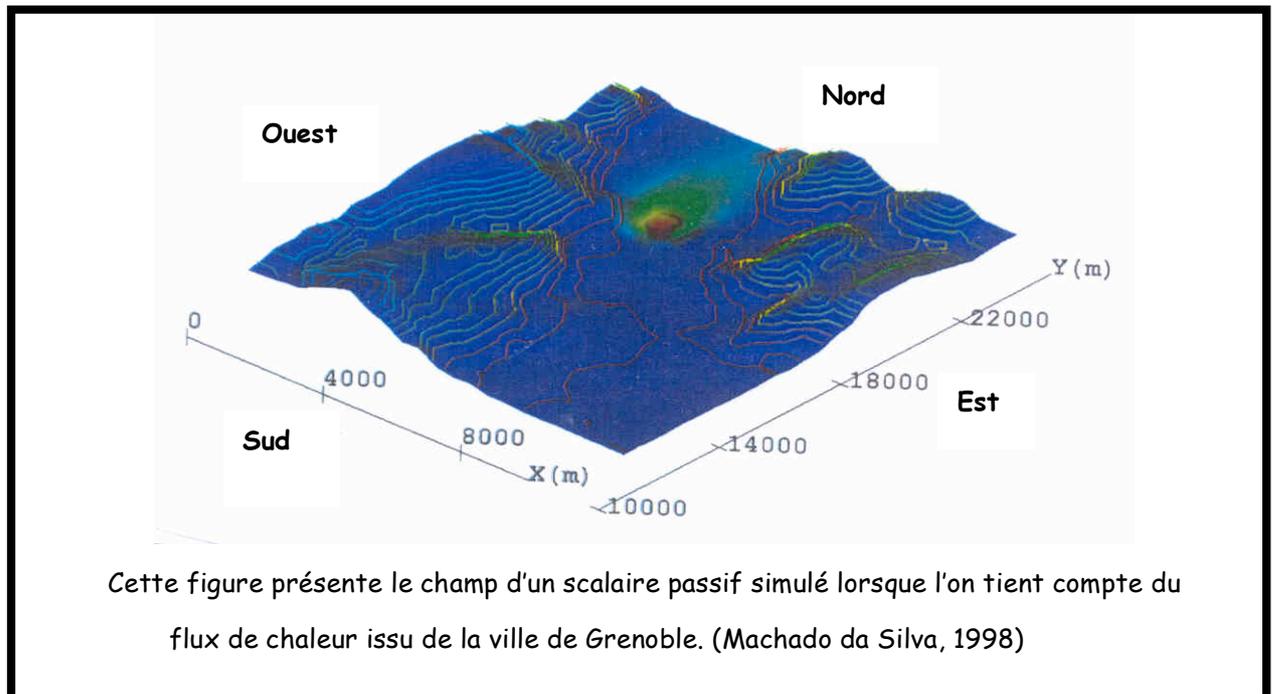
- + Dans le cas d'une atmosphère où les effets thermiques sont dominants, Claude Guilbaud (1996) s'est intéressé à l'impact des inversions de vallées sur la dispersion d'un traceur passif à travers des simulations numériques tridimensionnelles dans une vallée stylisée. Anquetin et al. (1999) montrent que la structure plus homogène de la couche limite convective estivale conduit à un meilleur mélange du traceur dans le fond de vallée. Ainsi, un polluant émis sera plus vite mélangé qu'en situation hivernale et en terme d'impact sera donc moins « nocif ».



Evolution temporelle du champ de concentration instantanée d'un traceur passif émis sur le flanc Ouest de la vallée mis en regard avec la structure instantanée de l'inversion de vallée dans le cas estival (trait gras : base de l'inversion, trait fin pointillé : sommet de l'inversion). L'isovaleur représentée correspond à 10% de la valeur émise.

(Anquetin et al., 1999)

- + Pour une atmosphère où la stratification est proche de la neutralité, Luis Machada da Silva (1998) montre à travers ses simulations avec le code SUBMESO qu'en situation de vent du sud faible (2 à 3 m/s) que le flux de chaleur issu de la ville de Grenoble joue un rôle moteur dans la forme et l'orientation d'un panache situé au NW de la ville.



III. Conclusions

En 1996, les calculs tridimensionnels étaient, à notre connaissance, les premiers calculs complets reproduisant le cycle diurne complet à l'échelle d'une vallée. Le choix d'une vallée idéalisée était motivé par la simplification des données d'entrée pour la simulation, et l'absence de données d'observations qualifiées pour traiter une vallée réelle. Les études associées à la configuration grenobloise nous ont permis de s'initier à des configurations réelles en identifiant les données nécessaires pour les simulations.

Ces études ont permis de mettre en évidence les échelles caractéristiques des mouvements à l'intérieur d'une vallée et le rôle prédominant du forçage surfacique.

Les perspectives de ces travaux étaient de confronter le modèle SUBMESO avec des données in-situ dans les vallées réelles. Il était envisagé de s'intégrer dans le programme MAP et

tout particulièrement dans le groupe de travail « Planetary Boundary Layer » autour de la POI RIVIERA pour laquelle la vallée Riviera du bassin de Ticino faisait l'objet d'une observation intensive. En effet, de juillet à novembre 1999, des mesures en continu de vitesse, température, précipitation, ensoleillement, et flux de chaleur sensible ont été enregistrées le long d'une section transversale à cette vallée. Ces mesures ont été complétées par des radio sondages, des données radar, des mesures de flux de chaleur latent, et des mesures aéroportées. L'idée de base était d'avancer dans la connaissance sur la structure turbulente de la couche limite planétaire et ses processus d'échange de quantité de mouvement, de chaleur sensible et latente pour des zones de relief marqué. La défection de moyens humains ainsi que la réorientation de mes activités scientifiques ne m'ont pas permis d'atteindre ces objectifs.

Chapitre 4 :

VARIABILITE SPATIALE DES PRECIPITATIONS EN ZONE DE RELIEF MARQUE

Alors que les processus météorologiques à grandes échelles contrôlent la capacité de l'atmosphère à former ou non un orage, la dynamique atmosphérique à l'échelle d'un relief va être à l'origine de l'initialisation ou du renforcement de celui-ci. Ainsi le relief joue un rôle majeur dans la distribution spatio-temporelle des orages et donc de la répartition spatiale et temporelle des précipitations à l'échelle des bassins versants.

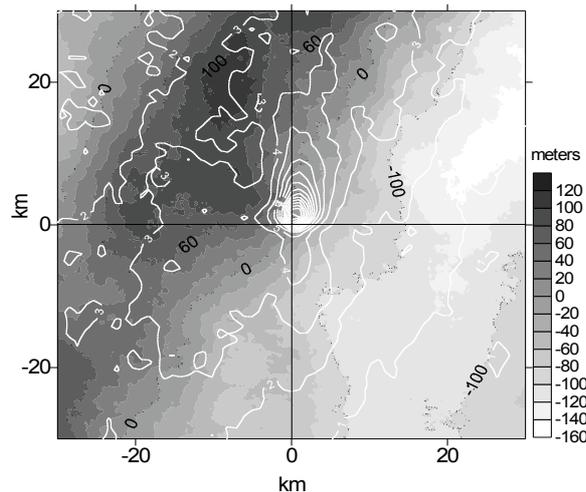
La modélisation numérique a pour objectif d'aider à comprendre et à mettre en évidence les mécanismes physiques qui sont à l'origine de la spatialisation des pluies fortement conditionnées par le relief. C'est un outil privilégié qui permet l'analyse de l'importance respective des forçages synoptiques et de ceux liés à la topographie. Les simulations numériques s'accompagnent, en préalable, d'un cadre de validation dédié à évaluer quantitativement les lames d'eau simulées aux échelles pertinentes pour l'hydrologie.

I. Interaction pluie - relief

Ce projet concerne les pluies associées au relief de la région Cévennes - Vivarais. En s'appuyant sur l'analyse des données sol et radar et la modélisation non hydrostatique avec le code MesoNH, il a pour but de comprendre les facteurs déclenchants de la convection peu profonde qui conduit à des bandes pluvieuses sur le relief. Il vise également à reproduire des systèmes convectifs de méso-échelle conduisant à des cumuls d'eau au sol importants.

(i) L'étude géostatistique à partir des données radar de l'expérience Cévennes 86 - 88

La caractérisation statistique de la variabilité des précipitations s'est faite à partir des observations radar issues de l'expérience Cévennes 86-88. Cette étude a porté sur la structure spatiale et temporelle des mesures radar et sur leur relation avec le relief (distribution de la pluie à l'intérieur des bandes pluvieuses, positionnement des bandes par rapport à la topographie). L'analyse des journées du 14 novembre 1986 et du 5 octobre 1987 montre que le soulèvement orographique des masses d'air saturées en humidité et advectées par un flux stationnaire en direction et en intensité conduit à une organisation particulière de la pluie au-dessus du relief. On a notamment montré qu'il existait une zone privilégiée de déclenchement des cellules de pluie sur les premiers épaulements du relief rencontrés par ce flux d'air humide (Miniscloux et al., 2001).



Cette figure présente le champ de pluie moyen (isolignes blanches graduées en $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) autour du point de déclenchement (0,0). En fond de carte, l'écart entre le dénivelé autour du point de déclenchement et le dénivelé local moyen est désigné par une échelle de gris.

Cette figure synthétique met en évidence la localisation privilégiée des points de déclenchement sur le flanc SE des épaulements du relief. Le champ de pluie moyen est limité par des isolignes orientées Sud-Nord. En moyenne, les intensités les plus fortes sont concentrées près du bord Sud des cellules de pluie.

(Miniscloux, 2001 ; Miniscloux et al., 2001)

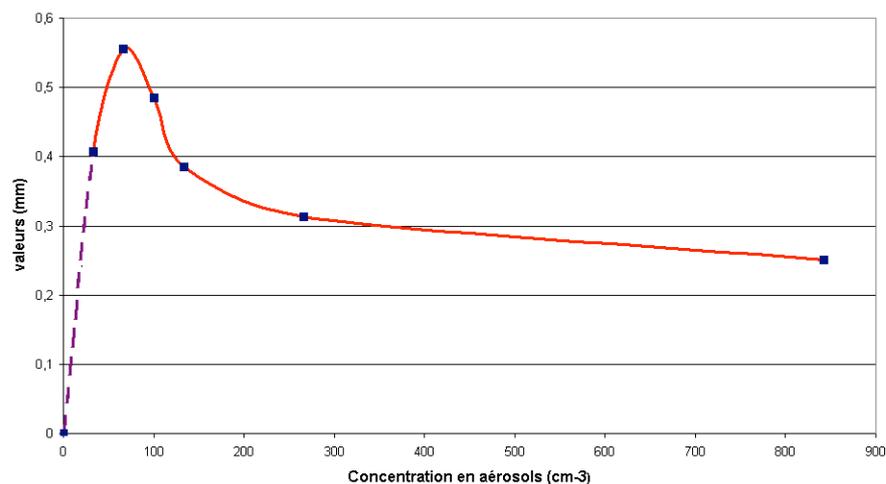
(ii) *Mise en évidence des mécanismes de déclenchement des pluies orographiques*

Les simulations numériques en aval de l'analyse descriptive des données radar ont pour but de comprendre les facteurs déclenchant de la convection peu profonde qui conduit à des bandes pluvieuses sur le relief. La notion d'imbrication des échelles météorologiques est ici fondamentale. Ces simulations sont constituées de deux volets : (i) des simulations plus académiques sur les facteurs déclenchant des pluies orographiques, (ii) la simulation de la situation du 14 novembre 1986.

