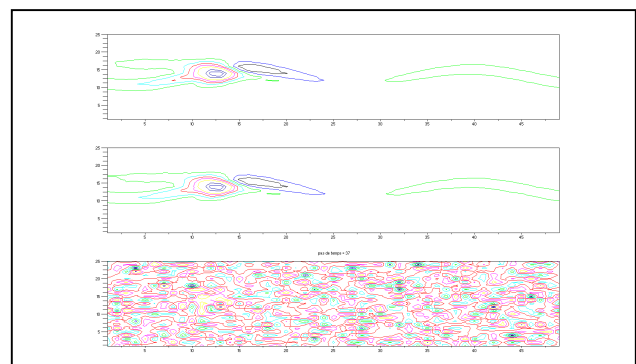
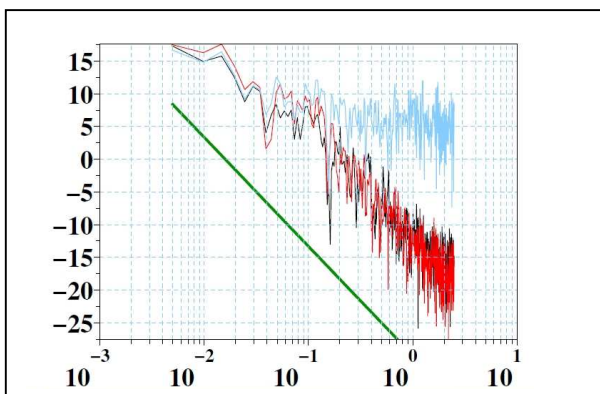


**ENCADRÉS SCIENTIFIQUES**  
**de l'unité de recherche**  
**GMEI**

## GMEI-1 Estimation non-linéaire stochastique pour le filtrage de mesures turbulentes et l'assimilation de données géophysiques.

L'estimation non-linéaire stochastique permet de traiter des systèmes aléatoires ou contenant des erreurs aléatoires sortant du cadre linéaire ou Gaussien. Ces techniques innovantes sont adaptées à la plupart des questions d'apprentissage ou de filtrage séquentiel mais nécessitent une formalisation probabiliste des problèmes. Nous avons mis en œuvre les outils théoriques pour traiter le cas particulier des mesures ponctuelles réalisées au sol pour des écoulements atmosphériques turbulents. Nous avons alors démontré que les algorithmes, outre le filtrage des mesures, permettaient une estimation à haute cadence des grandeurs caractérisant la turbulence. Cette étude a été ensuite étendue au cadre de mesures réalisées en 2D par un LIDAR Doppler. Un démonstrateur sur données simulées a été développé. Nous avons alors élargi l'usage de ces techniques d'ingénierie stochastique au problème de l'assimilation de données. Dans ce cas, la difficulté portait sur la taille des systèmes à assimiler. Nous avons prouvé numériquement l'importance de la méthode de sélection d'état face à la dimension et montré que les sélections génétiques permettaient d'aller au delà du simple re-échantillonnage. Des premiers essais sur des modèles géophysiques simples ont été réalisés.



La figure de gauche montre un exemple de filtrage de mesures anémométriques réelles débruitées par notre algorithme. Les spectres de puissances montrés ici confirment que l'observation bruitée (en cyan) a été corrigée (en rouge) pour se confondre avec la réalité (en noir). On retrouve également la pente spectrale en  $-5/3$  typique de ces échelles de turbulence. A droite la figure illustre le problème d'assimilation appliqué à un modèle quasi-géostrophique à deux couches, avec en bas le tourbillon des observations perturbées, au milieu le tourbillon du champ filtré par un algorithme stochastique à sélection génétique approché par 100 particules et en haut la référence qu'il fallait retrouver. Ces deux exemples montrent la pertinence de ces techniques innovantes pour traiter des questions issues de la mécanique des fluides géophysiques. Nous allons dans les années qui viennent poursuivre les applications à des mesures in-situ, notamment en télédétection, et développer de nouvelles stratégies pour l'assimilation de données appliquée à des systèmes de très grandes dimensions.

### Références

- C. Baehr (2010): Nonlinear Filtering for observations on a random vector field along a random path. M2AN - ESAIM 2010, 44 (5), 921-945, DOI No: 10.1051/m2an/2010047
- C. Baehr and O. Pannekoucke (2009) : Some issues and results on the EnKF and particle filters for meteorological models. chapter in Chaotic Systems: Theory and Applications., 27-34. DOI No: 10.1142/9789814299725\_0004. C. H. Skiadas and I. Dimotikalis Ed. World Scientific
- C. Baehr (2008) : Modélisation probabiliste de la turbulence atmosphérique afin d'en filtrer la mesure par approche particulière, thèse de doctorat de l'Université de Toulouse III.

