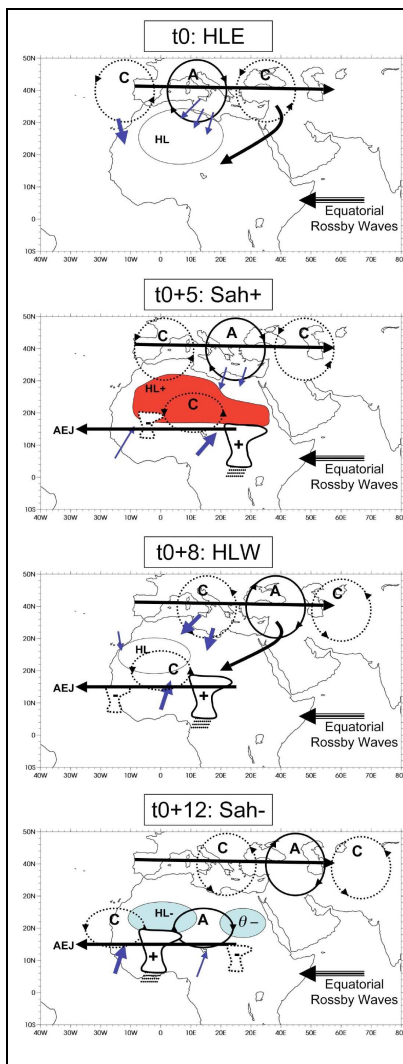


**ENCADRÉS SCIENTIFIQUES**  
**de l'unité de recherche**  
**GMME**

## GMME-1 Variabilité intrasaisonnière de la mousson africaine : Le rôle des moyennes latitudes et de la dépression thermique saharienne

La mousson africaine est ponctuée de périodes sèches et humides, persistant parfois plusieurs jours voire semaines. Leurs impacts sur les sociétés sahéliennes sont souvent dramatiques : une phase sèche peut réduire la sécurité alimentaire de la région, alors que des pluies particulièrement intenses et prolongées peuvent conduire à des inondations importantes. La compréhension et l'amélioration de la prévision de tels événements sont des enjeux majeurs pour prévenir et atténuer leurs impacts.

Dans le cadre du programme AMMA, une attention particulière a été portée sur cette variabilité intrasaisonnière de la mousson (Roehrig, 2010). À l'échelle de 15 jours, plusieurs origines ont été proposées, notamment les ondes équatoriales. L'étude de la variabilité intrasaisonnière de la dépression thermique (HL) saharienne, acteur essentiel de la mousson qui pilote en partie le flux d'humidité sur le continent, a mis en évidence des interactions entre les moyennes latitudes et la convection sur l'Afrique de l'Ouest. Les ondes de Rossby modulent également la structure de la dépression, les flux d'humidité et d'air sec et donc la convection. Cette mise en évidence d'un rôle des moyennes latitudes dans la variabilité intrasaisonnière de la mousson africaine pointe une source de prévisibilité et un espoir d'amélioration des prévisions sur le Sahel.



### Schéma conceptuel proposé par Roehrig et al. (2011) des interactions entre les latitudes tempérées et la variabilité intrasaisonnière des pluies sur le Sahel.

**à  $t_0$**  : Lors d'un événement **HLE**, le passage d'une onde de Rossby extratropicale affaiblit la ventilation de la dépression thermique (HL) sur la Lybie, induisant une anomalie chaude sur l'est de la Méditerranée. À l'inverse, la ventilation est renforcée sur le Maroc. En moyenne troposphère, une anomalie cyclonique se détache du train d'onde pour gagner l'Egypte et le Soudan.

**à  $t_0+5$**  : 5 jours plus tard, la dépression thermique en rouge (HL) atteint son intensité et extension maximale suite à la réduction de la ventilation à l'est. Alors que l'onde de Rossby poursuit sa propagation vers l'est, l'anomalie cyclonique atteint le Tchad. Combinée au renforcement du HL, le flux de mousson et la convection s'intensifient sur l'est du Sahel (symbole Cb +) et s'affaiblissent à l'Ouest (symbole Cb -). On a ainsi une amplification du mode de variabilité Sahélien de Mounier et Janicot (2004) lors de sa phase positive (**Sah+**) caractérisée par un bipôle zonal d'anomalie de pluie.

**à  $t_0+8$**  : 3 jours plus tard, les anomalies thermiques et de circulation se sont inversées (par rapport à  $t_0$ ) sur la Méditerranée suite à la propagation de l'onde de Rossby extratropicale. Les ventilations sont alors renforcées sur la Lybie et réduites sur le Maroc. Le HL commence ainsi à se réduire et à se décaler vers l'ouest. Cette évolution contribue à la propagation du bipôle d'anomalie de pluie sur le Sahel vers l'ouest. Notons également à ce moment le détachement d'une anomalie cette fois-ci anticyclonique du train d'onde pour gagner l'Egypte et le Soudan.

**à  $t_0+12$**  : 4 jours plus tard, l'anomalie froide  $\theta$ - en bleu (« cold surge ») atteint le Sahel Est où elle conduit à l'affaiblissement de la convection. De même le HL atteint son minimum d'intensité et d'extension (zone bleue HL-). La succession des anomalies cyclonique et anticyclonique au sud du Sahara renforce le flux de mousson sur le Sahel Ouest et l'anomalie positive de pluie se retrouve sur l'Afrique de l'Ouest, schéma correspondant à la phase négative (**Sah-**) du mode de variabilité Sahélien.

Ce scénario d'interaction et amplification avec une onde de Rossby extratropicale intervient pour 1/3 des événements intrasaisonniers du mode Sahélien. Il complète le scénario d'interaction avec une onde de Rossby équatoriale (Janicot et al. 2010).

### Références

Roehrig, R., F. Chauvin, and J.-P. Lafore, 2010 : Intraseasonal variability of the West African monsoon : the role of midlatitudes. *J. Climate*. In revision.

Roehrig, R.: Variabilité Intrasaisonnière de la mousson Africaine: Caractérisation et Modélisation. Thèse de l'Université Paris Est. Soutenue le 19 novembre 2010. pp395.

Les données de la campagne AMMA en 2006 fournissent une documentation inégalée de la convection et des systèmes nuageux durant la mousson ouest-africaine, permettant d'étudier les processus et interactions d'échelles en jeu, et d'évaluer/améliorer la capacité des modèles à les représenter à différentes échelles. Différentes études de cas de convection ont été menées concernant le cycle diurne de la convection isolée dans un environnement semi-aride (Lothon et al., 2010), le couplage entre la convection et les poussières désertiques (Kocha, 2011) et la convection organisée (Barthe et al., 2010). Ces études exploitent l'ensemble des observations AMMA (radar, lidar, ARM, surface, satellites,...) et une hiérarchie de modèles (Més0-NH en mode LES ou CRM, AROME, ARPEGE) La Figure 1 illustre un bel exemple d'interactions entre une onde d'Est, une pulsation de mousson et une série d'événements convectifs observés par le radar du MIT et le profileur de vent de la station ARM lors de leur passage à Niamey localisés autour du Talweg de l'onde et suivi par une période de faible activité convective. Une rétroaction positive de la convection sur le renforcement du Thalweg due au transport vertical de quantité de mouvement par la convection a été mise en évidence.