Les principaux résultats obtenus à ce jour sont les suivants :

1) Des simulations académiques sur relief idéalisé, réalisées au LA (Cosma et al., 2002), montrent que le déclenchement de la bande est sensible au taux d'humidité en entrée du modèle. L'orientation de la bande est directement liée à la direction du vent incident.

2) Des simulations forcées par une atmosphère idéalisée sur une topographie réelle (M. Leporini, DEA CPCA 2001) mettent en évidence la sensibilité des systèmes convectifs orographiques aux types d'aérosols. En utilisant le nouveau schéma de microphysique chaud développé par Cohard et Pinty (2000a), les caractéristiques de la distribution des aérosols peuvent être changées explicitement. Les résultats mettent en évidence l'existence d'une concentration en aérosols au-delà de laquelle la quantité d'eau précipitée diminue progressivement. La formation et la croissance des gouttes de pluie sont ralenties lorsque la concentration en aérosols est augmentée car le processus d'autoconversion est moins efficace lorsque les gouttelettes nuageuses nouvellement nucléées sont nombreuses. La localisation des cellules de pluies est peu affectée par la composition en aérosols, par contre, plus l'atmosphère est chargée en aérosols plus les cellules sont étroites et courtes.

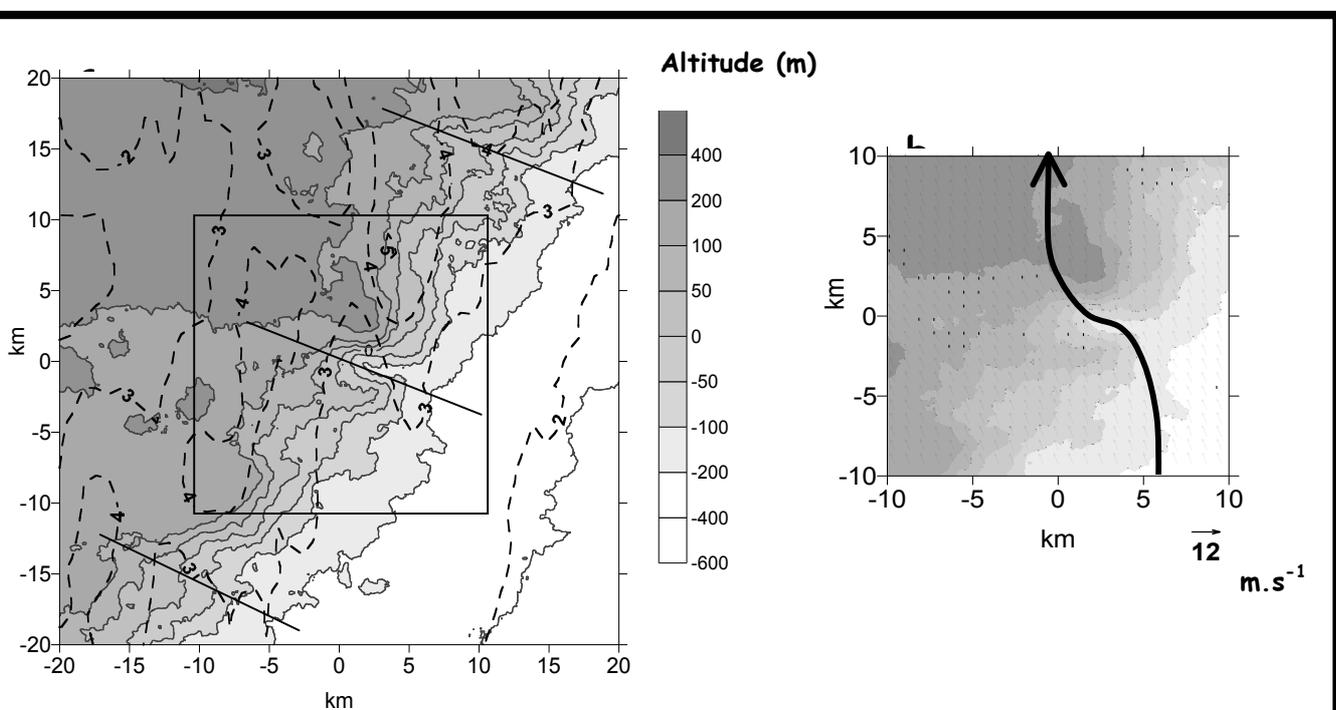


Cette figure présente l'évolution de la lame d'eau moyennée et simulée ($\Delta = 1$ km) sur l'ensemble de la région Cévennes - Vivarais en fonction de la concentration en aérosols. Elle montre qu'au-delà d'une concentration critique, les aérosols trop nombreux limitent la production des précipitations.

(Leporini, DEA CPCA, 2001)

3) Des simulations avec forçage et relief réel ont été réalisées au LA (Cohard and Pinty, 2000a, 2000b ; Cosma et al., 2002) puis reprises au LTHE afin d'affiner l'analyse à partir des outils d'analyse géostatistique développés par Fabien Miniscloux. Les premières simulations réalisées au LA ont servi de cadre de validation de la nouvelle paramétrisation de la microphysique à deux moments développée par Cohard et Pinty, (2000a). Les résultats des

simulations montrent que les structures fines du relief, en particulier les vallées pénétrantes, jouent un rôle déterminant sur l'organisation de ces systèmes. La reproduction des bandes pluvieuses est donc étroitement liée à la résolution horizontale du modèle haute résolution. L'analyse géostatistique montre que la dynamique des bandes pluvieuses est bien reproduite par le modèle (Anquetin et al., 2001). Le positionnement des déclenchements simulés est identique à celui des bandes pluvieuses observées ; leur nombre, en moyenne et par image, est légèrement sous estimé. L'analyse tridimensionnelle des champs simulés nous aide à comprendre les mécanismes de déclenchement des pluies orographiques. On montre que les zones de convergence de basse couche sont à l'origine des déclenchements. En effet, une analyse similaire à celle menée avec les données radar montre que les vallées pénétrantes du relief des Cévennes agissent sur le renforcement de ces zones de convergence (Anquetin et al., 2002).



La figure de gauche présente le champ de pluie moyen simulé (isolignes trait discontinu en mm.h^{-1}) autour du centre de gravité des zones de convergence (0,0). En fond de carte, le dénivelé moyen autour centre de gravité des zones de convergence est désigné par une échelle de gris. La figure de droite fait un zoom de la figure précédente et présente le champ de vent moyen simulé au sol.

Ces figures mettent en évidence le rôle fondamental des vallées pénétrantes étroites sur les formations des zones de convergence. Par ailleurs, le champ de pluie moyen maximum est localisé légèrement en aval de ces zones.

(Anquetin et al., 2002)

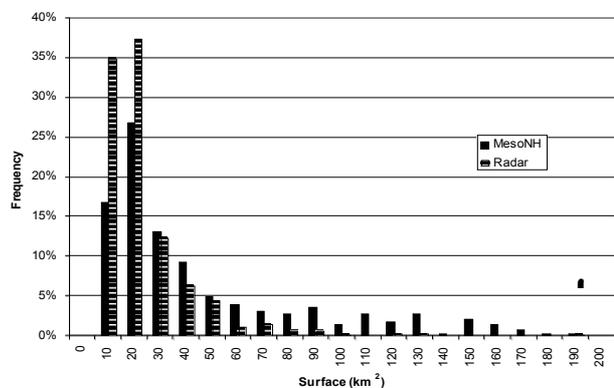
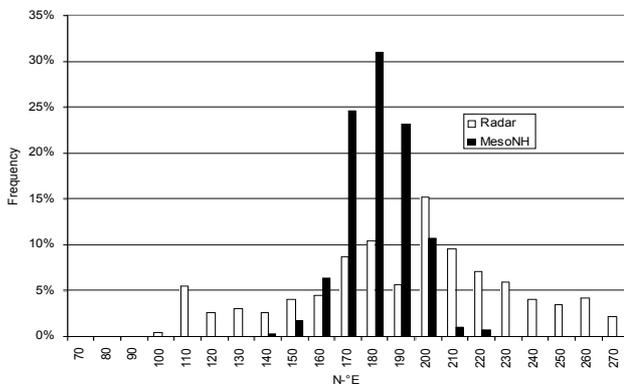
II. Mise en place d'un cadre de validation quantitative des précipitations simulées avec MesoNH.

(i) Validation morphologique des systèmes précipitants à caractère orographique

Le modèle MesoNH a fait l'objet de nombreuses validations à la fois sur des données in-situ et également sur des données de laboratoire.

On s'intéresse ici à reproduire la variabilité spatio-temporelle des précipitations. Les outils géostatistiques développés dans le cadre de la thèse Fabien Miniscloux (Miniscloux, 2001), servent à mener une démarche de validation par comparaison des pluies simulées, enregistrées toutes les 5 mn pendant la simulation des 9 heures de l'épisode du 14 novembre 1986, à l'analyse réalisée avec les données radar de l'expérience Cévennes 86 - 88 (Miniscloux et al., 2001). Les outils de comparaison reposent sur l'analyse statistique traditionnelle (moyenne, variance, variogramme ...) et sur l'analyse morphologique des cellules de pluie du système précipitant.

Cette inter-comparaison (Anquetin et al., 2001 ; Anquetin et al., 2002) a permis de préciser les choix de résolution et les choix des paramétrisations physiques introduites dans la simulation.



Ces figures présentent la comparaison entre les données radar et les pluies simulées pour l'orientation et la surface des cellules de pluie. On observe que le modèle ne reproduit pas toute l'instantanéité du mouvement dans la mesure où l'orientation des cellules est confinée autour de la direction principale de l'écoulement (vent du sud). Par ailleurs, le modèle surestime la surface moyenne des cellules. Pinty et al. (2001) attribuent ce résultat au schéma d'autoconversion du modèle de microphysique chaude de Kessler.

(Miniscloux, 2001 ; Anquetin et al., 2002)

(ii) *Cadre de validation quantitative*

L'objectif est ici de mettre en place un cadre de validation quantitative, notamment en terme hydrologique, des pluies simulées en associant l'expertise de météorologues et des hydrologues. A cette fin, des simulations de systèmes convectifs stationnaires du 13-14 octobre 1995 et du 3-4 octobre 1995 ont été réalisées au CNRM (Cibot, 1999 ; Ricard et al., 2000). On dispose pour cet épisode des chroniques horaires des 111 pluviomètres enregistreurs déployés sur la région (données DDE30, DDE07 et Météo-France).