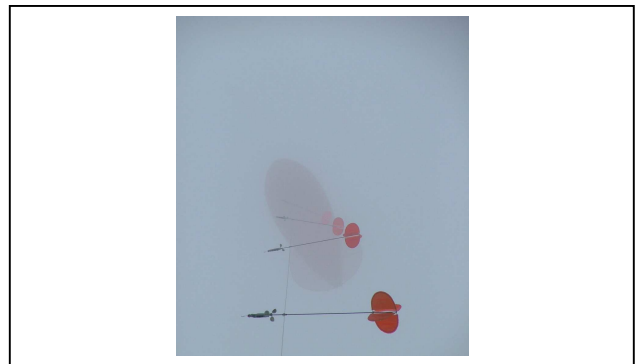
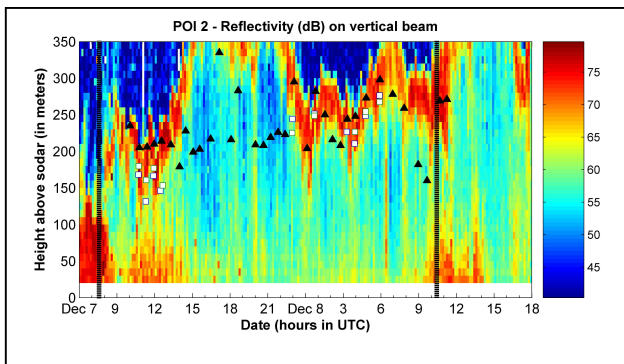
Phénomène difficile à prévoir, le brouillard constitue une gêne, voire un danger pour les activités de transports. Sur aéroport, sa présence réduit significativement la capacité des pistes et cause de nombreux et coûteux retards et annulations de vol.

Pour aider les acteurs du monde aérien à mieux tempérer les effets du brouillard, le CNRM/GAME a développé (en collaboration avec le Laboratoire d'Aérodologie) un modèle spécifique – COBEL-ISBA – déployé à Roissy-Charles de Gaulle depuis 2005.

En 2008-2009, une expérimentation a été conduite pour tester la capacité d'un sodar (télé-détection acoustique) à mesurer en temps réel l'épaisseur du brouillard. Elle a confirmé celle-ci. L'apport de cette information à la prévision du brouillard a ensuite été évalué : il est positif.

Parallèlement, le CNRM/GAME a conduit des travaux sur l'amélioration de l'assimilation du modèle en testant un filtre Kalman d'ensemble.

Enfin, le CNRM/GAME a apporté contribution à deux campagnes d'études du brouillard conduites par la communauté française : ParisFog and ToulouseFog dont les objectifs étaient de documenter sur une longue période l'ensemble des processus intervenant dans le cycle de vie du brouillard.



La figure de gauche est un « sodar-gramme » sur lequel est représenté (code couleur) l'intensité du signal acoustique détecté par le sodar de Roissy entre 7/12/2008 6UTC et le 08/12/ 2008 18UTC. Un brouillard s'est formé vers 8UTC le 7/12 et a persisté jusqu'au lendemain 10UTC. La ligne rouge de forte intensité à une altitude variant de 200 à plus de 350m signe le sommet de la couche de brouillard. Elle est bien corrélée avec les inversions (carrés blanc) mesurées par sondage sous ballon captif. Lorsque l'altitude maximale du sondage (triangle noir) demeure en deçà de cette ligne, le sondage ne détecte aucune inversion.

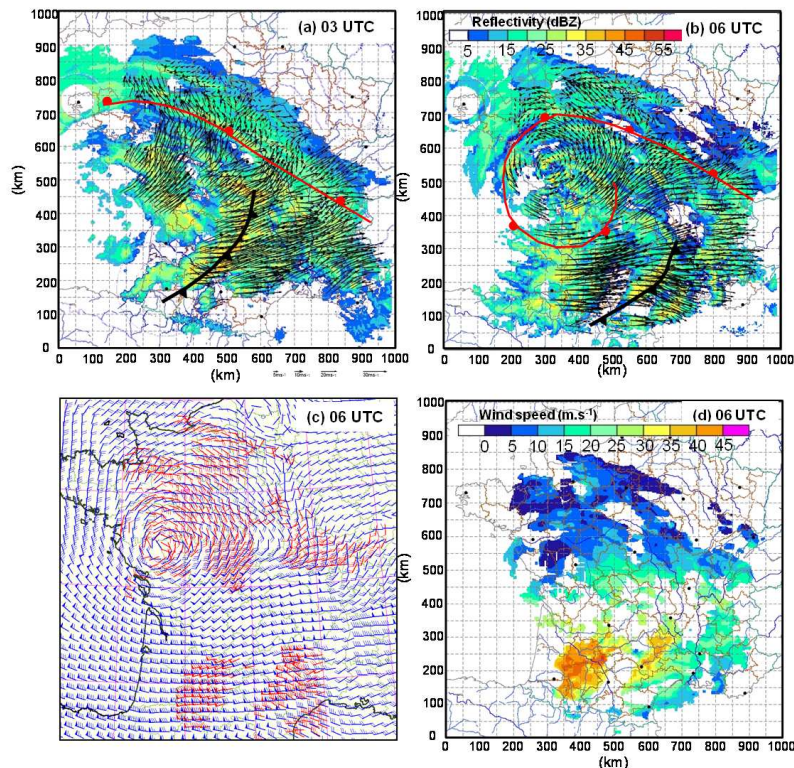
La figure de droite est une photo du ballon captif mis en place lors des épisodes de brouillard des campagnes ParisFog et ToulouseFog.

## Références

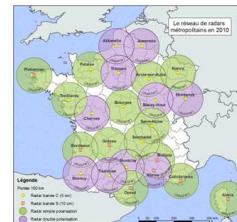
A. Dabas, S. Rémy, T. Bergot, 2011 : Use of a sodar to improve the forecast of fogs and low clouds on airports. *Pure and Applied Geophysics*. In Press.