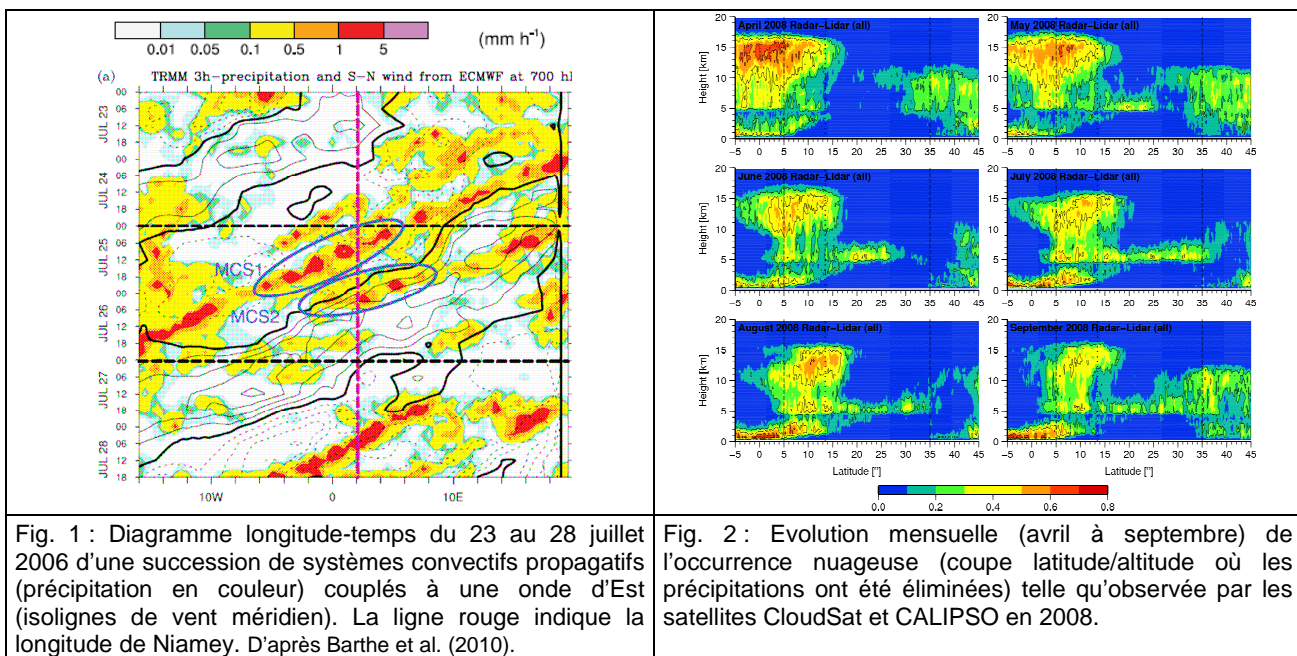


Fig. 1 : Diagramme longitude-temps du 23 au 28 juillet 2006 d'une succession de systèmes convectifs propagatifs (précipitation en couleur) couplés à une onde d'Est (isolignes de vent méridien). La ligne rouge indique la longitude de Niamey. D'après Barthe et al. (2010).

Fig. 2 : Evolution mensuelle (avril à septembre) de l'occurrence nuageuse (coupe latitude/altitude où les précipitations ont été éliminées) telle qu'observée par les satellites CloudSat et CALIPSO en 2008.

Les données collectées en 2006 ainsi que les données des satellites CloudSat et CALIPSO (Fig. 2) ont aussi permis de documenter les différents types de nuages rencontrés en Afrique de l'Ouest (Bouniol et al., 2011) et les modes de croissance des hydrométéores constituant les systèmes convectifs (Bouniol et al., 2010). L'impact radiatif de chacun de ces types nuageux a été quantifié montrant en particulier un impact important des nuages de moyenne altitude à la fois dans les domaines solaire et infra-rouge.

**Références**

Barthe C., N. Asencio, J.-P. Lafore, M. Chong and B. Campistron, 2010: Multi-scale analysis of the 25-27 July 2006 convective period over Niamey : comparison with radar data and other observations. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*, 190 - 208. DOI: 10.1002/qj.539.

Bouniol D., J. Delanoë, C. Duroure, A. Protat, V. Giraud and G. Penide, 2010 : Microphysical characterization of West African MCS anvils. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*, 323-344. DOI: 10.1002/qj.557.

Bouniol D., F. Couvreux, P-H Kamsu-Tamo, M. Leplay, F. Guichard, F. Favot and E. O'Connor, 2011: Observations of the diurnal and seasonal cycles of cloud occurrence, types and radiative impact over West Africa. *A soumettre au J. Applied Meteor. Climate*, mars 2011.

Kocha C., 2011 : Interactions entre poussières désertiques et convection profonde en Afrique de l'Ouest : Observation et modélisation à échelle convective. Thèse de l'Université de Toulouse III, soutenance le 20 avril 2011.

Lothon M., B. Campistron, M. Chong, F. Couvreux, F. Guichard, C. Rio and E. Williams, 2010: Life cycle of a mesoscale circular gust front observed by a C-band Doppler radar in West Africa. *Mon. Wea. Rev.*, doi:10.1175/2010MWR3480.

## GMME-3 Systèmes précipitants méditerranéens : préparation de l'expérience HyMeX

Progresser dans la compréhension et la prévision des systèmes précipitants méditerranéens est un objectif majeur du programme HyMeX centré sur le cycle de l'eau en Méditerranée. Au cours de ce quadriennal, plusieurs études ont été conduites afin de mieux caractériser ces événements et définir la stratégie d'observations des campagnes terrain d'HyMeX.

Les schémas synoptiques favorables aux épisodes de pluies intenses (Nuissier et al., 2008,2011) ont ainsi été mis en évidence grâce à l'analyse de nombreux cas d'étude sur le Sud de la France. La figure 1 montre une composite de ces schémas synoptiques favorables aux épisodes de pluies intenses. Les environnements à mésoéchelle ont aussi été caractérisés aux moyens d'études de cas (Ducrocq et al., 2008) ainsi que re-analyses 3D-Var ALADIN et de méthodes de descente en échelle des re-analyses ERA-Interim (Duffourg et Ducrocq, 2011) appliquées à quelques dizaines de cas. Un des ingrédients majeurs identifiés – l'alimentation en humidité – a été analysé plus en détails (Duffourg, 2010). Ceci a permis de dresser le schéma conceptuel présenté figure 2.

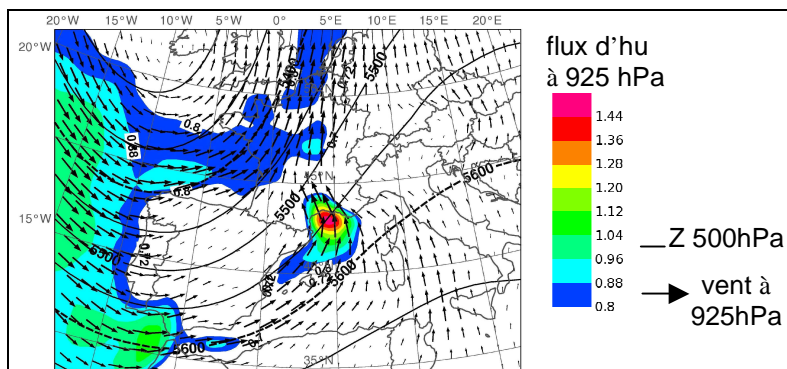


Fig. 1 : composite des analyses ERA40 du géopotentiel à 500hPa, du flux d'humidité et du vent à 925hPa pour les situations fortement précipitantes de 1958 à 2000. On note une circulation cyclonique en altitude associée, en basses couches, à un transport d'humidité vers les côtes françaises.

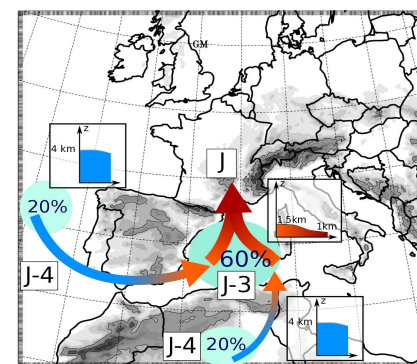


Fig. 2 : Schéma conceptuel de l'origine et du transport de l'humidité alimentant les systèmes précipitants (d'après Duffourg, 2011)

Des études de sensibilité à ces ingrédients à mésoéchelle ont été conduites à l'aide d'expériences de modélisation idéalisée de systèmes convectifs quasi-stationnaires avec le modèle MESO-NH à la résolution kilométrique (Bresson et al., 2009). Un flux de basses couches rapide et/ou humide favorise un ancrage des systèmes sur les contreforts du Massif Central, alors qu'un flux moins rapide et/ou moins humide permet le développement d'un courant de densité sous orage et des systèmes précipitants ancrés plus en amont sur la plaine ou la mer. Il a été aussi montré un impact sur la localisation et l'intensité des systèmes précipitants de la paramétrisation des flux de surface océan-atmosphère ou d'un couplage avec un modèle de couche limite océanique (Lebeaupin-Brossier, 2007).