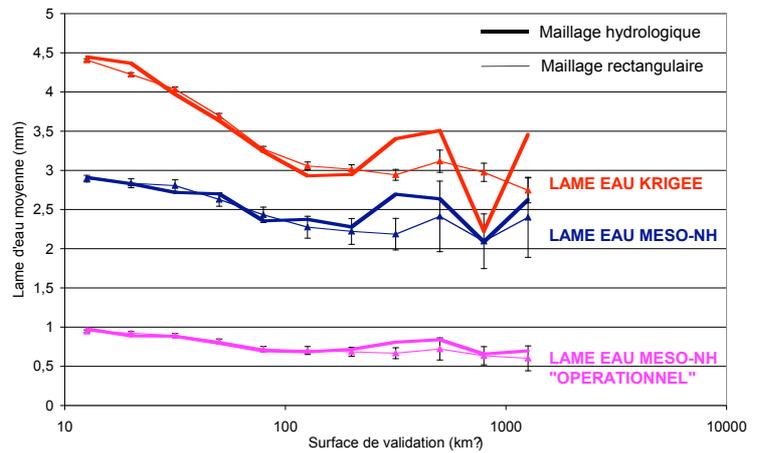
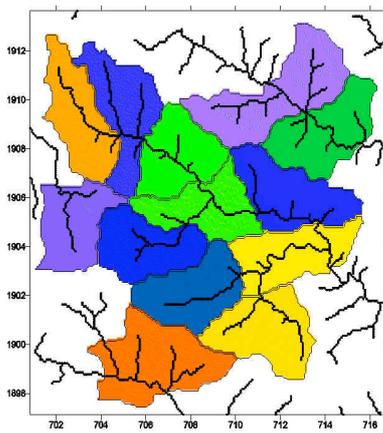
Caractériser la ressemblance entre des données simulées et observées pose au moins deux types de questions qui ont été abordées dans la thèse de Fabien Miniscloux.

- (i) Comment rendre comparable des grandeurs échantillonnées et intégrées de manière différente ?
- (ii) Comment choisir des critères de ressemblance adaptés à l'objectif poursuivi ?

Dans un premier temps, la caractérisation du support de validation a fait l'objet d'une étude approfondie. Outre les surfaces rectangulaires définies par le maillage du modèle météorologique, on s'attache à formuler des surfaces pertinentes pour l'hydrologie. Le bassin versant est alors la surface élémentaire et "naturelle" qui apparaît pertinente pour l'hydrologie dans la mesure où elle détermine les chemins de ruissellement de l'eau en surface. Ces surfaces de validation sont extraites du réseau de drainage calculé à partir du MNT avec un algorithme multidirectionnel ou mono directionnel. Ce dernier s'avère plus propice au cadre de notre étude dans la mesure où il permet d'identifier d'une part, les bassins versants emboîtés les uns dans les autres, et d'autre part, les surfaces correspondant au seul drainage des versants.

La lame d'eau obtenue à partir des mesures de pluie krigées sert de référence et est mise en regard avec celle obtenue avec le champ de pluie spatialisé simulé par le modèle MesoNH. Les outils de comparaison reposent sur l'analyse statistique traditionnelle de 2 jeux de données (corrélation linéaire, analyse des distributions par le calcul des moments ou par un tableau de contingence).

Les résultats, présentés dans le cadre de la thèse de Fabien Miniscloux, montrent que quel que soit le type de support (bassins versants, maillage hydrologique, maillage rectangulaire) et la durée du cumul, la valeur typique de la sous estimation de MesoNH représente environ 25 à 30% de la valeur moyenne théorique, sauf pour les grands bassins versants pour lesquels, cette proportion peut atteindre 75%.



Ces figures présentent le découpage en « maillage hydrologique » du réseau hydrographique calculé à partir du MNT, et la comparaison des lames d'eau moyenne (cumul en 1 heure) pour l'épisode convectif du 13-14 octobre 1995.

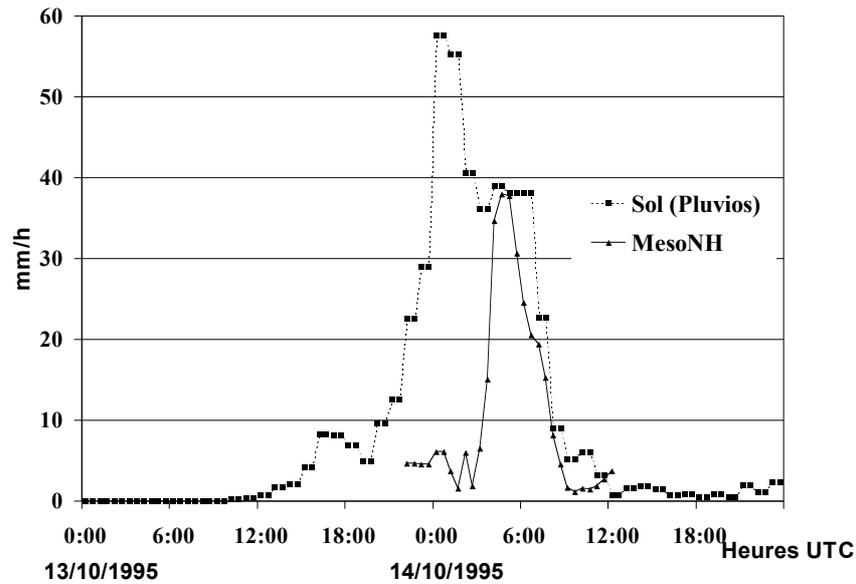
(Miniscloux, 2001)

III. Caractérisation hydrologique des épisodes convectifs Cévenols.

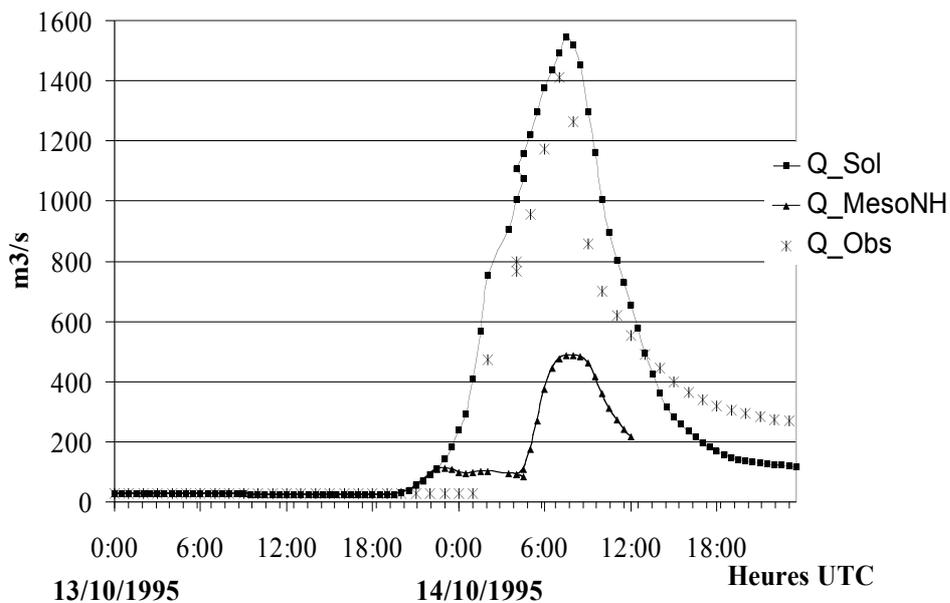
Afin de tester le réalisme hydrologique des sorties du modèle MesoNH, le forçage du modèle hydrologique TOPMODEL avec les sorties pluies simulées a été réalisé pour l'épisode convectif du 13 - 14 octobre 1995. Compte tenu de la localisation du maximum du cumul de pluie observé, nous nous sommes intéressés plus précisément à la signature hydrologique de cet épisode sur le bassin versant du Gardon d'Anduze (M. Rousselot, DEA MMGE).

Dans un premier temps un modèle de transfert basé sur la notion d'hydrogramme unitaire géomorphologique a été couplé au modèle de production TOPMODEL (Rousselot, PFE, juin 2001). Ce modèle a été validé sur le Gardon d'Anduze (545 km²) pour lequel on dispose d'un jeu de données suffisamment riche. La deuxième étape a consisté à utiliser ce modèle pour évaluer la signature hydrologique d'une situation convective donnée. Les champs de pluie simulés sont ceux obtenus par l'équipe du CNRM sur le cas de convection profonde du 13-14 octobre 1995.

Compte tenu du nombre limité d'heure de simulation, la mise en eau des bassins est effectuée à partir des données sol jusqu'à l'heure du début de simulation haute résolution, ensuite le modèle hydrologique est alimenté par les champs simulés et par les champs issus du krigeage des données sol.



Cette figure présente l'évolution temporelle de la lame d'eau moyenne sur le bassin d'Anduze.



Cette figure présente une comparaison entre les débits reconstitués avec le modèle TOPMODEL à partir des pluies krigées (Q_{Sol}) et des pluies simulées (Q_{MesoNH}) et la mesure des débits à l'exutoire (Q_{Obs}).

Ces deux figures montrent une sous estimation évidente de la dynamique de pluie simulée et son impact hydrologique. Sont encore à l'étude la contribution respective du volume d'eau simulé et de la spatialisation du champ de pluie simulé sur cette dynamique de crue.

(Rousselot, DEA MMGE, 2001)

IV. Conclusions

Ces travaux ouvrent des perspectives tant sur la connaissance des mécanismes physiques des pluies orographiques (pulsation, persistance, occurrence...) que sur le champ d'application de nos outils à de nouvelles données issues de l'Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes - Vivarais.

Concernant les pluies orographiques, la situation bien documentée du 14 novembre 1986 est remarquablement bien reproduite par le modèle. Ces premiers résultats nous confortent dans l'idée d'utiliser un tel outil comme champ d'investigation pour étendre notre compréhension sur les structures de systèmes précipitants directement liés au relief.

La connaissance du champ de précipitation est souvent sommaire car elle est limitée à la mesures des pluviomètres qui sont d'autant plus dispersés que le relief est élevé. Le radar météorologique permet d'accéder à une information plus continue du phénomène.

Concernant les situations convectives quasi-stationnaires et leur qualification hydrologique, ces résultats montrent que le modèle MesoNH peut fournir un certain réalisme de ces situations. Il n'en demeure pas moins que le réalisme hydrologique de ces simulations est encore à l'étude. Les premières études préliminaires autour de l'épisode du 13 - 14 octobre 1995 montrent qu'une délocalisation même minime des précipitations (~ 10 km, c'est à dire moins de 4 points de grille du modèle atmosphérique) conduit à une signature hydrologique très éloignée de l'observation. Cependant, les systèmes précipitants seront bien décrits si la résolution horizontale est suffisamment grande : l'expérience montre que pour des grilles d'au moins 2.5 km la description des processus microphysiques conduit à des résultats très prometteurs. Nous pouvons donc envisager de réduire légèrement cette résolution afin de mener des études hydrologiques plus systématiques sur l'ensemble des bassins versants de la région.