## GMEI-3 Mise au point d'une mosaïque radar nationale de vents 3D et assimilation des vecteurs vents restitués dans le modèle AROME

La récente mise à niveau du réseau radar opérationnel français ARAMIS a permis le déploiement d'une nouvelle méthode de traitement Doppler autorisant la collecte simultanée de mesures de vitesse radiale et de réflectivité jusqu'à 250 km des radars. La disponibilité des mesures Doppler à longue portée a ouvert la voie à la mise en place d'une chaîne temps-réel de reconstruction des champs tridimensionnels du vecteur vent complet ( $u, v, w$ ) au sein des systèmes précipitants échantillonnés par les radars du réseau de Météo-France. Initialement testée sur la région parisienne, cette application a été progressivement étendue à d'autres régions jusqu'à couvrir désormais l'ensemble du territoire métropolitain. Les figures ci-dessous présentent des sorties de cette application obtenues lors du passage de la tempête Klaus, le 24 janvier 2009.



**Figure:** Champs de vent et de réflectivité 3D temps-réel obtenus le 24 janvier 2009 partir des 24 radars du réseau ARAMIS. (b) coupes horizontales des champs de vent horizontal (vecteurs) et de réflectivité à km d'altitude à 03:00 et 06:00 TU. (Vecteurs vent radar (rouges) et analyse (ALADIN, vecteurs bleus) le 24 janvier 06:00 TU à 1.5 km MSL. (d) force du vent 2km à 06:00 UTC. La position des fronts chaud et froid associés à la dépression est indiquée en (a) et (b). Le maximum de vent observé quelques dizaines de km au nord de Toulouse à 06 TU (d), avoisine 50 m/s. La résolution des champs de vent radar est de 2.5 km sur l'horizontale et 0.5 km sur verticale. La résolution temporelle est de 1 minutes. Ci-dessous la carte du réseau radar ARAMIS.



L'analyse des champs de vent reconstitués dans ce cadre purement opérationnel montre qu'il est possible d'obtenir des informations fiables, et potentiellement très utiles, sur la structure de l'écoulement au sein des systèmes précipitants et ce, quel que soit le type de système considéré. À cette mosaïque nationale, dont le passage à l'opérationnel est prévu courant 2012, viendront s'ajouter des analyses régionales à échelle plus fine (de l'ordre du km) dans les régions où le réseau est plus dense, permettant ainsi aux prévisionnistes de mieux anticiper l'évolution future des événements pluvieux suivis. Plus généralement, ces données pourront être utilisées aussi bien pour des applications de type recherche [études de cas, études statistiques, campagnes expérimentales (cf. projet HYMEX)], qu'opérationnelles (prévision immédiate, sécurisation de la navigation aérienne). Les jeux de données ainsi obtenus constituent également une base inestimable dans l'optique d'évaluer les vents et structures dynamiques de moyenne échelle prévus par les modèles numériques à haute résolution comme AROME ou MESO-NH. L'apport de l'assimilation des vecteurs vents horizontaux reconstitués sera également évalué prochainement sur quelques cas précis (par ex : les inondations de Draguignan en 2010).

### Références

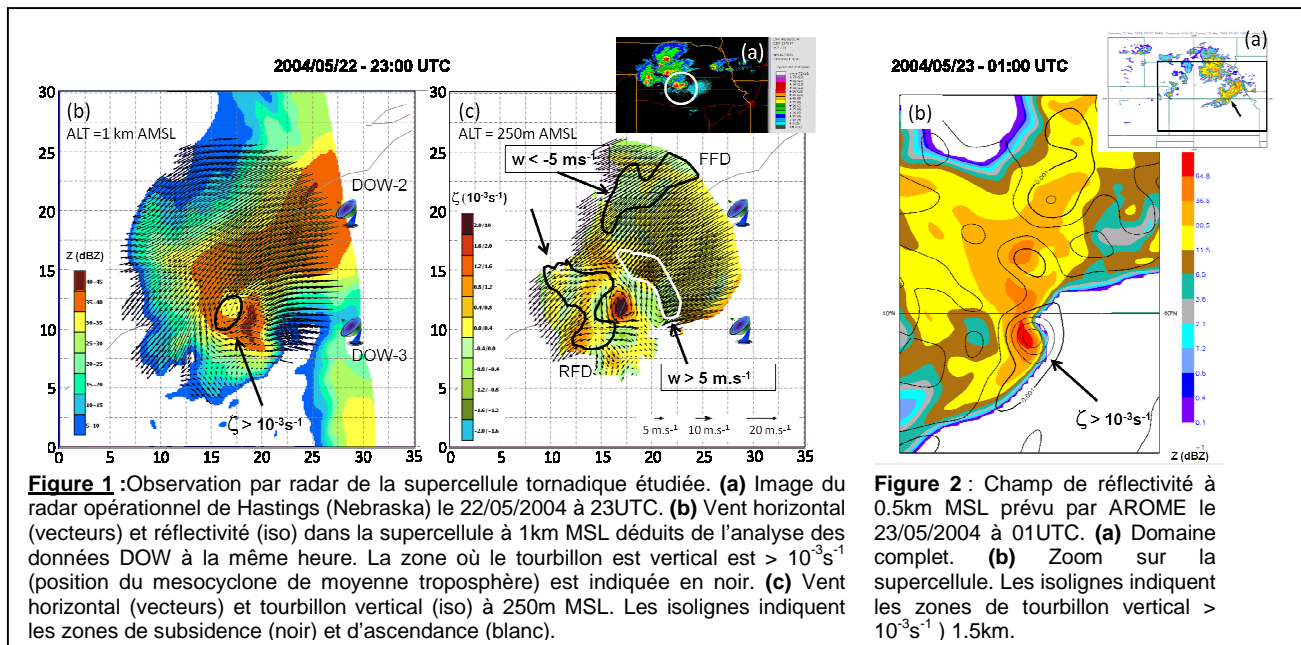
- Bousquet, O., A. Kergomard, P. Dupuy and P. Tabary, 2011: Real-time nation-wide production of a 3-d wind and reflectivity radar composite in France: science, engineering and applications. QJRM (soumis).
- Bousquet O., T. Montmerle, and P. Tabary, 2008: Using operationally synthesized multiple-Doppler winds for high resolution NWP model horizontal wind verification. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L10803, doi: 10.1029/2008GL033975
- Bousquet, O., P. Tabary, and J. Parent du Châtelet, 2008: Operational multiple-Doppler wind retrieval inferred from long range radar velocity measurements. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, **47**, 2929–2945. doi: 10.1175/2008JAMC1878.1
- Bousquet O., P. Tabary, and J. Parent du Châtelet, 2007: On the use of operationally synthesized multiple-Doppler wind fields. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L22813, doi: 10.1029/2007GL030464