### Références

- Bresson., D. Ricard et V. Ducrocq, 2009 : Idealized mesoscale numerical study of Mediterranean heavy precipitating convective systems. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 103,45-55.
- Ducrocq V., O. Nuissier, D. Ricard, C. Lebeaupin et T. Thouvenin, 2008 : A numerical study of three catastrophic events over Southern France. II: Mesoscale triggering and stationarity factors. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134(630), 131-145, doi: 10.1002/qj.199.
- Duffourg F., 2010 : Sources et transports d'humidité pour les événements de pluies intenses en région méditerranéenne: caractérisation et assimilation à mésoéchelle de radiances satellitaires infrarouge. *Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier – Toulouse III*, 190p.
- Duffourg F. et V. Ducrocq, 2011 : Origin of the moisture feeding the Heavy Precipitating Systems over Southeastern France. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, sous presse, 16p.
- Lebeaupin-Brossier C., 2007 : Etude du couplage océan-atmosphère associé aux épisodes de pluie intense en région méditerranéenne. *Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier – Toulouse III*, soutenue le 19 décembre 2007.
- Nuissier O., V. Ducrocq et D. Ricard, 2008 : A numerical study of three catastrophic events over Southern France. I: Numerical framework and synoptic ingredients. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134(630), 111-130, doi: 10.1002/qj.200.
- Nuissier, O., B. Joly, A. Joly, V. Ducrocq, P. Arbogast, 2011 : A statistical downscaling to identify the Large Scale Circulation patterns associated with Heavy Precipitation Events over southern France, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, in revision.

## GMME-4 Couches Limites Atmosphériques

Au cours du quadriennal, les études sur la couche limite atmosphérique se sont focalisées sur deux aspects : un premier volet sur la compréhension des processus et un autre qui vise l'amélioration de leur représentation dans les modèles.

Le premier s'est principalement appuyé sur les données de la campagne AMMA. Il a permis de caractériser la variabilité intra-saisonnière (Couvreur et al., 2010), le cycle saisonnier du bilan énergétique (Guichard et al., 2009), la transition couche limite/convection peu profonde/convection profonde en zone semi-aride (Lothon et al., 2011) et la variété des cycles diurnes de la CLA (Fig. 1). Les données de la campagne AMMA ont permis d'étudier cette variété de cycles diurnes le long d'un transect méridien climatique depuis le Golfe de Guinée jusqu'au désert du Sahara (Gounou, 2011). Ces cycles diurnes continentaux présentent de fortes variations en relation avec des équilibres entre processus et des signatures thermodynamiques distincts ; e.g. on note comment leur amplitude augmente avec la température (Fig 1).

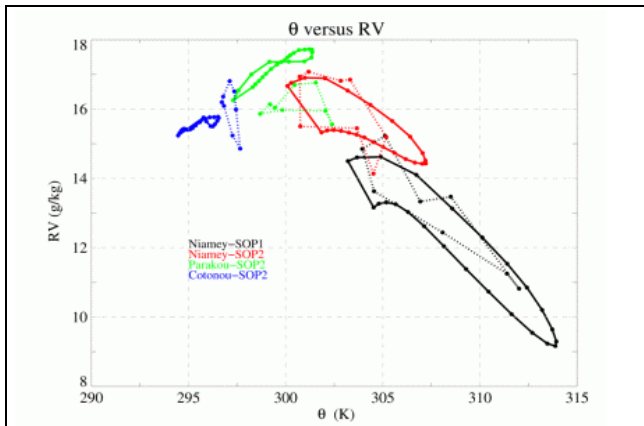


Fig. 1 : Cycle diurne moyen de l'humidité spécifique (rv) en fonction du cycle diurne moyen de la température potentielle (θ) moyennés sur les premiers 500m de la CLA simulés (lignes pleines) et observés (pointillés).

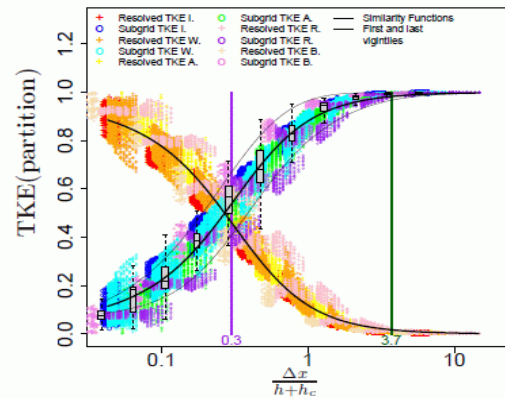


Fig. 2 : Partition de l'énergie cinétique résolue (couleurs chaudes) et sous-maille (couleurs froides) en fonction de la maille normalisée dans la couche mélangée

Les travaux sur le second volet ont porté d'une part sur l'évaluation des paramétrisations en flux de masse via le développement d'un nouveau diagnostic (Couvreur et al., 2010) et l'amélioration de la formulation de l'entraînement et du déentraînement (Rio et al., 2010). D'autre part, dans le cadre de la thèse de R. Honnert, la caractérisation de la transition de la turbulence des échelles LES vers les échelles kilométriques a débuté (Fig. 2). Des lois de similitudes déterminant la partition résolue/sous-maille pour différentes variables (énergie cinétique turbulente, flux et variance de température potentielle liquide et d'eau totale) ont été établies à partir de simulations explicites de cas variés de couches limites convectives sèches et nuageuses (Honnert et al., 2011).

### Références

- Couvreur, F., F. Hourdin and C. Rio, 2010: Resolved versus parametrized boundary-layer plumes. Part I: a parametrization-oriented. *Boundary Layer Meteorology*. 134, Iss 3, 441-458 DOI 10.1007/s10546-009-9456-5
- Couvreur, F., F. Guichard, O. Bock, J.-P. Lafore, J.-L. Redelsperger, 2010 : Monsoon flux pulsations over West Africa prior to the monsoon onset *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136, Issue S1, 159-173, DOI 10.1002/qj.473.
- Gounou A., 2011 : Étude des processus pilotant les cycles diurnes de la Moussoon Ouest Africaine, Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, soutenue le 27 janvier 2011
- Guichard, F., L. Kergoat, E. Mougin, F. Timouk, F. Baup, P. Hiernaux and F. Lavenue , 2009 : Surface thermodynamics and radiative budget in the Sahelian Gourma: seasonal and diurnal cycles, *J. Hydrology*, 375, 161-177.
- Honnert R., V. Masson and F. Couvreur, 2011: A Diagnostic for evaluating the Representation of Turbulence in Atmospheric Models at the Kilometric Scale., en revision pour *J. Atmos. Sci.*
- Lothon, M., B. Campistron, M. Chong, F. Couvreur, F. Guichard, C. Rio, E. Williams, 2011: Life cycle of a mesoscale circular gust front observed by a C-band radar in West Africa, In press for *MWR*
- Rio, C., F. Hourdin, F. Couvreur and A. Jam, 2010 : Resolved versus parametrized boundary-layer plumes. Part II: Continuous formulation of mixing rates for mass-flux schemes. *Boundary Layer Meteorology*. 135(3), 469-483

Les estimations du bilan énergétique à la surface fournies par les données du programme AMMA ont montré que le rayonnement net ( $R^{net}$ ) augmente considérablement dans les régions semi-arides sahéniennes pendant la mousson et que son cycle annuel est radicalement différent de celui du rayonnement solaire incident. Ce fonctionnement s'avère très distinct de celui généralement observé sur les continents, aux latitudes tempérées comme dans les tropiques humides. Ici, la dynamique saisonnière du flux radiatif incident fait effectivement intervenir l'humidité et la nébulosité mais aussi, et de manière remarquable, la température et la charge en aérosols de la colonne atmosphérique. L'augmentation de  $R^{net}$  résulte elle principalement d'un refroidissement de la surface et d'une diminution de l'albédo liée à la croissance de la végétation (Guichard et al., 2009, Fig. 1). La simulation de ce bilan énergétique par les modèles couplés surface-atmosphère s'avère au moins aussi problématique que celle des précipitations (Meynadier et al., 2010). Le projet international ALMIP (Boone et al., 2009) coordonné par le GAME a permis d'avancer sur ces questions et fournit des évaluations novatrices des modèles de surface.

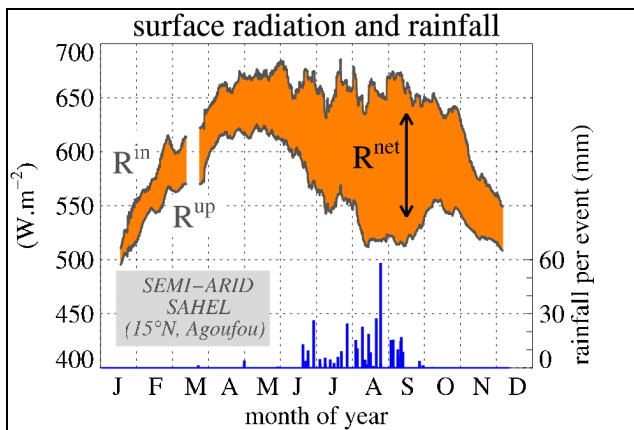


Fig. 1 : Cycle annuel du flux radiatif incident  $R^{in}$  et ascendant  $R^{up}$  à la surface. L'amplitude de  $R^{net}$  ( $=R^{in}-R^{up}$ ) correspond à la plage orange, son épaisseur en été résulte de la diminution de  $R^{up}$  tandis que  $R^{in}$  varie peu.