PERSPECTIVES

CLIMATOLOGIE DES PLUIES EN ZONES DE RELIEF MARQUE - IMPACT HYDROLOGIQUE

L'influence de la répartition spatiale et temporelle des précipitations sur le comportement des systèmes hydrologiques est une source classique d'interrogation dans la communauté hydrologique. L'intérêt sociétal qu'elle représente recouvre la disponibilité et la gestion de l'eau en tant que ressource et le risque d'inondation et d'érosion. En région de montagne, l'analyse spatiale de l'interaction continent - atmosphère est particulièrement pertinente en raison de l'action marquée du relief à la fois sur le déclenchement des pluies, et leur intensification, et sur la formation des écoulements en rivière.

Pour aborder cette question, il est nécessaire de conjuguer la connaissance de la dynamique des systèmes précipitants (système convectif, renforcement orographique s'il a lieu) avec celle des processus hydrologiques (infiltration, ruissellement, reprise évaporative) aux échelles des bassins versants. En s'attachant à comprendre et à modéliser la variabilité des précipitations, l'équipe *HMETEO* du LTHE, dans laquelle s'inscrivent mes activités, a pour axe de recherches principal de quantifier l'impact de cette variabilité pluviométrique sur le cycle de l'eau continental. Deux domaines d'application particuliers sont visés par ces recherches : celui lié à la formation des crues éclaircies d'une part, celui de la variabilité des ressources en eau, d'autre part, en particulier dans un contexte de variabilité climatique.

Dans le prolongement de mes travaux antérieurs, mes activités de recherches resteront liées aux zones de montagne où les mécanismes de formation des précipitations sont renforcés par le soulèvement que le relief impose. L'objectif est de mieux comprendre le rôle joué par la surface sur l'organisation et la dynamique des systèmes convectifs ainsi que sur l'organisation des précipitations. Actuellement intégrée dans les programmes nationaux (PATOM, PNRH) et dans le cadre de l'Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen, cette thématique, à caractère fortement pluridisciplinaire, a pour finalité la mise en évidence des échelles pertinentes du couplage hydrologie - météorologie. Ces objectifs ont été présentés dans le programme « *Optimisation des outils de prévisions hydrométéorologique - HYDROPTIMET* », coordonné par la région Piémont et en cours d'évaluation dans le cadre du programme INTERREG III - Méditerranée Occidentale.

Ces recherches ont pour objectifs d'aider à mettre en place des concepts puis des outils dédiés à affiner les prévisions des systèmes précipitants qui conduisent à la formation des crues - éclairs. Associée à l'observation en continue de la dynamique hydrométéorologique à l'échelle de la région Cévennes - Vivarais, la modélisation fine des systèmes précipitants a pour objectif d'aider à mieux appréhender les mécanismes explicatifs de leurs genèses. Mon expérience antérieure montre qu'aujourd'hui le modèle MesoNH, par exemple, est tout à fait à même à répondre à ces objectifs. Cependant, la question de la qualification hydrologique des champs simulés reste posée.

Dans le cadre de ces objectifs, mon activité future devrait s'organiser autour des quatre thèmes suivants dont l'aboutissement serait la mise en place d'une campagne d'observation intensive destinée à valider les outils de prévisions des crues - éclairs dans les régions de montagne. Les idées seraient :

- (i) d'affiner le réseau d'observations hydrométéorologiques en intégrant de nouvelles observations (GPS par exemple) afin d'améliorer l'assimilation et donc l'état initial des modèles (météorologique et hydrologique),
- (ii) de mieux comprendre les mécanismes physiques qui conduisent à une persistance et à une localisation privilégiée des systèmes précipitants,
- (iii) de rendre compte de la dynamique hydrologique à toutes les échelles.

I. Des recherches intégrées dans le cadre de l'OHMCV

La région Cévennes - Vivarais, représentative de la moyenne montagne de l'ensemble du pourtour méditerranéen est soumise à un fort risque de crues - éclairs lié à un régime pluviométrique et hydrologique caractérisé par une forte intermittence des pluies et des débits. Cette région a été retenue pour la mise en place d'un Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen (OHMCV), coordonné par G. Delrieu (LTHE) qui associe des équipes de recherche en météorologie et en hydrologie ainsi que le secteur opérationnel⁴. Cet Observatoire a pour objectif d'étudier le risque de crue - éclair sur 5 bassins versants des Cévennes (Ardèche, Hérault, Gard, Cèze, Vidourle) en développant l'instrumentation et la modélisation. Une campagne « blanche » (automne 2000) a permis de préciser les besoins de la base de données hydrométéorologique OHMCV (S. Pialat, 2001 DEA CPCA).

⁴ Pour la recherche : CETP, CNRM, LA, LaMP, LCPC, LTHE,

Pour le secteur opérationnel : DDE07, DDE30, DIREN, Météo-France

En archivant les données d'observation sur une période minimale de 10 ans, cet observatoire, récemment reconnu comme Observatoire de Recherche pour l'Environnement (ORE) par le Ministère de la Recherche, va permettre de développer un cadre de recherches coopératives à l'échelle nationale et/ou européenne destinées à mieux caractériser (et donc mieux prévoir) les situations atmosphériques qui sont à l'origine des crues - éclairs sur ce type de région (pourtour méditerranéen, forte composante orographique). Il s'agit, dès aujourd'hui, de faire le point sur l'état de l'art des connaissances hydrométéorologiques sur ce phénomène et des outils de prévision et de mise en alerte qui seront synthétisés dans un "livre blanc", dont j'assume la coordination. Cette réflexion doit nous conduire à bâtir un projet de recherche européen coordonné qui comblera les lacunes sur la prévision des crues - éclairs en Europe.

II. La mesure GPS : un complément d'observation à l'OHMCV

En complément de mes activités actuelles dédiées à la mise en place de l'Observatoire, je m'intéresse ici aux potentialités de la mesure GPS pour l'initialisation des modèles. Cette thématique est portée par Andréa Walpersdorf (LGIT - Grenoble), avec qui je collabore à travers un projet financé par les ACI « Observation de la terre ». Une thèse a débuté en septembre 2002 en collaboration avec Véronique Ducrocq (CNRM) sur la valorisation météorologique des champs tridimensionnels de vapeur d'eau troposphérique obtenus par GPS. Le cadre de l'étude est celui des pluies intenses dans les régions méditerranéennes et plus particulièrement les Cévennes - Vivarais.

Le GPS se révèle être une méthode performante pour obtenir en continu en un point donné la valeur intégrée sur toute l'atmosphère de la quantité d'eau précipitable. La grande stabilité dans le temps de ce système permet d'avoir une cohérence dans les mesures sur des échelles de temps allant de quelques heures à plusieurs années. La conversion du signal GPS en vapeur d'eau troposphérique est étroitement liée aux caractéristiques thermodynamiques de l'atmosphère (Pression, température, masse volumique, rapport de mélange de vapeur d'eau). Actuellement, cette conversion s'appuie sur des expressions analytiques déduites d'observations.

On cherchera à mettre en évidence le passage de champs d'humidité atmosphérique à partir des données GPS, et de corrélérer ces observations avec les mesures des précipitations obtenues par radar, notamment celles obtenues par le radar de Bollène fonctionnant en balayage volumique. L'idée, à terme, serait d'assimiler ce type d'observations tridimensionnelles dans les modèles météorologiques (MesoNH) afin d'affiner l'état initial de la simulation.

III. Modélisation des systèmes précipitants à caractère orographique

Dans le prolongement de mes travaux antérieurs, il s'agit de poursuivre notre démarche sur la mise en évidence des mécanismes de déclenchement des bandes précipitantes sur le relief et leurs organisations en fonction de situations atmosphériques contrôlées.

Pour mener à bien cette réflexion et avec le modèle MesoNH, des simulations de situations atmosphériques idéalisées au-dessus du relief réel des Cévennes doivent être poursuivies en jouant sur les points suivants :

- + modification de la direction du vent dominant afin de montrer l'évolution spatiale des bandes pluvieuses,
- + modification de la vitesse du vent et de son humidité afin d'apprécier le rendement en production de pluie de ces systèmes,

L'objectif de ces simulations est de comprendre les principaux mécanismes qui conduisent à une organisation des zones pluvieuses sur le relief et de mettre en place une action de validation dans le cadre d'une POI de l'OHMCV, notamment en utilisant les radars locaux bande X développés au laboratoire.

Au-delà de ces mécanismes, il serait également intéressant d'étudier la sensibilité de la convection orographique aux conditions de circulation générale. Sur la base de simulation MesoNH forcées par des « types de temps » identifiés à partir d'analyses climatiques, on envisage d'évaluer la contribution de la convection peu profonde dans la région Cévennes - Vivarais et sa part dans le régime pluviométrique.

Cette même démarche est également envisagée dans le cadre des activités liées au projet « Mousson Africaine » et notamment à travers les activités de Arona Diedhiou (LTHE). L'idée serait d'évaluer le rôle de l'orographie sur la variabilité des précipitations autour des montagnes du Fouta Djallon (Afrique de l'Ouest) où l'analyse des images satellitaires montre que les reliefs du Fouta Djallon et mont Cameroun sont des zones de forte activité des systèmes convectifs.

IV. Modélisation des systèmes convectifs de méso-échelle : Retour d'expérience dans le cadre de l'OHMCV et HYDROPTIMET

Les résultats obtenus récemment (E. Yates, DEA CPCA 2002) nous invitent à poursuivre nos efforts destinés à évaluer le risque hydrologique associés aux systèmes convectifs de méso-échelle qui sont à l'origine des précipitations intenses sur la région Cévennes - Vivarais.

Il s'agit ici de s'appuyer sur la base de données hydrométéorologique de l'OHM-CV. Cette partie se fait en étroite collaboration avec le CNRM (Véronique Ducrocq). L'idée est de profiter de la complémentarité de nos deux équipes, afin d'une part de réaliser les simulations de cas réels à Toulouse (prise en compte des techniques d'initialisation développées par le CNRM), et d'autre part, de faire la quantification hydrologique à Grenoble sur la base des données de l'OHMCV. Ensemble, nous évaluerons les potentialités des champs de forçage (ARPEGE, CEP) et des paramètres physiques des simulations (résolution, turbulence, microphysique) sur la lame d'eau simulée et la localisation des zones précipitantes dans l'objectif d'une modélisation couplée.

Cette démarche est proposée pour la région alpine dans le cadre du projet HYDROPTIMET, coordonné par la région Piémont (Italie), et en cours d'évaluation par le programme INTERREG III. L'objectif général de ce projet est de tester l'usage de la prévision quantitative des précipitations, obtenue avec différentes méthodes, dans le processus d'évaluation du risque d'inondation jusqu'à la phase de décision de mise en alertes.