## GMEI-4 Observations et simulations à haute résolution de super-cellules tornadiques

Les supercellules sont les orages les plus intenses et peuvent être à l'origine d'un phénomène particulièrement violent: la tornade. L'intérêt pour ces phénomènes a été exacerbé par la tornade dite « de Hautmont » (village du nord de la France ayant été partiellement détruit) d'août 2008. Son passage dévastateur associé à des vents violents (>370 km/h) a motivé des études visant à évaluer et améliorer la prévision de ce type de phénomène. Les modèles opérationnels n'ayant pas la capacité d'analyser explicitement les tornades, la prévision du risque d'orage tornadique repose actuellement sur des indices ad hoc basés sur les propriétés de l'environnement de grande échelle. Ces indices, calculés notamment à partir de la CAPE, ne permettent néanmoins pas d'identifier précisément les zones potentiellement impactées et sont, de plus, mal adaptés aux modèles de prévision non hydrostatiques tels qu'AROME dans lesquels la CAPE est explicitement consommée par les orages.

Le travail présenté ci-dessous vise à évaluer l'apport d'un modèle opérationnel à haute résolution pour la prévision du risque de tornade à partir d'études de processus basées sur l'observation d'une supercellule tornadique par radars Doppler. Les observations, collectées dans la région des Grandes Plaines d'Amérique du Nord par des radars de recherche mobiles à très haute résolution spatio-temporelle sont traitées afin d'accéder à la dynamique supercellulaire et étudier les mécanismes conduisant à la tornadogénèse. Des simulations numériques sont ensuite réalisées avec le modèle AROME en adaptation dynamique afin d'évaluer sa capacité à générer une organisation supercellulaire réaliste de la convection.

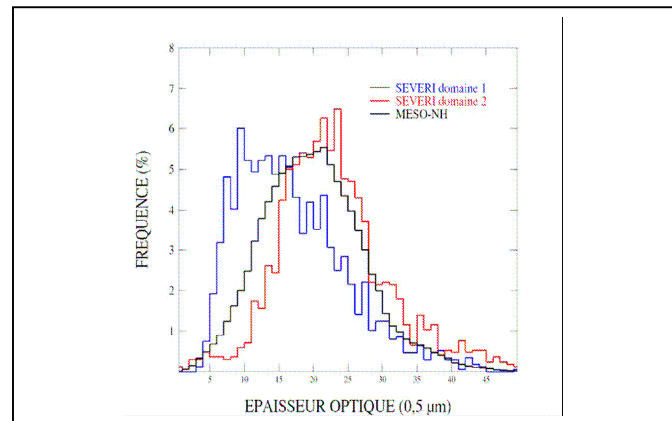
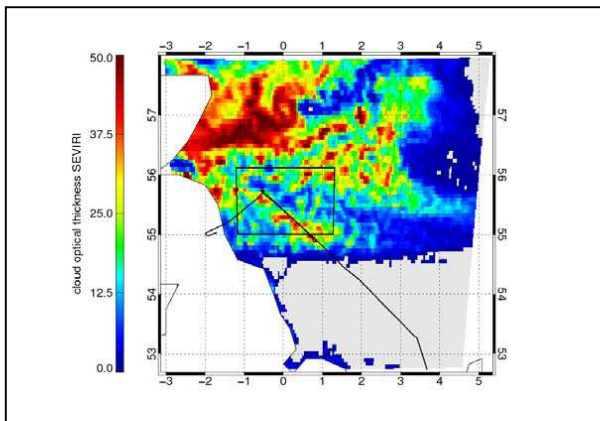


L'analyse des données radar a permis de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu en identifiant notamment les interactions entre les structures de petite et moyenne échelles pilotant le cycle de vie de la tornade. Les simulations numériques ont montré la capacité du modèle opérationnel AROME à reproduire le cycle de vie de l'orage observé avec réalisme, même si l'on note toutefois un léger décalage spatio-temporel vis à vis des observations (décalage pouvant vraisemblablement être corrigé en assimilant les observations radars). Le résultat le plus prometteur tient cependant à l'apparente capacité du modèle à générer des structures convectives cohérentes avec le schéma conceptuel de la supercellule (mésocyclone de moyenne troposphère, division cellulaire). Ce point suggère en effet que de nouveaux indices, mieux adaptés aux échelles résolues par ces modèles et prenant notamment en compte la dynamique supercellulaire, pourraient permettre d'améliorer considérablement la prévision du risque de supercellules et de tornades.