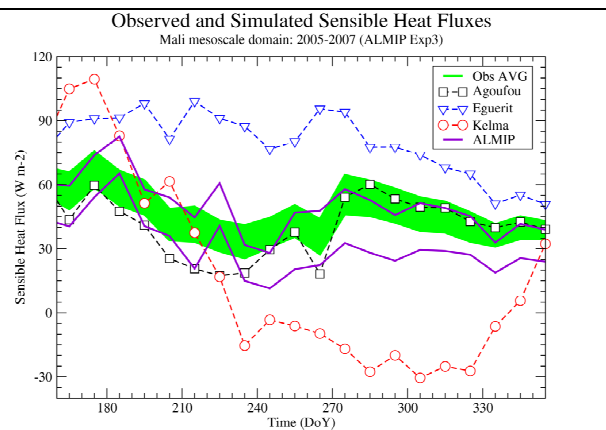


Fig. 2 : Cycle saisonnier du flux sensible: mesures locales en symboles et agrégées à mésoéchelle en plage verte; l'enveloppe des flux simulés par les modèles ALMIP est indiquée par les deux courbes violettes (moyenne  $\pm \sigma$ ).

Il est difficile d'évaluer le réalisme de la simulation des flux turbulents avec uniquement des mesures locales. Des méthodes indirectes, basées sur des observations à l'échelle locale, up-scalées avec l'aide de données de télédétection ont été développées. Elles montrent par exemple (Fig. 2) que le flux de chaleur sensible simulé par les modèles d'ALMIP se comparent favorablement aux estimations de flux agrégées au cours de la saison de mousson sur le site sahélien méso-échelle du Mali ( $60 \text{ km}^2$ ). Les modèles sont capables de simuler raisonnablement à la fois l'amplitude et la phase du cycle annuel. Les résultats d'ALMIP (flux de surface et humidité du sol) ont ensuite été utilisés pour l'évaluation de la composante de surface des modèles couplés à l'échelle régionale sur l'Afrique de l'ouest (e.g. Hourdin et al., 2009-projet AMMA-MIP; et Boone et al., 2010-projet WAMME).

**Références**

Boone, A., Y. Xue, I. Pocard-Leclercq, J. Feng, and P. deRosnay, 2010: Evaluation of the WAMME model surface fluxes using results from the AMMA land-surface model intercomparison project. *Clim. Dynamics*, 35(1), 127-142. DOI 10.1007/s00382-009-0653-1

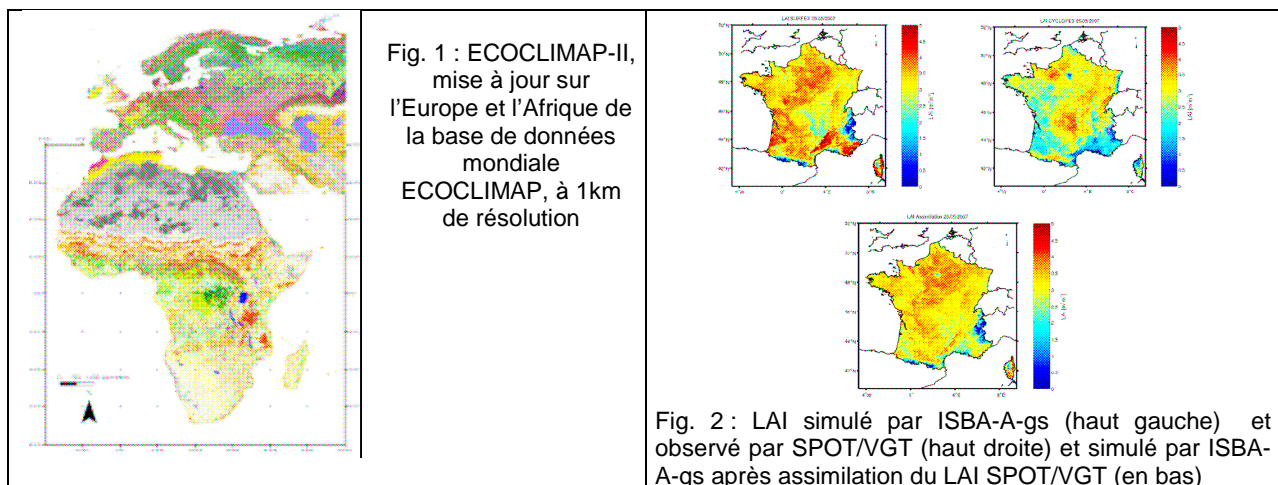
Boone, A., P. de Rosnay, and the ALMIP Working Group, 2009: The AMMA Land Surface Model Intercomparison Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90(12), 1865-1880, doi:10.1175/2009BAMS2786.1

Guichard, F., L. Kergoat, E. Mougin, F. Timouk, F. Baup, P. Hiernaux and F. Lavenue, 2009 : Surface thermodynamics and radiative budget in the Sahelian Gourma: seasonal and diurnal cycles, *J. Hydrology*, 375, 161-177. doi : 10.1016/j.jhydrol.2008.09.007

Hourdin, F., and coauthors, 2010: AMMA-Model Intercomparison Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91(1), 95-104.

Meynadier, R., O. Bock, F. Guichard, A. Boone, P. Roucou, J.-L. Redelsperger, 2010: The West African Monsoon water cycle. Part I: a hybrid water budget dataset. *J. Geophys. Res.*, 115, doi:10.1029/2010JD013917.

La modélisation des processus de surface en relation avec le cycle du carbone et l'hydrologie superficielle, requiert l'utilisation de la télédétection pour spatialiser et contraindre les modèles, et l'assimilation de données de télédétection dans différents domaines de longueur d'onde. Au cours du quadriennal, les travaux de recherche ont eu pour objectif de valider et d'améliorer la qualité des produits de télédétection (par exemple rayonnement incident et l'albédo du LSA-SAF d'EUMETSAT, l'humidité des sols ASCAT et SMOS), en déployant si nécessaire des réseaux de surface (réseau SMOSMANIA de 21 stations mesurant d'humidité des sols dans le sud de la France qui a permis de valider les produits humidité des sols ASCAT et SMOS) ou en réalisant des campagnes d'observations dédiées (composante in-situ sol de CAROLS, Albergel et al., 2010). La stratification du paysage s'appuie sur la base de données ECOCLIMAP comprenant une carte d'occupation des sols et les paramètres utilisés par le modèle de surface ISBA. ECOCLIMAP a fait l'objet d'une actualisation importante sur l'Europe et l'Afrique (Kaptué Tchuenté et al., 2010). Une analyse pluri-annuelle de données satellitaires a permis d'obtenir des écorégions homogènes (Fig. 1). Pour l'Afrique, cela a permis de mieux définir les zones de transition entre la forêt humide et le Sahel, qui sont particulièrement étudiées dans le cadre d'AMMA.



Ce quadriennal a vu le développement de l'assimilation d'observations de l'humidité superficielle du sol provenant de la télédétection afin d'initialiser l'humidité du sol dans la zone racinaire. Les observations réalisées sur le site de SMOSREX nous ont permis de vérifier l'impact positif d'un système d'assimilation de données d'humidité superficielle et d'indice foliaire de la végétation (au moyen d'un filtre de Kalman étendu simplifié) dans ISBA-A-gs, sur les flux d'eau, d'énergie et de carbone ainsi que sur l'indice foliaire (Albergel, 2010 ; Barbu, 2011). Un démonstrateur pré-opérationnel de ce système d'assimilation de données a été mis en place sur la France. La Figure 2 illustre l'impact de l'assimilation dans ISBA-A-gs d'estimations du LAI à partir de données satellitaires.