V. Vers une modélisation couplée atmosphère - hydrologie

Dans la perspective du couplage météorologie - hydrologie, on s'interroge sur les processus expliquant la sensibilité hydrologique à la variabilité spatio-temporelle des précipitations. Outre les échelles pertinentes pour le forçage, dans un premier temps, puis le couplage in fine, il faut identifier les caractéristiques principales des champs de pluie qu'il est impératif de respecter.

La question scientifique du couplage se pose essentiellement en terme de notion d'échelles et de leurs interactions possibles susceptibles de fournir des éléments de compréhension de la variabilité des précipitations.

La première étape consistant à faire des études de forçage est dédiée à mettre en évidence la taille critique pour laquelle la signature hydrologique de la variabilité spatio-temporelle des précipitations disparaît et donc d'identifier les échelles spatiales et temporelles du couplage pour appréhender les phénomènes de crues éclair. Cette étape a été amorcée (M. Rousselot, DEA MMGE 2001), et sera poursuivi à travers des études concernant le forçage du modèle TOPODYN (Datin et Saulnier, 2002) par des champs de pluie simulés avec MesoNH sur un ensemble de bassins des régions Ardèche et Cévennes. L'idée est de mettre en évidence la sensibilité de la réponse hydrologique à la variabilité des précipitations en fonction de la taille du

bassin et des caractéristiques des bassins (topographie, couvert végétal, etc.). Pour poursuivre les actions déjà menées, on se propose de comprendre l'impact de l'humidité initiale des sols sur la réponse d'un bassin.

La deuxième étape qui consiste à coupler les modèles sera alors plus particulièrement technique :

- + rendre compatible les géométries des modules de surface,
- + concevoir ou adapter les couches logiciels permettant l'échange d'information.

Les récents débats de l'Atelier de Modélisation de l'Atmosphère (3-4 décembre 2001) montrent que les réflexions sont déjà bien amorcées et que des solutions techniques comme OASIS (CERFACS) ou COUMEHY (LTHE - C. Messenger) sont en cours d'évaluation.

Ces activités de modélisation couplée se font donc en étroite collaboration avec les chercheurs de l'équipe *Hydrologie et Hydraulique de Bassin (H2B)* du LTHE ainsi que les partenaires du CNRM et du CERFACS.

REFERENCES LIEES A MES ACTIVITES DE RECHERCHE

Abart B., 1999, Modélisation de la turbulence en écoulements stratifiés stables pour la couche limite atmosphérique. Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes et de l'Université de Nantes.

Anquetin S., C. Guilbaud, J.P. Chollet, 1995, Mécanismes responsables de la formation et de la destruction des couches d'inversion dans les vallées encaissées, *Atelier de modélisation de l'atmosphère*, Toulouse 28-30 Novembre.

Anquetin, S., Bonneton, P., 1996, Turbulent structure within the breaking lee waves over three-dimensional topography, *Euromech, 6th European Turbulence Conference*, Lausanne, July 2-5.

Anquetin, S., Guilbaud, C., Chollet, J.P., 1998, The formation and destruction of inversion layers within a deep valley, *J. of Applied Meteo*, **37**, n°12, 1547-1560.

Anquetin, S., Guilbaud, C., Chollet, J.P., 1999, Thermal valley inversion impact on the dispersion of a passive pollutant in a complex mountainous area, *Atm. Environment*, **33**, 3953-3959.

Anquetin S., Cohard J.M., Miniscloux F., Creutin J.D., Cosma S., Pinty J.P., Richard E., Observation and numerical simulation of rain bands over complex topography, *7th International Conference on Precipitation*, Samoset Resort, Maine, June 30 - July 3, 2001.

Anquetin, S., J.M. F. Miniscloux, J.-D. Creutin, and S. Cosma, 2002, Numerical simulation of orographic rainbands, soumis au *J. of Geophysical Research*.

Bouvier, L., 1999, Evolution diurne de la couche limite atmosphérique, l'expérience de Wangara, Rapport de stage de DEA *Mécanique des Fluides et des Transferts*, Septembre 1999.

Cibot C., 1999, Potentiel hydrologique de la modélisation atmosphérique à haute résolution des épisodes cévenols, *DEA Océan - Atmosphère - Biosphère, Toulouse III*.

Clarke, R.H., A. Dyer, R.R. BROOK, D.G. Reid and A.J. Troup, 1971, The Wangara experiment : Boundary layer data, Tech. Paper 19, Div. Of Meteorol. Phys. Commonwealth Sci. And Ind. Res. Organ., Melbourne, Australia.

Cohard JM, 1999, Conception et évaluation d'un schéma de microphysique chaud pour le modèle MesoNH. Thèse de l'Université Paul Sabatier - Toulouse III.

Cohard JM and Pinty JP, 2000(a), A comprehensive warm microphysical bulk scheme, part I : Description and selective tests. *Quart. J. Roy. Meteor. Soci.*, **126**(566), 1815-1842.

Cohard JM and Pinty JP, 2000(b), A comprehensive warm microphysical bulk scheme, part II : Applications and sensitivity experiments. *Q.J.R.M.S.*, **126**(566), 1843-860.

Cosma S., E. Richard and F. Miniscloux, 2002, The role of small scale orographic features in the spatial distribution of precipitation, *Q.J.R.M.S.*, **128**, 1-18.

Datin R. and G.-M. Saulnier, 2002.

Dupont, S., 2001, Modélisation dynamique et thermodynamique de la canopée urbaine : réalisation du modèle de sols urbains pour Submeso. Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes et de l'Université de Nantes.

Fredman, F.R. and R.D. Bornstein, 1998, Study of the spacial and temporal structure of turbulence in the nocturnal residual layer, *Air Pollution Modeling and Its Application XII*, Plenum Press, 327-335.

Guilbaud, C., 1996, Etude des inversions thermiques : Application aux écoulements atmosphériques dans les vallées encaissées. Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier.

Guilbaud, C., Chollet, J.P., Anquetin, S., 1997, Large eddy simulations of stratified atmospheric flows within a deep valley, *Direct and Large Eddy Simulation II*, ed. Chollet, Kleiser & Voke, ERCOFTAC series, Kluwer academic publishers, pp 157-166.

Guilloteau, E., 1999, Modélisation des sols urbains pour les simulations de l'atmosphère aux échelles sub-méso. Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes et de l'Université de Nantes, 350 p.

Hussain M. and B.E. Lee, 1980, An investigation of wind forces on three dimensional roughness elements in a simulated atmospheric boundary layer flow. Report BS 56, Department of Building Science, Faculty of Architectural Studies, University of Sheffield.

Lafore, J.-P., J. Stein, N. Asencio, P. Bougeault, V. Ducrocq, J. Duron, C. Fisher, P. Hereil, P., Mascart, J.-P. Pinty, J.-L. Redelsperger, E. Richard and J. Vila Guerau, 1997 : The MesoNH atmospheric simulation system. Part I: Adiabatic formulation and control simulations. *Ann. Geophys.* , **16**, 90-109.

Leporini M., 2001, Signatures des aérosols dans les systèmes convectifs orographiques. DEA Climat et Physico-Chimie de l'Atmosphère, Université Joseph Fourier Grenoble I.

Machado da Silva, L., Anquetin, S., Chollet, J.P., 1997, Dispersion of passive pollutant above urban areas in mountainous region, , *AIR POLLUTION IV*, Ed. Computational Mechanics Publications, **2**, 667-675.

Machado da Silva L., 1998, Transport d'un traceur passif dans l'atmosphère. Expériences et simulations numériques - Relief complexe, le site de Grenoble. Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble I.

Masson, V., 2000, A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, *Boundary Layer Meteorology*, **98**, 357 - 397.

Mestayer P. et al., 2002, The field experiment ESCOMPT-CLU, *Boundary Layer Meteorology*.

Miniscloux F., Creutin JD and Anquetin S., 2001, Geostatistical analysis of orographic rainbands. *J. of Applied Meteor.*, **40**, 11, 1835-1854.

Miniscloux F., 2001, Précipitations orographiques et convectives en région Cévennes - Vivarais : Validation de simulations numériques par des données pluviométriques et radar. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.

Moeng, C.-H., 1984, A large eddy simulation model for the study of planetary boundary layer turbulence, *J. Atm. Sci.*, **41**, 2051-1062.

Mostafa A.A. and H.C. Mongia, 1987, On the modeling of turbulent evaporating sprays : Eulerian versus Lagrangian approach, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **12**, 2585 - 2593.

Noilhan, J. and S. Planton 1989, A simple parametrization of the land surface processes for meteorological models, *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 536-549.

Oke, T.R., 1987, *Boundary layer climates*. Routledge, London.

Pialat S., 2001, Mise en place et évaluation de la campagne banche de l'OHMCV, DEA Climat et Physico-Chimie de l'Atmosphère, Université Joseph Fourier Grenoble I.

Penelon T., 2002, Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes et de l'Université de Nantes.

Ricard D., V. Ducrocq et J.-P. Lafore, 2000, Modélisation atmosphérique à haute résolution d'épisodes convectifs cévenols, AMA Toulouse.

Rousselot M., 2001, Etude du transfert pluie - débit par la fonction de transfert géomorphologique. Caractérisation hydrologique de la situation convective du 13-14 octobre 1995 avec TOPMODEL. DEA Mécanique des Milieux Géophysiques et Environnement, Université Joseph Fourier Grenoble I.

Schumann, 1991, Subgrid scale model for large eddy simulation of stratified turbulence, *Theoretical and computational Fluid Dynamics*, **2**, 179-290.

Smagorinsky, J., 1963, General Simulation experiments with the primitive equations. *Mon. Weat Rev.*, **91**, 99-164.

Stull, R.B., 1988, *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers.

Toupance, G., Cros, B., Boissard, C., Durand, P., Perros, P., Pesin, E., Peuch, V.-H., Ponche, J.-L., 2001, Programme préparatoire à la réalisation d'une Expérience sur Site pour Contraindre les Modèles de Pollution atmosphérique et de Transfert d'Emissions: ESCOMPTE. *Rapport final de convention ADEME*, 49 pp.

Whiteman, C.D., 1982, Breakup of temperature inversions in deep mountain valley. Part I : Observations. *J. Appl. Meteo*, **21**, 270-289.

Yates E., 2002, Simulation et analyse hydrologique de l'épisode pluvieux du 6 - 7 Octobre 2001, DEA Climat et Physico-Chimie de l'Atmosphère, Université Joseph Fourier Grenoble I.

SANDRINE ANQUETIN
(née LEVI ALVARES)

Mariée, 3 enfants (1994, 1996, 1999)

Française

Née le 30 juin 1964.

ADRESSE PROFESSIONNELLE

Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (L.T.H.E.)
B.P. 53, 38 041 Grenoble Cedex

Tél : (33) 4 76 82 51 08, Fax : (33) 4 76 82 52 86

Email : anquetin@hmg.inpg.fr

THEMES DE RECHERCHE

- **Simulation des grandes échelles et modélisation de la turbulence.**

Statistique de Reynolds pour les écoulements à fortes variations de masse volumique (fermeture au second ordre).