### Références

- Floutard A. and O. Bousquet, 2011: On the use of high resolution NWP system to improve tornado watches. En preparation (Geophys. Res. Lett.).  
Floutard A., 2010 : Prévision du risque d'occurrence de tornades avec le modèle AROME à partir d'études de processus basées sur des observations s radars. Stage de fin d'études IT IENM. 91pp

Les particules d'aérosol, plus spécifiquement les noyaux de condensation nuageuse ont un impact avéré sur la microphysique des nuages en modifiant la concentration des gouttelettes. Il a aussi été vérifié expérimentalement que ces modifications de la concentration de gouttelettes affectent les propriétés radiatives des nuages. Il est cependant très difficile de détecter un impact de ces changements de la microphysique sur l'étendue spatiale et la durée de vie des nuages, ce qui affecterait considérablement le système climatique. Cette problématique constituait un des objectifs majeurs des expériences EUCAARI (Kulmala et al., 2009) et VOCALS auxquelles a largement contribué le CNRM/GAME en participant aux campagnes de terrain, à l'analyse des données collectées et à leur interprétation dans un cadre de modélisation LES des phénomènes observés. La figure 1 montre le champ horizontal d'épaisseur optique mesuré par le radiomètre MODIS le 15 mai 2008 sur la mer du nord à l'est de la côte anglaise. Ce système nuageux a été échantillonné par l'ATR-42 de SAFIRE et la base de données a servi à initialiser le modèle Meso-NH. La distribution statistique des épaisseurs optiques simulées est comparée dans la figure 2 aux distributions statistiques calculées (i) sur un domaine restreint à la trajectoire de l'avion (domaine 1) et (ii) sur un domaine adjacent au nord est de la trajectoire dans lequel l'épaisseur optique est plus forte (domaine 2)



Ces bases de données ont aussi servi à étudier comment la structure verticale de la couche limite peut moduler l'impact de l'aérosol sur la dynamique nuageuse (Sandu et al. 2009) et à déterminer empiriquement les meilleures valeurs de paramètres à utiliser dans les paramétrisations bulk de la microphysique nuageuse (Geoffroy et al. 2010).

Dans les modèles de climat, l'effet indirect de l'aérosol est paramétré en utilisant un coefficient empirique qui relie le rayon volumique moyen des gouttelettes à leur rayon effectif. Des mesures in situ suggéraient que ce coefficient pouvait dépendre de la concentration de gouttelettes et que sa variation devait atténuer l'effet indirect de l'aérosol. Les bases de données ont été revisitées pour montrer qu'il s'agissait d'un artefact instrumental et une valeur précise de ce coefficient a été obtenue qui s'applique à tous les types de nuages de couche limite (Brenquier et al. 2011)

Ces travaux se poursuivent en se focalisant sur le cycle diurne des nuages de couche limite qui pourrait être un bon indicateur de l'impact des aérosols sur les nuages.

## Références

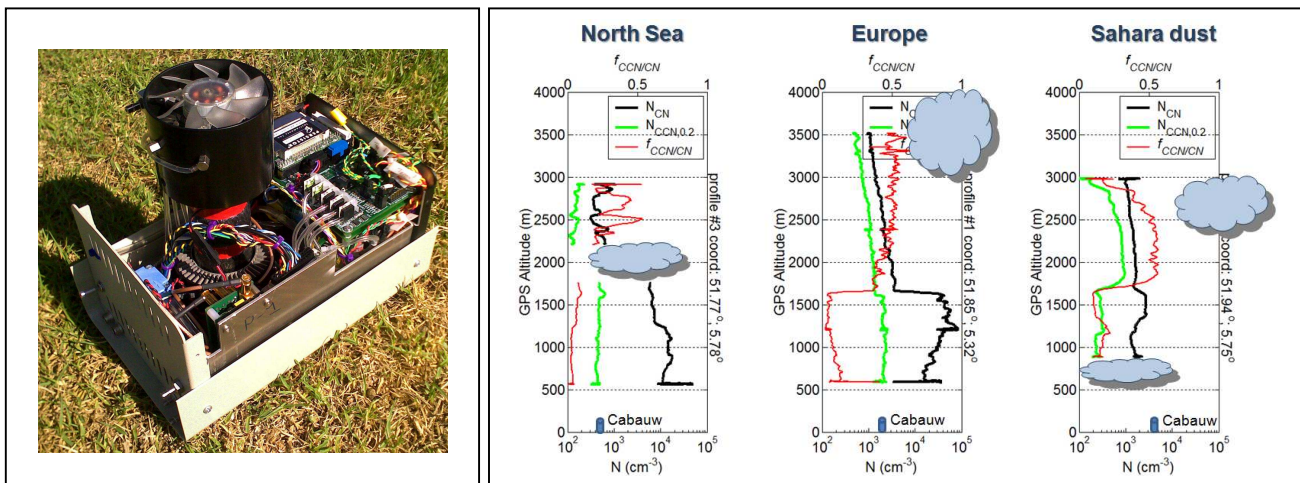
- Sandu, I., J. L. Brenquier, O. Thouron and B. Stevens, (2009), How important is the vertical structure for the representation of aerosol impacts on the diurnal cycle of marine stratocumulus? *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 4039-4052
- Geoffroy O., J.-L. Brenquier, and F. Burnet, 2010, Parametric representation of the cloud droplet spectra for LES warm bulk microphysical schemes, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 4835-4848, doi:10.5194/acp-10-4835-2010.
- Brenquier, J. L., F. Burnet, and O. Geoffroy, 2011: Cloud optical thickness and liquid water path. Does the k coefficient vary with droplet concentration? *Atmos. Chem. Phys. Discussion*.