## Références

- Albergel, C., Calvet, J.-C., Mahfouf, J.-F., Rüdiger, C., Barbu, A.L., Lafont, S., Roujean, J.-L., Walker, J.P., Crapeau, M., Wigneron, J.-P., Monitoring of water and carbon fluxes using a land data assimilation system: a case study for southwestern France, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 1109–1124, doi:10.5194/hess-14-1109-2010, 2010.
- Albergel, C., Assimilation de données de télédétection dans le modèle ISBA-A-gs pour une analyse conjointe de la biomasse et de l'état hydrique du sol, Thèse de doctorat, Toulouse 3, 2010.
- Barbu, A., Calvet, J.-C., Mahfouf, J.-F., Albergel, C., Lafont, S., Assimilation of Soil Wetness Index and Leaf Area Index into the ISBA-A-gs land surface model: grassland case study, *Biogeosciences*, sous presse, 2011.
- Kaptué Tchuenté, A., Roujean, J.-L., Faroux, S., ECOCLIMAP-II: an ecosystem classification and land surface parameter database of Western Africa at 1 km resolution for the African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA) project, *Remote Sensing of Environment*, 114, 961–976, 2010.
- Kaptué Tchuenté, A., Cartographie des écosystèmes et paramètres biophysiques pour l'étude des flux hydriques sur le continent africain, Thèse de doctorat, Toulouse 3, 2010.
- Sabater, J.M., Rüdiger, C., Calvet, J.-C., Fritz, N., Jarlan, L., Kerr, Y., Joint assimilation of surface soil moisture and LAI observations into a land surface model, *Agric. For. Meteorol.*, 148(8-9), 1362-1373, 2008.

Au cours du quadriennal, les recherches effectuées sur le thème de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie régionale ont principalement porté sur la question de l'évolution des événements extrêmes (crues et sécheresses) et de la quantification de l'incertitude associée. Ces questions sont au cœur des travaux de la recherche sur les impacts du changement climatique et contribuent aux travaux du GIEC.

La mise en évidence de l'importance de la prise en compte de l'incertitude liée à la méthode de régionalisation et au modèle d'impact a été démontrée par les projets REXHYSS (GICC) sur la Seine, ainsi que CYPRIM (FNS) et MEDUP (ANR) sur la zone méditerranéenne. En particulier, les incertitudes associées à la représentation de la surface ont été évaluées en prenant en compte des changements d'occupation des sols et l'effet direct du CO<sub>2</sub> sur la végétation. Cet aspect est en cours d'étude grâce à ISBA-A-gs et de cartes de scénarios d'occupations du sol. L'effet direct du CO<sub>2</sub> modifie sensiblement le cycle hydrologique annuel.

Les travaux sur les pluies extrêmes ont montré que sur la période automnale, il fallait s'attendre à des débits extrêmes du même ordre de grandeur (voire plus fort) qu'actuellement, malgré des sols globalement plus secs (Quintana Segui, 2008 ; Fig.1). Concernant les sécheresses, une typologie sur les cinquante dernières années et à la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle a été effectuée dans le cadre du projet CLIMSEC (Fondation MAIF, Vidal et al., 2010, article récompensé par le prix Norbert Gerbier-Mumm 2010 de l'OMM).

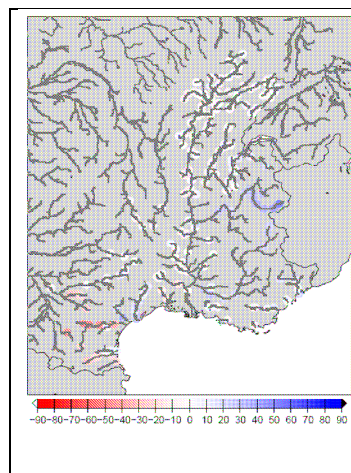


Fig. 1 : Evolution du quantile 99 (%) du débit dans le cadre du scénario CYPRIM (A2, méthode de régionalisation « quantile-quantile »). On note l'augmentation du quantile 99 sur l'Hérault entre les périodes 2071-2100 et 1960 -1990

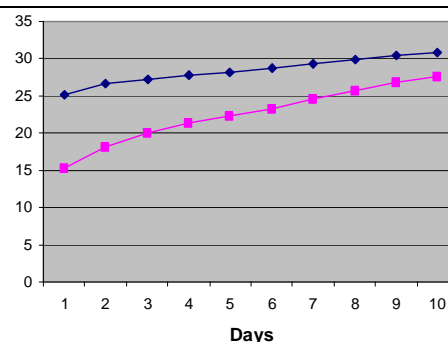


Fig. 2 : Erreur quadratique moyenne ( $m^3/s$ ) de la prévision de débits sur 180 stations hydrologiques pour la version opérationnelle (bleu) et le modèle amélioré (rose).

Parallèlement aux études d'impact climatique, des travaux ont été menés en vue d'améliorer la représentation des processus hydrologiques dans la chaîne Safran-Isba-Modcou. La réponse hydrologique d'ISBA a été améliorée par l'introduction d'un profil exponentiel de conductivité hydrologique.

Concernant la prévision des débits à 10 jours d'échéance, un système d'assimilation de débits passés sur 150 stations sur la France a été développée (Thirel, 2009). Ce système, basé sur la méthode BLUE, assimile les débits observés afin de corriger les contenus initiaux en eau du sol d'ISBA. L'impact sur les scores de prévision de débit est net (Fig. 2). L'amélioration en début d'échéance est due à l'assimilation (Thirel et al., 2010), celle à partir de quelques jours est liée à l'amélioration de la physique du modèle (profil exponentiel de conductivité hydraulique).

## Références

Quintana Segui, P., 2008 : Simulation hydrologique en région méditerranéenne avec SAFRAN-ISBA-MODCOU. Amélioration de la physique et évaluation des risques dans le cadre du changement climatique. Thèse de l'université de Toulouse III, soutenue le 10 décembre 2008

Thirel, G., 2009 : Amélioration des prévisions d'ensemble des débits sur la France de SAFRAN-ISBA-MODCOU. Thèse de l'Université de Toulouse III, soutenue le 23 novembre 2009

Quintana Seguí, P.; Ribes, A.; Martin, E.; Habets, F. & Boé, J. Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins *Journal of Hydrology*, **2010**, 383, 111-124

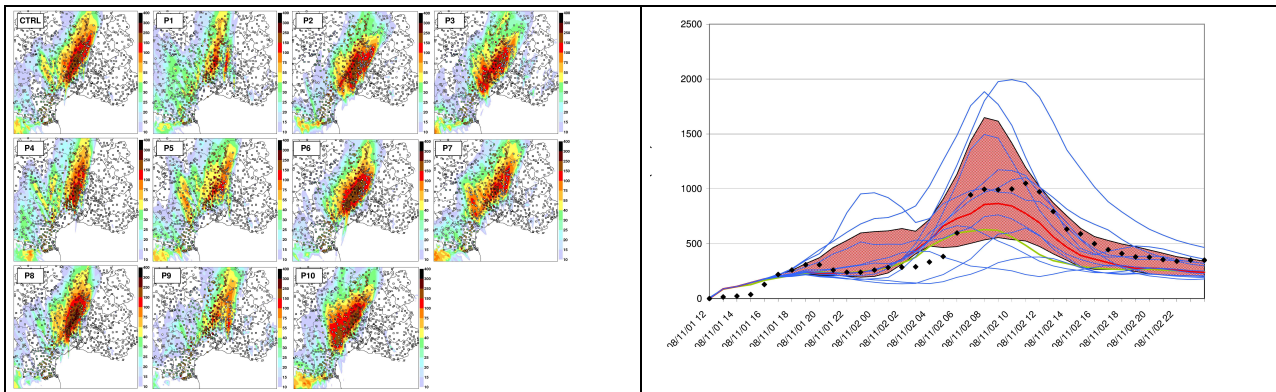
Vidal, J.-P.; Martin, E.; Franchistéguy, L.; Habets, F.; Soubeyroux, J.-M.; Blanchard, M. & Baillon, M. Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite *Hydrology and Earth System Sciences*, **2010**, 14, 459-478



## GMME-8 Prévisibilité à l'échelle convective des systèmes précipitants et crues rapides en région Méditerranéenne

En automne, les régions Méditerranéennes sont régulièrement exposées à des crues-éclair générées par des épisodes de fortes pluies. Dans le cadre du projet de recherche MEDUP (ANR VMC) coordonné par le GMME, un des objectifs principaux était de caractériser et quantifier les incertitudes associées à la prévision de ces événements ainsi que leur propagation dans la simulation hydrologique pour la prévision des débits. De nouvelles approches de prévision d'ensemble météorologique et hydrologique ont ainsi été développées et évaluées.