Modélisation des écoulements atmosphériques stratifiés (modèle k- ϵ , modèle k-L, et simulation des grandes échelles TKE-Ri).

- **Modélisation non-hydrostatique tridimensionnelle des écoulements orographiques.**

Développement du code de calcul SUBMESO sur la base de ARPS3.1 (Université d'Oklahoma).

Etude de la formation / destruction des couches d'inversions dans les vallées et leur impact sur la dispersion de polluants passifs.

Modélisation numérique des écoulements atmosphériques à l'échelle d'une agglomération.

Etude de la variabilité spatio-temporelle de la pluie.

Modélisation du renforcement des précipitations sur le relief des Cévennes avec le modèle MesoNH.

Validation hydrologique des pluies simulées à l'échelle du bassin versant.

- **Vers la modélisation couplée atmosphère - hydrologie.**

Réponse hydrologique à un champ de pluie simulé avec le modèle MesoNH.

SITUATIONS PROFESSIONNELLES

- **Fév. 1999 CNRS, Affectation au LTHE** **Grenoble**

Chargée de Recherches 1ère Classe, Sections 12 et 10

- **Oct. 1992 CNRS, Affectation au LEGI** **Grenoble**
Chargée de Recherches 2^{ème} Classe, Section 10

- **1991-1992 Ecole Centrale de Nantes** **Nantes**
Assistant Temporaire d'Enseignement et de Recherche

- **1991 CNAM - INTECHMER** **Cherbourg**
Enseignant vacataire

- **1988 -1991 CNRS, Ecole Centrale de Nantes** **Nantes**
Bourse BDI

- **1987 Cabot Corporation** **Boston, USA**
Ingénieur de recherches.
Développement d'une station d'échantillonnage de gaz par chromatographie en phase gazeuse.

- **1985 - 1986 Eka Kemi** **Göteborg, Suède**
Ingénieur d'études.
Développement d'une nouvelle solution silicée blanche.

- **1984 NEYRTEC** **Grenoble**
Projet de fin d'étude d'IUT.
Projet Energie Thermique des Mers.

FORMATION

- **2003 Université Joseph Fourier**
HDR : Contribution à l'étude des processus atmosphériques de méso-échelle en zone de relief marqué.

- **1988-1991 Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes**
Doctorat : Simulation numérique des écoulements urbains à l'échelle d'une rue à l'aide d'un modèle k-ε (Très Honorable)

- **1987-1988 Ecole Nationale Supérieure de Mécanique, Nantes**
DEA Dynamique des Fluides et des Transferts : Modélisation numérique des écoulements turbulents à forte variation de masse volumique. (Très Bien)
Ingénieur spécialisé en Hydrodynamique naval avancée (Bien)

- **1984-1987 Université de Technologie de Compiègne**
Ingénieur Génie Chimique, Thermique et Energie

- **1982-1984 Institut Universitaire de Technologie, Grenoble I**
DUT Thermique et Energie

ENCADREMENT D'ETUDIANTS

- Thèses

Claude Guilbaud (Direction : J.P. Chollet, Codirection : S. Anquetin).

Etude des inversions thermiques : Application aux écoulements atmosphériques dans des vallées encaissées, Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, soutenue le 29 Mai 1996.

Fabien Miniscloux (Direction : J.D. Creutin, Codirection : S. Anquetin).

Précipitations orographiques et convectives en région Cévennes - Vivarais : Validation de simulations numériques par des données pluviométriques et radar, Thèse de l'INPG, soutenue le 21 Décembre 2001.

Eddy Yates (Direction : J.D. Creutin, Codirection : S. Anquetin).

Pluies orographiques : Processus physiques et Impacts hydrologiques, Thèse de l'INPG, soutenance prévue Automne 2005.

- Stages DEA « Climat et Physico-Chimie de l'Atmosphère »

David Grainger (Co-encadrement avec S. Cautenet, LAMP)

Paramétrisation fine des échanges microphysiques aux échelles d'une agglomération, Juin 1996.

Mathieu Leporini (Co-encadrement avec J.-M. Cohard, LTHE)

Signature des aérosols dans les systèmes convectifs orographiques, Juin 2001.

Sylvain Pialat (Co-encadrement avec G.-M. Saulnier)

Mise en place et évaluation de la campagne blanche de l'OHMCV, Juin 2001.

Eddy Yates (co-encadrement avec V. Ducrocq, CNRM)

Simulation et analyse hydrologique de l'épisode pluvieux du 6-7 octobre 2001, Juin 2002.

- Stages DEA « Mécanique des milieux géophysiques et environnement. »

Frank Eberl, Transport et évolution de la pollution photo-oxydante, Septembre 1995.

Nicolas Chabert, Simulations numériques de la dynamique atmosphérique locale à l'échelle du « Y » Grenoblois, Juin 1996.

Marie Rousselot (Co-encadrement avec G.-M. Saulnier, LTHE)

Risque de crue éclair en région Cévennes Vivarais, *Septembre 2001*.

▪ Stages DEA « Mécanique des Fluides et des Transferts. »

Lionel Bouvier, Etude du transport vertical et du mélange sur le cycle nyctéméral d'une couche limite atmosphérique. *Septembre 1999*.

▪ Stages DEA « Mécanique Energétique » Aix-Marseille I

Elsa Real (Co-direction : J. Thielen del Pozzo, JRC, ISPRA, Italie). Modélisation hydrométéorologique des phénomènes de crues éclair dans la région Cévennes à l'aide du modèle hydrologique LISFLOOD. *Septembre 2003*.

▪ Stages de 2ème Cycle.

Sébastien Dumont et Frédéric Gruffaz, 1ère année ENSHMG, Projet Entreprendre. Etude de la Climatologie Grenobloise, *Juin 1993*.

Philippe Llusia et Jean-Bernard Escoufier, 1ère année ENSHMG, Projet Entreprendre. Etude de la faisabilité d'une campagne de mesures sur la région Grenobloise, *Juin 1993*.

Bertrand Daval, Stage de recherche en Maîtrise de Mécanique.

Introduction de l'orthogonalité aux parois dans un mailleur elliptique, *Mai 1994*.

Gérald Cognon, Stage de recherche en Maîtrise de Mécanique.

Simulations numériques des ondes déferlantes au-dessus de reliefs théoriques, *Juin 1996*.

Ombeline Meric et Jérôme Miguet, 1ère année de magistère de Mécanique, Stage d'initiation à la recherche sur toute l'année scolaire. Impact des flux d'évaporation sur le développement d'une couche limite atmosphérique. *Juin 1999*.

Lionel Bouvier, Projet de fin d'études ENSHMG. Simulation numérique de la couche limite atmosphérique : L'expérience de Wangara, *Juin 1999*.

Marie Rouselot, Projet de fin d'études ENSHMG (co-direction avec G.-M. Saulnier) Etude du transfert pluie-débit par fonction de transfert géomorphologique sur le bassin du Gardon d'Anduze, *Juin 2001*.

Noëlla Clerc et Yann Dufournet, Maîtrise Sciences de la Terre et de l'Univers, Université Joseph Fourier, Grenoble I. Mémoire bibliographique : Les pluies orographiques. Mécanismes et impacts hydrologiques, *Juin 2002*

Loïc Mathon et Samuel Lesbros, Magistère de Mécanique, Université Joseph Fourier, Grenoble I. Influence de paramètres dynamiques et thermodynamiques sur la répartition des précipitations dans le massif des Cévennes. Juin **2003**.

ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT

- **1991, INTECHMER, CNAM Cherbourg**

Cours d'Eléments d'hydrodynamique océanique, niveau IUT.

- **1991-1992, Ecole Centrale de Nantes**

TD et TP en Mécanique des Fluides en 1ère et 2ème année Ingénieur.

TD en Couche limite en 2ème, 3ème année et DEA Dynamique des Fluides et des Transferts.

TP « Aspects phénoménologiques de la turbulence » en 3ème année.

Cours de Fortran en DEA Dynamique des Fluides et des Transferts.

TD « Géophysique » DEA Dynamique des Fluides et des Transferts.

- **Depuis 1993, Université Joseph Fourier - UFR Mécanique, Grenoble.**

Cours « Dynamique de l'atmosphère », Maîtrise de Mécanique.

- **Depuis 2000, Université Joseph Fourier - Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble**

Cours « Éléments d'hydrométéorologie », Maîtrise Science de la Terre et Univers.

Cours « Mesure et simulation de la pollution atmosphérique à l'échelle urbaine.

Impacts sanitaires ». Module thèse de l'école doctorale Terre Univers Environnement.

- **Depuis 2002, Institut National Polytechnique de Grenoble, Filière Transversale « Procédés Industriels et Management Environnemental »**

Cours et TP Rejets dans l'air et impacts.

- **1998 et 2001, Ecole Le Louvarou, Haute Jarrie**

Animation et mise en place d'une mini station météo, Classe de Grande Section Maternelle, CE₁ et CE₂.

ADMINISTRATION DE L'ENSEIGNEMENT

- Depuis **Septembre 2003**, **Université Joseph Fourier - Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble**

Coreponsable du Master Recherche « Terre, Univers, Environnement » avec Anne Paul (LGIT, Grenoble).

Responsable de la filière « Océan, Atmosphère, Hydrologie » du Master Recherche.

ANIMATION DE LA RECHERCHE

- **Comité d'organisation** de l'**European Research Course on Atmosphere (ERCA)** depuis juin 1995. Cette école européenne est dirigée et coordonnée par Pr. Claude BOUTRON (LGGE)
- Membre élue au **Conseil du Laboratoire (LEGI** jusqu'à Décembre 1998), représentante du collège B.
- **Membre du jury** 1998/1999 et 2001/2002 du DEA Climat et Physico Chimie de l'Atmosphère.
- Participation à la mise en place de la plate-forme **MIRAGE** (MésO - Informatique Répartie pour des Applications en Géophysique et Environnement) coordonnée par Eric BLAYO (LMC) et financée en partie par le COMI (CNRS) et le Ministère de l'Education nationale.
- Co-animation avec Isabelle BRAUD de l'axe transversal **AMHyE** (Atelier de Modélisation Hydrologique et Environnementale) du LTHE depuis septembre 2000.
- Membre élue à la **commission recherche de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble (OSUG)**, représentante du collège B.
- Responsable de l'axe « **Modélisation** » dans le cadre de l'Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes - Vivarais (OHMCV)

- **Organisation** de l'Atelier de Modélisation de l'Atmosphère, « *Atelier de couplage des modèles atmosphériques et hydrologiques* », 3 - 5 décembre 2001, Météo-France, Toulouse.

- **Animations des projets scientifiques :**

1/ Transport et Mélange dans les vallées alpines.