## GMEI-6 Développement instrumental pour la microphysique des nuages et des aérosols

La caractérisation fine des propriétés des aérosols est essentielle pour aborder les thématiques liées à la qualité de l'air et aux interactions aérosol/nuage/rayonnement.

Le CNRM/GAME développe pour cela depuis 2005 la plate-forme aérosol de l'ATR-42 de SAFIRE, un dispositif complexe d'aspiration de l'aérosol atmosphérique placé en aval de la veine de prélèvement communautaire conçue au GMEI, et des instruments qui permettent sa caractérisation chimique (CNRS-LaMP et CNRS-LACE), optique et microphysique (GMEI). Cette plate-forme a été complétée dans le cadre de l'expérience EUCAARI par différents instruments (Dual-CCNC et DMA-CCNC) pour la mesure temps réel des propriétés hygroscopiques de l'aérosol sub-micronique, et néphélomètre multi longueur d'onde pour les propriétés optiques.

En particulier, un compteur de noyaux de condensation nuageux (CCN) à flux continu contrôlé en pression permettant une mesure plus précise à toutes les altitudes (photo de gauche) et un compteur à double colonne (Dual-CCNC) permettant la mesure simultanée des CCN à différentes valeurs de sursaturation, développés par G. Roberts venu de Scripps Institution of Oceanography renforcer l'équipe GMEI/MNPCA depuis 2008, constituent le dernier maillon de la plate-forme aéroportée.



La figure de droite indique en fonction de l'altitude les valeurs de concentration en nombre total de particules (noir) et en CCN à 0.2% de sursaturation (vert) mesurées dans trois masses d'air très différentes (marine issue de mer du Nord, pollution locale et transport de poussières du Sahara) échantillonnées par l'ATR-42 pendant l'expérience EUCAARI aux Pays-Bas. Le profil rouge est le rapport des deux. Les mesures de CCN réalisées au site sol de Cabauw sont indiquées sur l'axe des abscisses. La diversité des situations, avec des écarts d'un ordre de grandeur, et la variabilité observée entre les différentes couches d'aérosols montrent l'apport des mesures aéroportées pour étudier les interactions aérosols-nuages.

L'ATR-42 était à cette occasion le premier avion de recherche équipé à la fois pour la mesure de l'aérosol et la télédétection couplée lidar/radar du profil vertical de l'aérosol et des nuages (CNRS-LATMOS). Les profils d'extinction lidar mesurés simultanément sont actuellement examinés pour établir le lien avec ces mesures in situ.

### Références :

Crumeyroille S. : Impact des systèmes convectifs sur les propriétés hygroscopiques des aérosols: analyse de deux cas d'étude durant la campagne AMMA, thèse de l'université P. Sabatier, 2008.

Crumeyroille, S., H. E. Manninen, K. Selegri, G. Roberts, L. Gomes, M. Kulmala, R. Weigel, P. Laj, and A. Schwarzenboeck, New particle formation events measured onboard the ATR-42 aircraft during the EUCAARI campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 6721-6735, Doi:10.5194/acpd-10-9329-2010.

Roberts, G., D. Day, L. Russell, E. Dunlea, J. Jimenez, J. Tomlinson, D. Collins, Y. Shinozuka, and A. Clarke, Characterization of particle cloud droplet activity and composition in the free troposphere and the boundary layer during INTEX-B. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, p. 6627-6644, Doi:10.5194/acp-10-6627-2010.



Le CNRM-GAME, et plus particulièrement le GMEI, maintient, fait évoluer et met en œuvre un ensemble de moyens de mesures mobiles, facilement projetables sur le terrain. Ces moyens instrumentaux contribuent à la caractérisation du profil vertical de l'atmosphère et de la couche limite (stations de radiosondage, radar profileur de vent, télémètre de nuage, moyens de sondage par ballon captif) et à la documentation des échanges d'énergie entre la surface terrestre ou l'océan et l'atmosphère (stations sol, stations de mesure du bilan d'énergie à la surface par la méthode des corrélations turbulentes, scintillomètre) lors de campagnes de mesures de la communauté de durées de quelques mois jusqu'aux cycles annuels. Ces instruments bénéficient d'efforts particuliers sur les aspects énergie (instruments rendus autonomes) transmission de données par des solutions sans fil, et de développement de méthodes de traitement et validation des données. Le tableau ci-dessous illustre le plan de charge de ces 3 dernières années, avec notamment la mise en œuvre de mesures de flux turbulents sur le navire Antea lors de la campagne Gogasmos, réalisée en 2009 dans le Golfe de Gascogne en collaboration avec la DT-INSU et le LATMOS.



Les principaux type de campagnes réalisées concernent les surfaces continentales (en vert), l'interface océan – atmosphère, (en bleu), la prévision du brouillard, les activités en lien avec l'aéronautique (en gris) et la couche limite (en rouge). Une partie de l'activité sur la période 2008 – 2011 a été consacrée à la préparation des dispositifs instrumentaux qui seront mis en œuvre lors des campagnes BLLAST et HYMEX.