La conception de méthodes de prévision d'ensemble qui échantillonnent au mieux la distribution des erreurs de prévision des modèles d'échelle kilométrique résolvant la convection est encore une question ouverte. Différentes méthodes de perturbations des conditions initiales et aux limites ont ainsi été évaluées avec le modèle AROME pour plusieurs cas de précipitations intenses sur la base d'expérience de prévision d'ensemble d'une dizaine de membres (Vié et al., 2010). Combiner une descente en échelle des membres de la prévision d'ensemble à grande échelle PEARP de Météo-France à de l'assimilation d'ensemble à l'échelle convective donne de meilleurs scores probabilistes dans les premières 24 heures d'échéance que les deux méthodes prises indépendamment.



A droite : Cumuls de précipitations du 1 nov. 2008 à 12 UTC au 2 nov. 2008 à 12 UTC prévus par les 11 membres d'une expérience de prévision d'ensemble du modèle AROME, auxquels sont superposés les observations des pluviomètres. A gauche : Chroniques de débits sur 36h simulés par le modèle ISBA-TOPMODEL forcés par les 11 membres de l'ensemble AROME (bleu) à partir du 1 nov. 2008 à 12 UTC. La médiane de l'ensemble (rouge) et l'écart interquartile 25%-75% (plage rose) sont tracés, ainsi que les observations de débits et la simulation forcée par le modèle AROME opérationnel déterministe (vert).

Associés aux travaux sur la prévision d'ensemble à l'échelle convective, une prévision d'ensemble hydrologique pour les crues rapides est développée (Vincendon, 2010). Une méthode originale de perturbations des champs de pluies, basée sur une évaluation orientée objet des statistiques d'erreurs des prévisions déterministes du modèle opérationnel AROME a été conçue et évaluée sur quelques cas d'étude. Cette méthode a une performance équivalente au couplage direct d'ISBA-TOPMODEL avec les ensembles de prévisions AROME et représente une voie d'augmentation de la taille de l'ensemble de prévisions hydrologiques. Ces différentes méthodes de prévision d'ensemble seront plus amplement évaluées et améliorées dans le cadre du programme HyMeX (<http://www.hymex.org>) qui vise à améliorer la prévision des précipitations et crues rapides en Méditerranée.

### Références

Vié B., Nuissier O. and Ducrocq V., 2010: Cloud-resolving ensemble simulations of mediterranean heavy precipitating events: uncertainty on initial conditions and lateral boundary conditions, *Mon. Wea. Rev.*, DOI:10.1175/2010MWR3487.1

Vincendon B., 2010: Apport des modèles météorologiques de résolution kilométrique pour la prévision des crues rapides Méditerranéennes : vers une prévision d'ensemble des débits en région Cévennes-Vivarais. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III soutenue le 16 décembre 2010.

Vincendon B., Ducrocq V., Nuissier O. and Vié B., 2011: Flash-flood ensemble forecasts based on convective-scale NWP. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, en révision

Le développement du modèle AROME et sa mise en place dans un cadre opérationnel se sont accompagnés d'actions de recherche sur l'assimilation de nouveaux types d'observations météorologiques pertinents à mésoéchelle. Ainsi les développements engagés au précédent quadriennal concernant les données de réflectivités radar (Caumont, 2007 ; Caumont et al., 2009) et les vitesses radar Doppler ont abouti depuis à une implémentation opérationnelle (voir encadré GMAP-10).

Un autre travail, sur les délais zénithaux GPS (ZTD), également commencé au cours du précédent quadriennal, a lui aussi donné lieu à une implémentation opérationnelle. Les travaux préliminaires à cette utilisation opérationnelle ont consisté à développer de nouveaux opérateurs d'observation pour ZTD dans le système d'assimilation 3DVar ALADIN/AROME ainsi qu'à évaluer l'apport de l'assimilation de ce type d'observation sur la prévision à haute résolution des systèmes convectifs précipitants (Yan, 2009). Par exemple, la figure 1 montre l'amélioration sur les prévisions de précipitations d'AROME à courte échéance obtenue en assimilant les observations de ZTD pour une situation de la campagne d'observations COPS. Un assèchement conforme aux observations sur une bande s'étendant de La Rochelle à Lille est visible. Des comparaisons aux données du lidar vapeur d'eau LEANDRE embarqué sur le SAFIRE/F20 confirment ces améliorations (Yan et al, 2009).

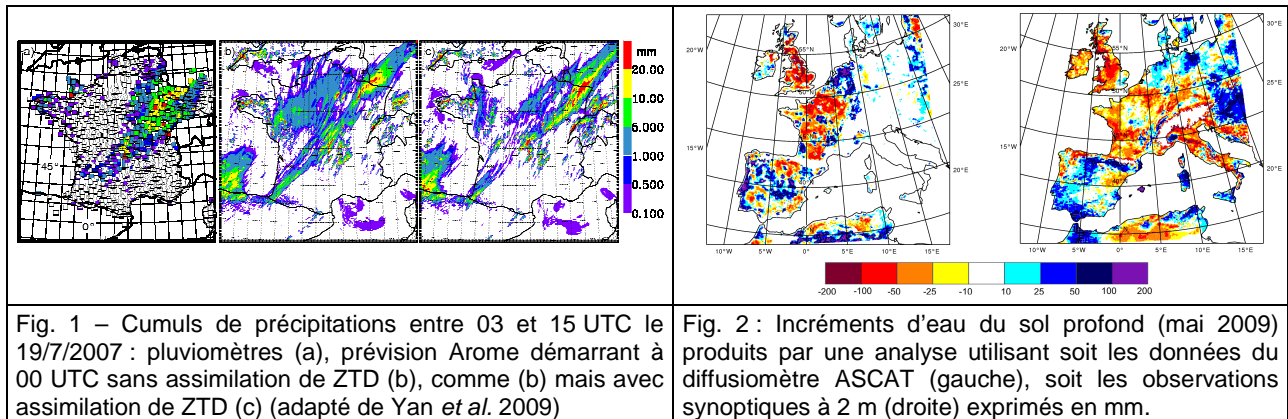


Fig. 1 – Cumuls de précipitations entre 03 et 15 UTC le 19/7/2007 : pluviomètres (a), prévision Arome démarrant à 00 UTC sans assimilation de ZTD (b), comme (b) mais avec assimilation de ZTD (c) (adapté de Yan *et al.* 2009)

Fig. 2 : Incréments d'eau du sol profond (mai 2009) produits par une analyse utilisant soit les données du diffusiomètre ASCAT (gauche), soit les observations synoptiques à 2 m (droite) exprimés en mm.

D'importants travaux ont été menés sur l'assimilation d'observations satellitaires pour améliorer l'état initial des surfaces continentales dans les modèles ALADIN et AROME. Un système d'assimilation basé sur un Filtre de Kalman Etendu (FKE) a été développé (Mahfouf et al., 2009). Sa capacité à assimiler des contenus en eau du sol superficiel provenant du radiomètre AMSR-E pour corriger l'eau du sol dans la zone racinaire a été démontrée (Draper et al., 2009, 2010). Le FKE a été couplé au système 3D-Var du modèle Aladin pour assimiler les indices d'humidité du sol superficiel du diffusiomètre ASCAT (disponibles en temps réel). Il apparaît (Mahfouf, 2010) que les corrections apportées à l'eau du sol dans la zone racinaire sont comparables à celles obtenues avec l'analyse dans le sol opérationnelle (basée sur une interpolation optimale utilisant des observations de température et d'humidité relative à 2 mètres) comme le montrent la Figure 2 et les scores de prévisions des variables à 2 mètres (non montré).

**Références**

Caumont, O., Ducrocq, V., Wattrelot, É., Jaubert, G. and Pradier-Vabre, S., 2010: 1D+3DVar assimilation of radar reflectivity data: A proof of concept, *Tellus Series A-Dynamic Meteorology and Oceanography*, Volume (62A(2)), 173-187, doi : 10.1111/j.1600-0870.2009.00430.x

Caumont, O. , 2007: Simulation et assimilation de données radar pour la prévision de la convection profonde à fine échelle. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III, soutenue le 4 décembre 2007.

Mahfouf, J.-F., K. Bergaoui, C. Draper, F. Bouyssel, F. Taillefer, and L. Taseva, 2009: A comparison of two-offline soil analysis scheme for assimilation of screen level observations. *J. Geophys. Res.*, **114** : D80105. DOI:10.1029/2008JD011077

Mahfouf, J.-F., 2010 : Assimilation of satellite derived soil moisture from ASCAT in a limited area NWP model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **136**, 784-798

Yan, X., 2009 : *Assimilation de données GPS pour la prévision de la convection profonde*. Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse III soutenue 10 mars 2009.