Soutient du PATOM en 1999, 40 kFr. Ce projet associe les compétences complémentaires et pluridisciplinaires de l'équipe Métaux Lourds du LGGE (C. Boutron, C. Ferrari, A. Veysseyre), l'équipe Turbulence du LEGI (C. Staquet, J.P. Chollet), et moi-même au LTHE.

2/ Précipitations orographiques : Simulation et validation.

Soutient du PATOM en 2000, 20 kFr. et en 2001 : 40 kFr. Projet coopératif associant le CNRM (V. Ducrocq, P. Bougeault, D. Ricard), le LA (E. Richard, J.P. Pinty), et le LTHE (J.D. Creutin, J.M. Cohard, F. Miniscloux, et moi-même).

3/ Précipitation et cycle continental de l'eau : modélisation couplée.

Soutient du PNRH, en 1998 : 15 kFr. ; en 1999 : 150 kFr. et en 2001 : 100 kFr. Projet coopératif associant le CNRM (V. Ducrocq, D. Ricard), le LA (E. Richard, J.M. Cohard, S. Cosma, J.P. Pinty), et le LTHE (J.D. Creutin, F. Miniscloux, et moi-même).

4/ Risque de crue-éclair en région Cévennes - Vivarais.

Soutient, en 2002, du PNRH 8 k€ et du PATOM 14 k€. Projet coopératif associant le CNRM (V. Ducrocq, L. Labatut), le LaMP (C. Duroure, A. Flossmann, Y. Pointin, W. Wobrocq) et le LTHE (J.-D. Creutin, F. Cazenave, G. Delrieu, M. Gosset, C. Obled, G.-M. Saulnier et moi-même)

5/ Retour de l'expérience hydrométéorologique. Episode du 8 et 9 septembre 2003.

Soutien, en 2003, du PATOM 12 k€. Projet coopératif associant le CNRM (P. Arbogast, V. Ducrocq, F. Habets, L. Labatut), le LaMP (C. Duroure, A. Flossmann, Y. Pointin, W. Wobrocq), le LA (E. Richard), le LGIT (A. Walpersdorf), le LCPC (H. Andrieu) et le LTHE (G. Delrieu, M. Estève, M. Gosset, C. Obled, G.-M. Saulnier et moi-même)

6/ Risque de crues éclairs en région Cévennes - Vivarais. Observation et modélisation couplée atmosphère - hydrologie.

Demande, au programme ECCO-PNRH 2003, 21 k€. Projet coopératif associant le CNRM (F. Boutier, V. Ducrocq, F. Habets, L. Labatut, J. Noilhan), le LaMP (W. Wobrocq), le LGIT (A. Walpersdorf), le LCPC (H. Andrieu) et le LTHE (J.-M. Cohard, G. Delrieu, J.M. Lapetite, M. Gosset, C. Messenger, C. Obled, M. Ricard, G.-M. Saulnier et moi-même)

▪ **Reviewer** au :

- + Journal of Applied Meteorology.
- + Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics.
- + Experiments in Fluids
- + International Journal of Heat and Mass Transfer
- + Atmospheric Environment

PARTICIPATION JURY DE THESES

- **Thibault Penelon**, Simulations météorologiques sur site rural à topographie non plane par emboîtement de domaines avec le modèle SUBMESO. Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes et de l'Université de Nantes. Directeurs de thèse : I. Calmet et P. Mestayer. Juin 2002. Examineur.
- **Saïd Benjeddou**. Simulation numérique directe des gas fortement chauffés et approximation polytropic. Thèse de l'Université Aix-Marseille II. Directeur de thèse : C. Rey. Septembre 2003. Rapporteur.

LOGICIELS

Valorisation du logiciel CHENSI.3 dans le cadre d'une convention interne du Laboratoire de Mécanique des Fluides, UMR 6598, CNRS et Ecole Centrale de Nantes.

LISTE COMPLETE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATION

PUBLICATIONS DANS UNE REVUE A COMITE DE LECTURE

- Delaunay D. - S. Lévi Alvarès (now Anquetin), 1991, Modélisation de la diffusion des polluants en milieu bâti. Etat de l'art et perspectives, *Pollution Atmosphérique*, 124, 440-444.
- Lévi Alvarès S. (now Anquetin) and J.F. Sini, 1992, Simulation of diffusion within an urban street canyon with a k- ϵ model, *J. of Wind Engineering*, 52, 114-119.
- Lakehal, D., Mestayer, P.G., Edson, J.B., Anquetin, S., Sini, J.F., 1995, Eulero- Lagrangian simulations of atmospheric hydrometeor trajectories and impacts inside the urban canopy, *Atmospheric Environment*, 29, 23, pp 3501-3617.
- Edson, J.B., Anquetin, S., Mestayer, P.G. and Sini, J.F., 1996, Spray droplet modeling II : a combined Eulero-Lagrangian model, *J. Geophys Res.-Oceans*, 101, pp 1279-1293.
- Sini, J.F., Anquetin, S., Mestayer, P., 1996, Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons, *Atmospheric Environment*, 30, 15, pp 2659-2677.
- Anquetin, S., Guilbaud, C., Chollet, J.P., 1998, The formation and destruction of inversion layers within a deep valley, *J. of Appli. Meteo*, 37, 12, 1547-1560.
- Anquetin, S., Guilbaud, C., Chollet, J.P., 1999, Thermal valley inversion impact on the dispersion of a passive pollutant in a complex mountainous area, *Atm. Environment*, 33, 3953-3959.
- Miniscloux, F., J.D. Creutin and S. Anquetin, 2001, Geostatistical analysis of orographic rainbands. *J. of Applied Meteor.*, 40, 11, 1835-1854..

- **Anquetin, S., J.M. F. Miniscloux, J.-D. Creutin, and S. Cosma, 2003**, Numerical simulation of orographic rainbands, *J. of Geophysical Research*, 108(D8), 8386, doi:10.1029/2002JD001593.
- Yates E., S. **Anquetin**, J.D. Creutin, V. Ducrocq, K. Chancibault, **2003**, Hydrological validation of forecasted precipitation fields, soumis au *J. of Hydrometeorology*.

PUBLICATIONS DANS UNE REVUE SANS COMITE DE LECTURE

- Mestayer P.G., J.F. Sini, C. Rey, S. **Anquetin**, S.M. Badri Kusuma, D. Lakehal, **1993**, Pollutant dispersion in the urban atmosphere : Simulation of turbulent flows using a k- ϵ model, *ERCOFTAC bulletin*, **16**, 22-28.
- Chollet J.P. and S. **Anquetin**, **1993**, Large eddy simulations of atmospheric flows, *ERCOFTAC bulletin*, **16**, 9-10.
- Sini, J.F., **Anquetin, S., Mestayer, P.G., 1995**, Incursion et dispersion d'un nuage de polluant dans une rue canyon, *Pollution atmosphérique à l'échelle locale et régionale*, ADEME, Edité par J. Fontan, C. Elichegaray, J. Laterasse et M. Muller, pp 123-134.
- **Anquetin, S., Chollet, J.P. et Guilbaud, C., 1995**, Transport et Evolution de pollution sur l'agglomération Grenobloise, *Pollution atmosphérique à l'échelle locale et régionale*, ADEME, Edité par J. Fontan, C. Elichegaray, J. Laterasse et M. Muller, pp 99-108.
- **Anquetin, S., V. Ducrocq, G.-M. Saulnier et D. Ricard, 2002**, Simulation à haute résolution des épisodes convectifs et impacts hydrologiques sur la région Cévennes - Vivarais. Variation climatique et hydrologique. *La Houille Blanche*.

OUVRAGES

- Guilbaud C., S. **Anquetin**, J.P. Chollet, **1994**, Transport and Evolution of Urban Pollution in Deep Valleys, *AIR POLLUTION II*, Ed. Computational Mechanics Publications, **2**, 243-250.

- Mestayer P.G. and S. **Anquetin**, 1995, Climatology of cities, *Diffusion and transport of pollutants in atmospheric mesoscale flow fields*, Atmospheric Science Library, Kluwer Academic Publishers, F.-S. Rys and A. Gyr editors, pp 165-189.
- Guilbaud C., S. **Anquetin**, J.P. Chollet, 1995, Evolution of the inversion layers during the diurnal cycle and its effect on the pollutant dispersion in real valley, *AIR POLLUTION III*, Ed. Computational Mechanics Publications, 2, 243-250.
- Machado da Silva, L., **Anquetin**, S., Chollet, J.P., 1997, Dispersion of passive pollutant above urban areas in mountainous region, , *AIR POLLUTION IV*, Ed. Computational Mechanics Publications, 2, 667-675.
- Guilbaud, C., Chollet, J.P., **Anquetin**, S., 1997, Large eddy simulations of stratified atmospheric flows within a deep valley, *Direct and Large Eddy Simulation II*, ed. Chollet, Kleiser & Voke, ERCOFTAC series, Kluwer academic publishers, pp 157-166.

COMMUNICATIONS, ACTES A DIFFUSION PUBLIQUE

- **Lévi Alvarès** S. (now Anquetin) and C. Rey, 1989, On the modelling of non Boussinesq flows, *Euromech 249, Plumes and Turbulent jet diffusion flames in the atmosphere*, Madrid 22-25 mai 1989.
- Mestayer, P.G., J.F. Sini, S. **Lévi Alvarès** (now Anquetin), C. Rey, A. Abdelquari, J. Edson, 1990, Numerical Modelling of Diffusion in Urban Canopy, *A.M.S. - 9th Symposium on Turbulence and Diffusion*, April 29 - May 3 1990, Roskilde, Denmark.
- **Lévi Alvarès** S. (now Anquetin), J.F. Sini, C.X. Zhang, C. Sacré, 1990, Numerical predictions of turbulent recirculating flows, *A.M.S. - 9th Symposium on Turbulence and Diffusion*, April 29 - May 3 1990, Roskilde, Denmark.
- Ramirez-Leon H., J.F. Sini, C. Rey, and S. **Lévi Alvarès** (now Anquetin), 1991, A new second moment closure model for variable density turbulent heated flows, 13th Congress of Applied Mechanics, University of Manitoba, Canada.

- **Lévi Alvarès S.** (now Anquetin), J.F. Sini, **1991**, A $k-\varepsilon$ model simulation of diffusion within an urban street canyon, *Euromech 276, Large Facilities Workshop, Dynamics of the Atmosphere*, Nantes, 21-22 Oct. 1991.

- **Lévi Alvarès S.** (now Anquetin), J.F. Sini, **1992**, Simulation of diffusion within an urban street canyon with a $k-\varepsilon$ model, *First International Symposium on Computational Wind Engineering*, Tokyo August 21-23.

- **Lévi Alvarès S.** (now Anquetin), J.P. Chollet, J.F. Sini, **1992**, Simulation numérique des écoulements atmosphériques urbains, *Atelier de Modélisation de l'Atmosphère*, Toulouse 1-2 Décembre.

- Mestayer P.G. and S. **Anquetin**, **1993**, Climatology of cities, *ERCOFTAC Summer school diffusion and transport of pollutants in atmospheric mesoscale flow fields*, August - Manno - Switzerland.