#### Références :

Eigenmann, R., Kalthoff, N., Foken, T., Dorninger, M., Kohler, M., Legain, D., Pigeon, G., Pigué, B., Schüttemeyer, D. and Traulle, O. , Surface energy balance and turbulence network during the Convective and Orographically-induced Precipitation Study (COPS). Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, n/a. Doi: 10.1002/qj.704

Lauvaux, T., B. Gioli, C. Sarrat, P. J. Rayner, P. Ciais, F. Chevallier, J. Noilhan, F. Miglietta, Y. Brunet, E. Ceschia, H. Dolman, J. A. Elbers, C. Gerbig, R. Hutjes, N. Jarosz, D. Legain, and M. Uliasz, 2009: Bridging the gap between atmospheric concentrations and local ecosystem measurements, Geophys. Res. Lett., 36, L19809, Doi:10.1029/2009GL039574.

Bourras D., A. Weill, G. Caniaux, L. Eymard, B. Boulès, S. Letourneur, D. Legain, E. Key, F. Baudin, B. Pigué, O. Traullé, G. Bouhours, B. Sinardet, J. Barrié, J.P. Vinson, F. Boutet, C. Berthod, A. Cléménçon, Turbulent air-sea fluxes in the Gulf of Guinea during the AMMA experiment. Journal of Geophysical Research, 114, C04014, Doi: 10.1029/2008JC004951.

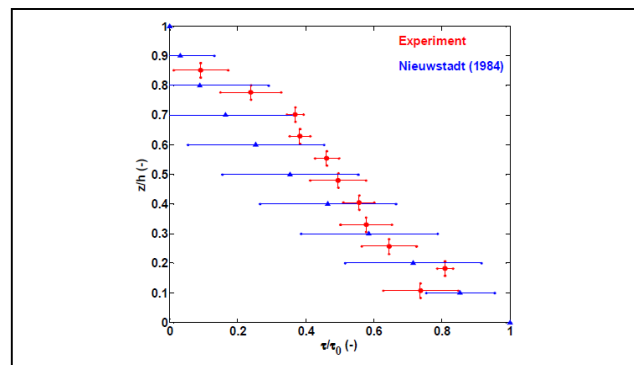
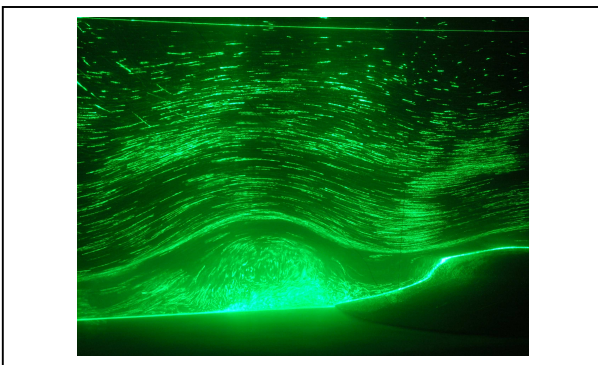


## GMEI-8 Sonder la couche limite atmosphérique dans une veine hydraulique

La grande veine hydraulique stratifiée du CNRM-GAME a été spécialement conçue pour l'étude de la couche limite atmosphérique. Il s'agit d'un instrument unique en Europe, ce qui constitue une des raisons de son appartenance au réseau européen de grandes infrastructures hydrauliques HYDRALAB.

Cette veine de 22m de long permet d'accéder à des jeux de données précis et complets dans des régimes d'écoulements parfaitement contrôlés similaires à l'atmosphère réelle (très grand nombre de Reynolds), et ce pour un coût réduit par rapport à une campagne de mesure in situ. L'utilisation de l'eau a en effet plusieurs avantages pour l'étude de la couche limite atmosphérique en laboratoire, que ce soit en termes de contrôle de l'écoulement, de gamme de paramètres accessibles, ou encore de mesure.

Construite en 1984 pour caractériser le vent à petit échelle sur des sites réels complexes, les travaux conduits récemment dans cette veine confirment son potentiel pour la recherche sur la couche limite atmosphérique, en conditions neutres (Tomas et al. 2010) mais aussi en présence d'une stratification en densité (Knigge et al. 2010, Steeneveld et al. 2010).



La figure de gauche est une visualisation obtenue lors d'expériences de laboratoire sur l'interaction de la couche limite atmosphérique avec le champ d'ondes internes de gravité généré sur un relief. Cela peut conduire à la formation d'un tourbillon turbulent d'axe parallèle à celui du relief (rotor), qui représente un danger pour les avions. Ces expériences reportées dans Knigge et al. (2010) constituent une première et ont permis de mieux comprendre les conditions atmosphériques propices à l'apparition de ce phénomène.