Yan, X., V. Ducrocq, G. Jaubert, P. Brousseau, P. Poli, C. Champollion, C. Flamant, K. Boniface, 2009 : The benefit of GPS zenith delay assimilation to high-resolution quantitative precipitation forecasts: a case-study from COPS IOP 9. *Q. J. Royal Meteor. Soc.*, **135**(644), 1788-1800, DOI: 10.1002/qj.508.

La modélisation urbaine au GAME s'attache à répondre aux enjeux actuels que sont la simulation environnementale des villes, l'impact du changement climatique en milieu urbain, et les stratégies d'adaptation des villes face à ce changement climatique.

Des simulations avec le modèle SURFEX (incluant le modèle de ville TEB) forcé par des projections climatiques issues de modèles régionaux de climat ont permis d'étudier l'évolution du climat parisien entre 1970-2007 et 2071-2099 selon deux scénarios d'émission A1B et A2. On observe une disparition quasi-totale des journées froides ( $T_{MIN} < -5^{\circ}C$ ) dans le futur. En été, le nombre de journées très chaudes ( $T_{MAX} > 30^{\circ}C$ ) augmente plus dans les zones périurbaines que dans le centre-ville. Le refroidissement habituellement généré par les jardins disparaît en raison d'un fort assèchement des sols. Enfin, les cas d'alerte canicule deviennent beaucoup plus fréquents, en particulier dans les zones les plus urbanisées où l'effet d'îlot de chaleur se superpose au réchauffement global (Fig. 1).

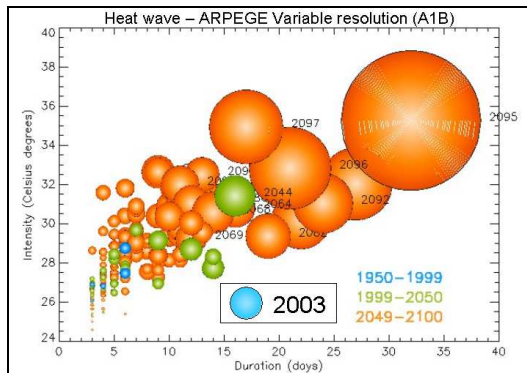


Fig. 1 : Canicules futures d'après ARPEGE-VR selon le scénario d'émission A1B

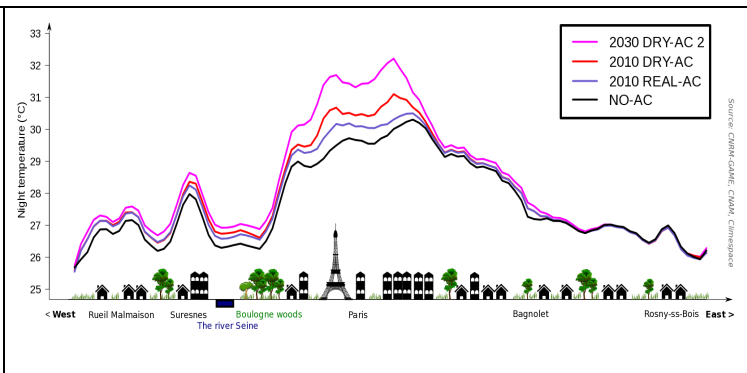


Fig. 2 : Coupe est-ouest de la température à 2 m selon les scénarios de climatisation : sans climatisation, rejets secs et humides, rejets secs uniquement, doublement des rejets secs.

En réponse à ces situations de stress thermique, on peut s'attendre à une multiplication des équipements en climatisation. Différents scénarios de climatisation actuels et futurs ont été simulés pour Paris pour l'épisode de la canicule de 2003. Ils montrent que les rejets d'air chaud dans l'atmosphère produits par les climatiseurs accentuent l'îlot de chaleur urbain - jusqu'à plus de  $2^{\circ}C$  pour le scénario futur (Fig. 2) - en particulier pendant la nuit. En réponse à ce réchauffement, les besoins en climatisation sont renforcés. On assiste ainsi à une rétroaction positive.

L'évaluation de stratégies de mitigation et d'adaptation nécessite le raffinement des représentations des processus physiques et du micro-climat des rues par le modèle TEB Lemonsu et al., 2007 ; Hamdi et Masson, 2008). Les aspects liés à la consommation d'énergie par le chauffage ont été améliorés suite à la campagne de mesures CAPITOUL (Masson et al., 2008 ; Pigeon et al., 2007). Une nouvelle version représentant de façon explicite la végétation dans la rue a aussi été développée. Elle permettra de tester des scénarios de verdissement des villes.

Ces recherches sont conduites au sein d'un cluster de projets de recherche pluridisciplinaires, associant des laboratoires de recherche en sciences de l'atmosphère, en socio-économie et en géographie et des agences d'urbanisme pour articuler de façon cohérente les scénarios macro-économiques, climatiques, technologiques et d'aménagement du territoire et proposer une évaluation des diverses stratégies d'adaptation de la ville au changement climatique.

**Références**

Hidalgo, J., V. Masson, and L. Gimeno-Presa, 2010 : Scaling the daytime urban breeze circulation. *JAMC*, 49(5), 889-901.  
 Lemonsu, A., V. Masson, and E. Berthier, 2007 : Improvement of the hydrological component of an urban SVAT model. *Hydrological Processes*, 21, 2100-2111.  
 Hamdi, R. and V. Masson, 2008 : Inclusion of a drag approach in the town energy balance (TEB) scheme : offline 1-d validation in a street canyon. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47, 2627-2644.  
 Masson V., L. Gomes, G. Pigeon, C. Lioussé, V. Pont, J.-P. Lagouarde, J. Voogt, J. Salmond, T. R. Oke, J. Hidalgo, D. Legain, O. Garrouste, C. Lac, O. Connan, X. Briottet, S. Lachérade, P. Tulet, 2008 : The canopy and aerosol particles interactions in Toulouse urban layer (CAPITOUL) experiment. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102(3-4), 135-157.  
 Pigeon, G., D. Legain, P. Durand, and V. Masson, 2007 : Anthropogenic heat release in an old european city (Toulouse, France). *International Journal of Climatology*, 27, 1969-1981, doi :10.1002/joc.1530.

Les applications en météorologie, climat et suivi des surfaces continentales nécessitent une représentation précise des flux de surface et des variables du sol superficiel. Au cours de ce quadriennal, les travaux de recherche dans ce domaine ont visé à compléter la représentation du cycle du carbone dans le modèle ISBA. La version ISBA-CC simule les flux et réservoirs associés au cycle du carbone du sol (Gibelin et al., 2008). ISBA-CC utilise la paramétrisation de la photosynthèse d'ISBA-A-gs et calcule l'évolution de réservoirs de carbone correspondant à la biomasse aérienne et souterraine. Les validations sur les sites FLUXNET ont montré les bonnes performances de cette version d'ISBA pour la simulation des flux de chaleur sensible et latente ainsi que des flux nets de carbone (NEE). Des validations spatialisées sur la France de l'indice foliaire par comparaison avec des données satellitaires ont également été menées. Le code ISBA permet donc d'avoir une simulation cohérente de la végétation et des variables liées au cycle du carbone avec le cycle hydrologique. Les études réalisées avec le forçage SAFRAN sur la France permettent d'évaluer l'impact des conditions exceptionnelles de l'été 2003, de manière cohérente sur l'humidité du sol et l'indice foliaire (Fig. 1).