- **Anquetin S.**, C. Guilbaud, J.P. Chollet, **1994**, Stratified flows in urban scale atmospheres, *E.G.S., XIX General Assembly*, Grenoble 25-29 April.

- **Anquetin S.**, C. Guilbaud, J.P. Chollet, **1994**, Stratified flows in urban scale atmospheres, *4th International Symposium on STRATIFIED FLOWS*, Grenoble June 29 - July 2.

- Guilbaud C., S. **Anquetin**, J.P. Chollet, **1994**, Transport and Evolution of Urban Pollution in Deep Valleys, *2d International Conference AIR POLLUTION*, Barcelona, September 27-29.

- Guilbaud C., S. **Anquetin**, J.P. Chollet, **1995**, Evolution of the inversion layer and pollutant dispersion in real valley, *3d International Conference AIR POLLUTION*, Porto Carras, September 26-29.

- **Anquetin S.**, C. Guilbaud, J.P. Chollet, **1995**, Mécanismes responsables de la formation et de la destruction des couches d'inversion dans les vallées encaissées, *Atelier de modélisation de l'atmosphère*, Toulouse 28-30 Novembre.

- **Anquetin, S., Guilbaud, C., Chollet, J.P., 1996**, Dispersion of an urban passive pollutant in complex mountainous area, *International Conference on Urban Climatology*, Essen 10-14 June.
- **Anquetin, S., Bonneton, P., 1996**, Turbulent structure within the breaking lee waves over three-dimensional topography, *Euromech, 6th European Turbulence Conference*, Lausanne, July 2-5.
- Machado da Silva, L., **Anquetin, S., Chollet, J.P., 1996**, Dispersion of a passive pollutant above urban areas in mountainous regions, *4th International Conference AIR POLLUTION*, Toulouse, August 28-30.
- Chollet, J.P., Guilbaud, C., **Anquetin, S., 1996**, Large Eddy Simulation of stratified flow within a deep valley, *2d ERCOFTAC workshop on Direct and Large Eddy Simulation*, Grenoble, September 16-19.
- **Anquetin, S., Guilbaud, C., Chollet, J.P., 1997**, Characteristic scales of the inversion layers within deep valley, *12th Symposium on Boundary Layer and Turbulence*, Vancouver July 28th-August 1st.
- Machado da Silva, **Anquetin, S., Chollet, J.P., 1997**, Tracer dispersion on urban area in valley, *5th International Conference AIR POLLUTION*, Bologna, September 16-18.
- **Anquetin, S., Chollet, J.P., Coppalle, A., Mestayer, P.G., Sini, J.F., 1998**, The urban atmosphere code SUBMESO, *EUROTRAC 2, Symposium 98*, Garmish March 23-27.
- **Anquetin, S., Chollet, J.P., 1998**, Thermal inversion impacts of the mixing properties of the low atmosphere within a deep valley, *E.G.S.*, Nice April 20-24.
- Chollet, J.P., **Anquetin, S., Machado da Silva, L., 1998**, Atmospheric flows in valleys, *International Conference on Air pollution modelling and simulation*, Champ-sur-Marne, October 26-29.

- Miniscloux, F., Creutin, J.D., **Anquetin**, S., Richard, E., **1998**, Analyse du renforcement des précipitations par le relief. L'épisode cévenol du 14 Novembre 1986, *Atelier de Modélisation de l'Atmosphère*, Toulouse, 8-9 Décembre.

- Miniscloux, F., Creutin, J.D., **Anquetin** S., **2000**, Non stationarity in orographic rain fields : a Lagrangian analysis of weather radar pictures, *E.G.S.* , Nice April 24-28.

- **Anquetin** S., Cohard J.M., Cosma S., Creutin J.D., Miniscloux F., Pinty J.P., Richard E., **2000**, Précipitations orographiques cévenoles : observation radar et modélisation, Colloque du PNRH, Toulouse 16-17 Mai.

- **Anquetin** S., Cohard J.M., Miniscloux F., Creutin J.D., Cosma S., Pinty J.P., Richard E., Observation and numerical simulation of rain bands over complex topography, 7th International Conference on Precipitation, Samoset Resort, Maine, June 30 - July 3, **2001**.

- Yates E., **S. Anquetin**, J.D. Creutin, Towards an hydrological qualification of the simulated rainfall in mountainous area, International Conference on Alpine Meteorology and MAP-Meeting, Brig, May 19 to 23, 2003.

- Walpersdorf A., H. Brenot, C. Champollion, E. Doerflinger, F. Masson, V. Ducrocq, **S. Anquetin**, P. Tabary, 2003, GPS project for tropospheric water vapour observations related to torrential rain in the French Cévennes : Description and first results of the field experiment, *EGS*, Nice, 7 - 11 April **2003**.

- Champollion C., F. Masson, J. Van Baelen, **S. Anquetin**, A. Walpersdorf, J. Chéry and O. Bock, GPS observation of the September 9th 2002 torrential rainfall in southern France (Gard - Cévennes), *EGS*, Nice, 7 - 11 April **2003**.

- Ducrocq V., K. Chancibault, F. Habets, **S. Anquetin**, High Resolution Numerical Prediction of the 2002 Gard extreme Flash-Flood : Sensitivity to initial conditions and surface conditions, *Mediterranean Storms V*, *EGS-Plinius Conference*, Ajaccio, 1-3 octobre **2003**.

COMMUNICATIONS, ACTES A DIFFUSION RESTREINTE

- Sini J.F., S. Anquetin and P.G. Mestayer, 1993, Ecoulements et diffusion dans une rue canyon, *Colloque Pollution Atmosphérique à l'Echelle Locale et Régionale*, Cachan 7-9 Décembre.
- Anquetin S., J.P. Chollet and C. Guilbaud, 1993, Transport et évolution de pollution sur l'agglomération Grenobloise, *Colloque Pollution Atmosphérique à l'Echelle Locale et Régionale*, Cachan 7-9 Décembre.
- Anquetin S., C. Guilbaud, J.P. Chollet, 1996, Simulation de la dynamique atmosphérique à l'échelle d'agglomération, formation et destruction des couches d'inversion dans les vallées encaissées, *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement, Les journées du programme Environnement, vie et sociétés*, Paris 15-17 Janvier.

THESES, RAPPORT DE STAGES ET DE DEA

- Lévi Alvarès S. (now Anquetin), 1991, Simulation numérique des écoulements urbains à l'échelle d'une rue à l'aide d'un modèle $k-\varepsilon$, *Thèse de l'Université de Nantes et de l'Ecole Centrale de Nantes*.
- Lévi Alvarès S., 1988, Modélisation numérique des écoulements turbulents à forte variation de masse volumique, DEA Dynamique des Fluides et des Transferts, Ecole Nationale Supérieure de Mécanique, Nantes.
- Lévi Alvarès S. and J. Boisvert, 1987, A new gas chromatography sampling station, Report n°8709 Cabot Corporation, Billerica, MA, USA.
- Lévi Alvarès S. and B. Larson, 1986, Development of a new silica sol, EKA KEMI, Göteborg, Sweden.

CONFERENCES INVITEES

▪ **Anquetin, S.**, Formation and destruction of the inversion layers within polluted deep valleys. *4th European Research Course on Atmospheres, Climate and Atmospheric Physics and Chemistry*, Grenoble January 8 - February 7, **1996**.

▪ **Anquetin, S.**, The GdR SUBMESO, Urban Atmosphere at Submeso scales, CNRS 1102. *University of Oklahoma, Center for Analysis and Prediction of Storms*, Norman, **July 1997**.

MEMOIRES DE THESE, DEA, STAGES ENCADRES

Thèses :

▪ Claude GUILBAUD, 1996, Etude des inversions thermiques : Application aux écoulements atmosphériques dans des vallées encaissées, *Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble*.

▪ Fabien MINISCLOUX, 2001, Précipitations orographiques et convectives en région Cévennes - Vivarais : Validation de simulations numériques par des données pluviométriques et radar. *Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble*.

DEA :

▪ Frank EBERL, 1995, Couplage chimie - dynamique dans un modèle atmosphérique, *DEA « Mécanique des milieux géophysiques et environnement » Université Joseph Fourier, Grenoble I*.

▪ David GRAINGER, 1996, Paramétrisation fine des échanges microphysiques aux échelles d'une agglomération, *DEA « Climat et Physico-Chimie de l'Atmosphère » Université Joseph Fourier, Grenoble I*.

▪ Nicolas CHABERT, 1996, Simulations numériques de la dynamique atmosphérique locale à l'échelle du « Y » Grenoblois, *DEA « Mécanique des milieux géophysiques et environnement » Université Joseph Fourier*.

▪ Lionel BOUVIER, 1999, Evolution diurne de la couche limite atmosphérique, *DEA « Mécanique des Fluides et des Transferts » Institut National Polytechnique Grenoble*.

- Mathieu LEPORINI, 2001, Signature des aérosols dans les systèmes convectifs orographiques, *DEA « Climat et Physico-Chimie de l'Atmosphère »* Université Joseph Fourier, Grenoble I.
- Sylvain PIALAT, 2001, Mise en place et évaluation de la campagne blanche de l'OHMCV, *DEA « Climat et Physico-Chimie de l'Atmosphère »* Université Joseph Fourier, Grenoble I.
- Marie ROUSSELOT, 2001, Risque de crue éclair en région Cévennes Vivarais, *DEA « Mécanique des milieux géophysiques et environnement »* Université Joseph Fourier.
- Eddy YATES, 2002, Simulation et analyse hydrologique de l'épisode pluvieux du 6-7 octobre 2001, *DEA « Climat et Physico-Chimie de l'Atmosphère »* Université Joseph Fourier, Grenoble I.

Stages de 2ème cycle :

- Philippe LLUSIA et Jean-Bernard ESCOUFIER, 1993, Etude de la faisabilité d'une campagne de mesures sur l'agglomération grenobloise, *Activité Entreprendre, ENSHMG.*
- Sébastien DUMONT et Frédéric GRUFFAZ, 1993, Éléments de la climatologie grenobloise, *Activité Entreprendre, ENSHMG.*
- Lionel BOUVIER, 1999, Simulation numérique de la couche limite atmosphérique : L'expérience de Wangara, *Projet de fin d'études ENSHMG.*
- Ombeline MERIC et Jérôme MIGUET, 1999, Etude de l'influence de l'humidité sur la couche limite atmosphérique à partir du modèle SUBMESO, *Licence de Mécanique - Magistère 1ère année.*
- Marie ROUSSELOT, 2001, Etude du transfert pluie - débit par fonction de transfert géomorphologique sur le bassin du Gardon d'Anduze, *Projet de fin d'études ENSHMG.*
- Noëlla CLERC et Yann DUFOURNET, 2002, Mémoire bibliographique : Les pluies orographiques. Mécanismes et impacts hydrologiques, *Maîtrise Sciences de la Terre et de l'Univers, Université Joseph Fourier, Grenoble I.*