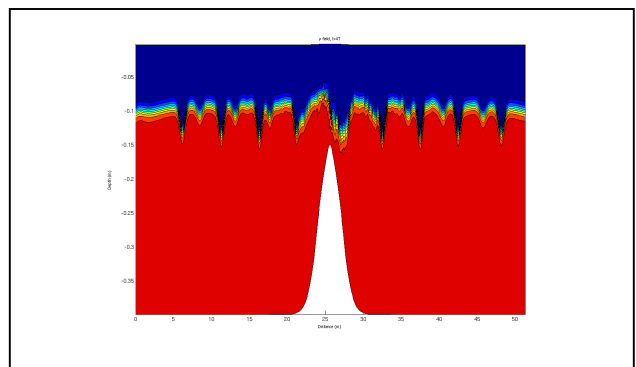
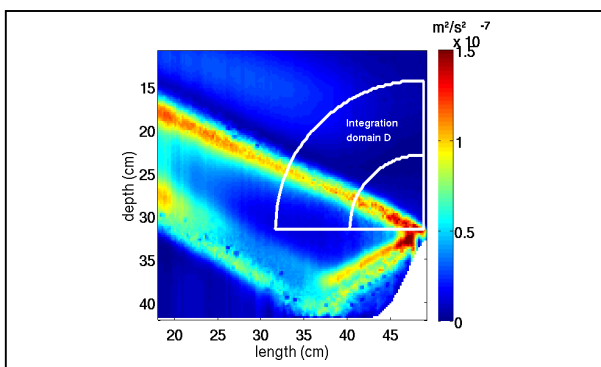
La figure de droite montre (en rouge) le profil vertical du flux de quantité de mouvement mesuré dans une expérience de laboratoire modélisant une couche limite stable (Steeneveld et al. 2010). Ces mesures sont en accord avec celles réalisées dans l'atmosphère réelle (en bleu), ce qui confirme la pertinence de cette approche pour l'étude de la couche limite atmosphérique stable. Le développement de cette thématique de recherche dans l'équipe de simulation physique (SPEA) du CNRM-GAME, en relation avec la modélisation numérique en météorologie, fait partie de ses toutes premières priorités pour les années à venir.

### Références

- Knigge C., D. Etling, A. Paci, and O. Eiff (2010) : Laboratory experiments on mountain induced rotors, Quarterly Journal Royal Meteorological Society, 136 :442-450, <http://dx.doi.org/10.1002/qj.564>
- Steeneveld G.-J., D. Dobrovolschi, A. Paci, O. Eiff, L. Lacaze and A.A.M. Holtslag (2010): Sensing the stable boundary layer in a towing tank, 19th Symposium on Boundary Layers and Turbulence, Keystone CO (USA), August 2-6, 2010, <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/172503.pdf>
- Tomas S., O. Eiff and V. Masson (2010) : Experimental Investigation of Turbulent Momentum Transfer in a Neutral Boundary Layer over a Rough Surface, Boundary-Layer Meteorology, <http://dx.doi.org/10.1007/s10546-010-9566-0>

Les ondes de gravité internes interviennent dans de nombreux processus, aussi bien dans l'atmosphère que dans l'océan. Elles font intervenir des échelles spatiales et temporelles telles que leur mesure in situ est difficile et que leur représentation explicite dans les modèles numériques n'est possible que pour des domaines très limités. La simulation physique constitue de ce fait un outil important pour améliorer notre compréhension des phénomènes complexes associés à ces ondes. Dans l'océan, comme dans l'atmosphère, les ondes de gravité internes ont un impact sur la circulation à grande échelle et la structure en densité. S'il est aujourd'hui clair que ces ondes ont un rôle important sur la circulation thermohaline, de nombreuses questions restent ouvertes concernant la génération, la propagation et le déferlement des ondes internes.

Une partie importante du mélange turbulent permettant d'assurer la remontée des eaux profondes formées aux hautes latitudes serait associée à ces ondes. Notre objectif est de quantifier précisément l'ensemble du bilan d'énergie de la marée interne générée sur une dorsale océanique, en s'appuyant sur des outils de modélisation numérique développés au Laboratoire d'Aérodynamique (Auclair et al. 2010) et de simulation hydraulique au CNRM-GAME.



La figure de gauche représente le champ d'énergie mécanique des ondes internes émises par une dorsale océanique, obtenu à partir de la mesure simultanée de la vitesse et de la densité en laboratoire. Ces mesures ont permis de mettre en évidence un régime dans lequel l'énergie radiée est maximale (Dossmann et al., in revision). La figure de droite est le résultat d'une simulation numérique réalisée pour définir la configuration d'expériences de laboratoire sur la génération d'ondes solitaires à la pycnocline, en relation avec des phénomènes de transfert d'énergie et de transport de nutriments observés dans le golfe de Gascogne.

Ces travaux s'inscrivent dans une thématique clé des activités de recherche menées dans l'équipe de simulation physique (SPEA) du CNRM-GAME : l'étude des ondes internes générées sur une topographie dans l'atmosphère et dans l'océan. Ils participent au développement d'approches mixtes simulation hydraulique et modélisation numérique. Une version « expérience de laboratoire » du code Meso-NH est également en cours de développement pour aborder des problématiques atmosphériques.

## Références

Thèse d'Yvan Dossmann en co-encadrement CNRM-GAME (A. Paci) et Laboratoire d'Aérodynamique (F. Auclair), début en octobre 2009: « Ondes internes générées sur une dorsale océanique : du laboratoire à l'océan ».

Dossmann Y., A. Paci, F. Auclair and J.W. Floor (2011): Simultaneous velocity and density measurements for an energy-based approach to internal waves generated over a ridge, submitted to Experiments in Fluids, *in revision*.

Auclair F., C. Estournel, J.W. Floor, M. Herrmann, C. Nguyen and P. Marsaleix (2010): A non-hydrostatic, energy conserving algorithm for regional ocean modeling, Ocean Modelling, Volume 36, Issues 1-2, 2011, Pages 49-70,

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2010.09.006>