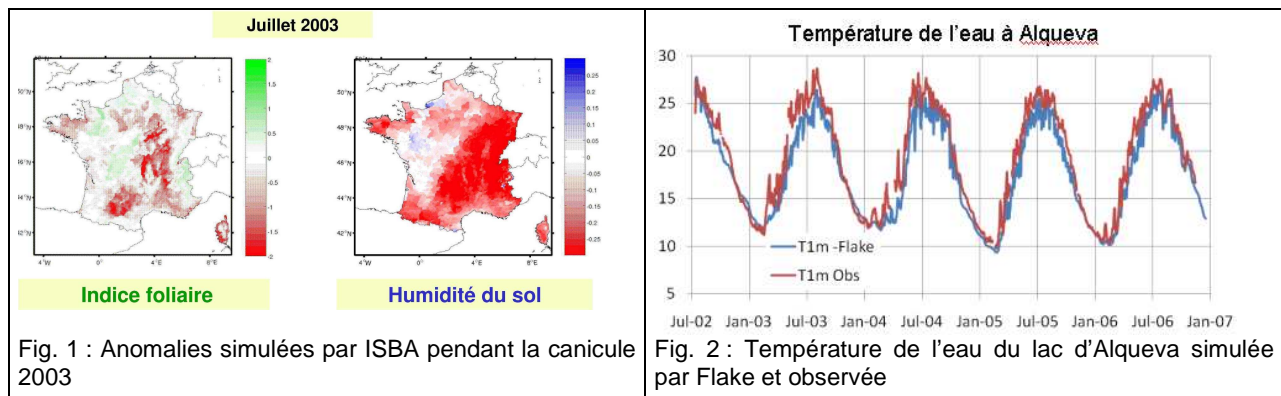


Fig. 1 : Anomalies simulées par ISBA pendant la canicule 2003

Fig. 2 : Température de l'eau du lac d'Alqueva simulée par Flake et observée

Afin d'améliorer la simulation des flux au-dessus des lacs dans les modèles météorologiques, le modèle unidimensionnel de lacs FLake a été testé en collaboration avec l'université d'Evora en mode forcé grâce à des données recueillies sur l'étang de Thau et au Portugal (Alqueva, Fig. 2), ainsi qu'en mode couplé avec l'atmosphère (Salgado et Le Moigne, 2010). La simulation de l'évolution de la température et de l'épaisseur de la couche de mélange permet une bonne estimation des flux de surface, moyennant la connaissance de la profondeur des lacs et du coefficient d'extinction de la lumière. Lors du séjour d'E. Kourzeneva (visiteur scientifique, U. St Petersburg), une base de données mondiale de profondeur de lacs (13000 données) a été créée, permettant à terme une utilisation pour des simulations régionales.

Au cours du quadriennal, le modèle de ville TEB a également été amélioré par la simulation explicite d'un profil atmosphérique dans la rue (Masson et Seity, 2009), ainsi que par l'introduction de la végétation dans les rues. Des travaux en cours portent sur l'introduction d'un bilan d'énergie séparé pour le sol et la végétation (Multi energy balance) dans ISBA. Ces développements, ainsi que l'ensemble des développements menés sur la surface par les différentes équipes du GAME travaillant sur la surface, sont intégrés dans le code de surface externalisé SURFEX, dont la gestion relève des activités de GMME. Ce code est maintenant très utilisé au sein du GAME et de Météo-France (modèles de prévision numérique AROME/ARPEGE, modèles de climat ARPEGE/ALADIN, modèle de recherche MESO-NH, modèles hydrologiques SIM et ISBA-TOPMODEL) et son utilisation se développe à l'extérieur du laboratoire. Un comité scientifique est en cours de constitution afin d'en assurer la gouvernance.

## Références

- Gibelin, A.-L., J.-C. Calvet, and N. Viovy, 2008 : Modelling energy and CO<sub>2</sub> fluxes with an interactive vegetation land surface model – Evaluation at high and middle latitudes, *Agric. For. Meteorol.*, 148, 1611-1628.
- Salgado, R. and Le Moigne, 2010: Coupling the Flake model to the SURFEX externalized surface model, *Boreal environment research*, 15, 231-244.
- Masson, V. and Y., Seity. Including atmospheric layers in vegetation and urban offline surface schemes *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48, 1377–1397.

Les études sur les processus et la modélisation des phénomènes atmosphériques à méso-échelle sont conduites au sein de GMME à l'aide des modèles Méso-NH et AROME. Le modèle de recherche communautaire Méso-NH est privilégié pour des applications de recherche à haute résolution (kilométrique, LES) ou pour les études de processus exploitant la richesse des diagnostics associés au modèle. AROME, grâce à son coût numérique plus faible et à son système d'assimilation 3D-VAR, est désormais utilisé pour les études sur la prévisibilité ou l'assimilation de données.

L'utilisation d'AROME dans un cadre opérationnel apporte une évaluation dans de nombreux types de situations météorologiques des paramétrisations physiques partagées avec Méso-NH, et motive en retour des améliorations de la représentation des processus physiques. L'amélioration de la représentation des nuages de couche limites et des thermiques secs à méso-échelle a ainsi constitué une priorité au cours du quadriennal pour ces modèles. Une avancée importante a été réalisée avec le développement d'un nouveau schéma de convection peu profonde dans Méso-NH et AROME (Pergaud, 2008 ; Pergaud et al., 2009). Une analyse statistique de simulations LES dans Méso-NH a également permis de caractériser les distributions de la variabilité nuageuse sous-maille, et a privilégié une distribution bi-modale plutôt que les distributions théoriques unimodales classiquement utilisées dans les modèles (Fig.1, Perraud, 2010 ; Perraud et al., 2011).

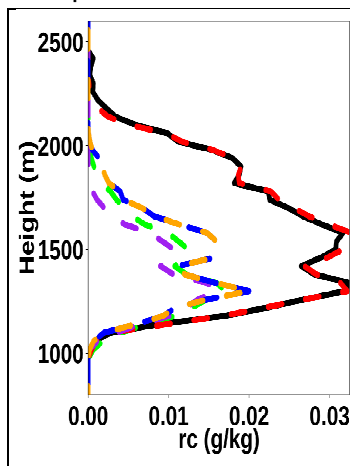


Fig. 1 : Profil vertical de contenu en eau nuageuse moyen pour le cas de cumulus ARM simulé par la LES (noir) et estimé par une distribution gaussienne (vert), une distribution triangulaire (violet), des distributions beta (bleu, orange) et une double distribution gaussienne (rouge).

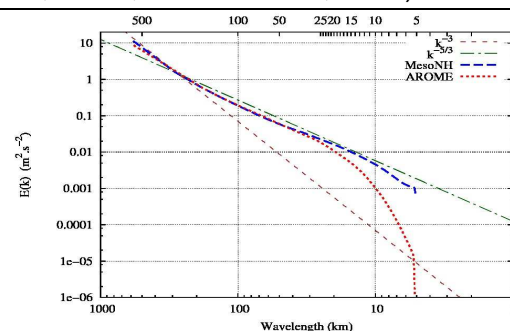


Fig. 2 : Spectres d'énergie cinétique dans l'atmosphère libre (entre 3 et 9 km) pour AROME (en rouge) et Méso-NH (en bleu) sur un cas de convection sur le Sud-ouest de la France. Les spectres théoriques en  $k^{-3}$  et  $k^{-5/3}$  sont aussi indiqués.

Plusieurs travaux ont démarré afin de préparer l'avenir de la prévision numérique du temps à haute résolution et les modèles à la nouvelle architecture des calculateurs massivement parallèles. Un enjeu prochain pour AROME porte sur son adaptation aux échelles sub-kilométriques, tandis que celui de Méso-NH est d'améliorer ses schémas numériques en termes de précision et d'efficacité, et de s'adapter aux grandes grilles pour les études d'interaction d'échelles afin de tirer parti au mieux des capacités des futures machines scalaires (Pantillon et al., 2011). Afin d'appréhender les échelles sub-kilométriques, une analyse des forces et faiblesses du modèle AROME est menée aux résolutions kilométriques et sub-kilométriques, en s'appuyant sur le modèle Méso-NH, pour des études de cas comparatives sur des situations convectives. La Figure 2 illustre sur un cas de cellules convectives une comparaison des spectres d'énergie cinétique pour les deux modèles par rapport aux pentes en  $-3$  et en  $-5/3$  caractéristiques de la gamme d'échelles simulées. Elle indique également une résolution effective un peu plus fine pour Méso-NH que pour AROME.

### Références

- Pantillon, F., P.Mascart, J.-P.Chaboureaux, C.Lac, J.Escobar and J.Duron, 2011 : Seamless Meso-NH modeling over very large grids. *C.R.Mecanique*. 339, 136-140.
- Pergaud, J.,2008: Etude et paramétrisation de la turbulence et des nuages de couche limite.Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, soutenue le 04 décembre 2008.
- Pergaud, J., V. Masson, S. Malardel, and F. Couvreux, 2009 : A parameterization of dry thermals and shallow cumuli for mesoscale numerical weather prediction, *Bound.-Layer. Meteor.*, 132, 83-106.
- Perraud, E., Vers une amélioration du schéma statistique de nuages de méso-échelle dans les modèles Arome et Méso-NH, Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier (Toulouse III), soutenue le 17 septembre 2010.
- Perraud, E., F.Couvreux, S.Malardel, V.Masson, C.Lac and O.Thouaron, 2011. Evaluation of statistical distributions for the parameterization of subgrid boundary-layer clouds. Accepted to *Boundary Layer Meteorology*.