

Recherche en prévision numérique du temps et recherche expérimentale

Les actions de recherche de Météo-France sont étroitement liées à son activité opérationnelle. Pour autant, il a semblé utile de mettre plus spécifiquement en exergue les actions menées pour mieux comprendre le comportement des phénomènes météorologiques et rendre la prévision météorologique encore plus fine et plus fiable : prise en compte d'observations issues de *Metop*, mise en place d'une nouvelle technique d'assimilation de données, mise en œuvre du nouveau modèle Arome, enrichissement des outils de prévision immédiate, amélioration de la prévision cyclonique sont quelques-unes des actions phares conduites en la matière en 2008.

Les exemples qui suivent illustrent les bénéfices d'expériences passées (Capitou, Flysafe) ou en cours (Toulouse-Fog) et montrent également combien les campagnes de mesures et d'observation de l'atmosphère restent des outils indispensables. Chaque étape de progrès est un véritable défi reposant sur des projets scientifiques de haut niveau et menés dans la plupart des cas en coopération avec d'autres organismes. C'est dans ce contexte que l'unité de recherche Game, résultant d'une association avec le CNRS, a vu en 2008 son excellence scientifique reconnue par l'agence d'évaluation Aeres.

Assimilation des données de l'interféromètre Iasi : pour une meilleure description de l'atmosphère

Le satellite défilant européen *MetOp*, lancé en octobre 2006, compte notamment à son bord l'instrument innovant Iasi (Interféromètre atmosphérique de sondage par l'infrarouge) : un interféromètre de Michelson, développé par le Centre national d'études spatiales (Cnes) en collaboration avec l'organisation européenne pour les satellites météorologiques (Eumetsat). Avec 8 461 canaux, cet instrument sonde un large spectre de fréquences dans l'infrarouge thermique et analyse en détail l'absorption de ces rayonnements par l'atmosphère : des informations d'un grand intérêt pour l'observation du temps que de nombreuses applications océanographiques.

Comme toute mesure de radiance satellitaire, avant leur assimilation dans les modèles de prévision, les données Iasi doivent être corrigées des biais éventuels, tels que ceux induits par la géométrie de visée. La correction variationnelle est une méthode qui s'ajuste chaque jour aux possibles variations

du biais ; devenue opérationnelle en février 2008, elle a permis de prétraiter les données Iasi de façon satisfaisante. Les mesures d'Iasi étant effectuées dans l'infrarouge, elles sont affectées par la présence de nuages ; une autre étape importante du prétraitement est donc la détection des nuages pour rejeter les informations affectées.

Depuis le 1^{er} juillet 2008, cinquante canaux Iasi sont assimilés au-dessus des mers libres, dans les modèles Arpège et Aladin, pour fournir des informations sur la température atmosphérique. Leur impact est particulièrement important sur les prévisions jusqu'à quatre jours d'échéance, dans les régions extratropicales et en particulier dans l'hémisphère Sud.

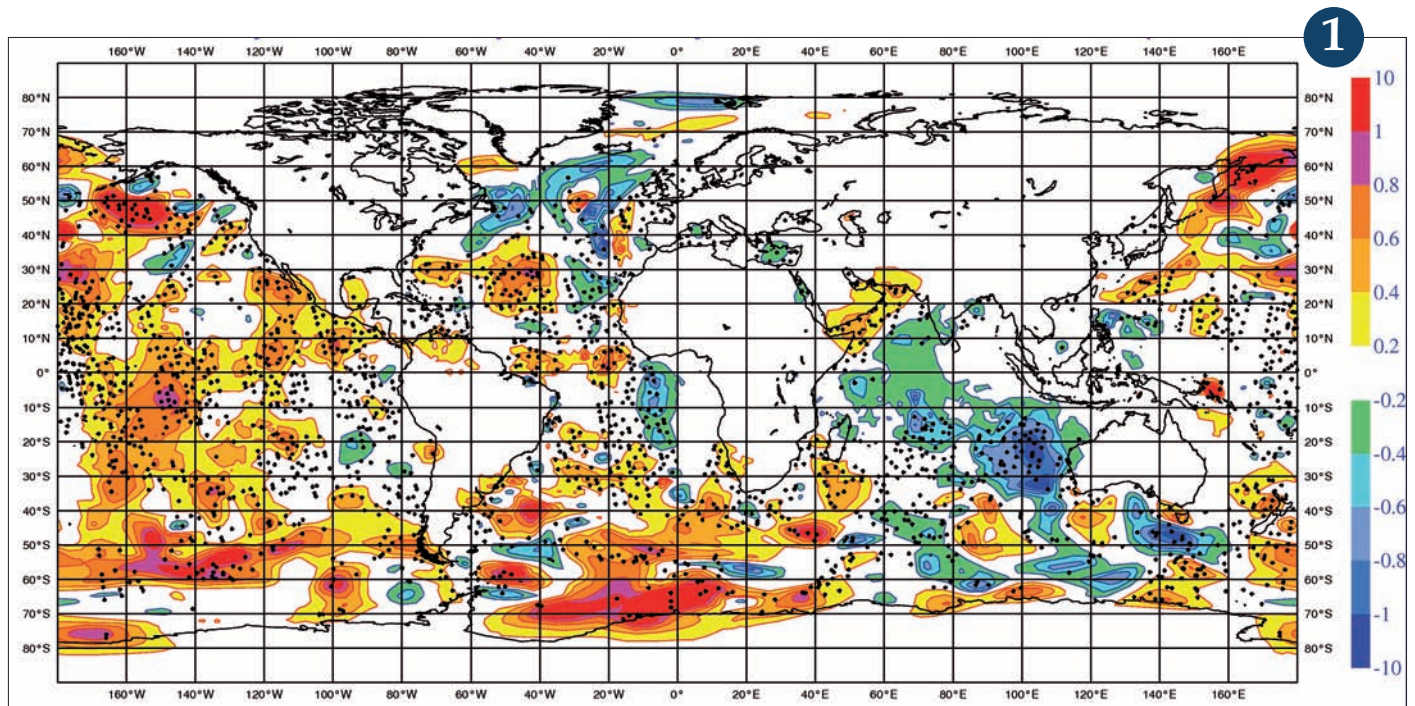
Les prochaines étapes permettront d'exploiter de nouveaux canaux fournissant des informations sur la température et l'humidité au-dessus des terres et des glaces de mer, ainsi que de mieux caractériser les nuages et l'émissivité de la surface terrestre. 1

Mise en œuvre opérationnelle d'une assimilation d'ensemble

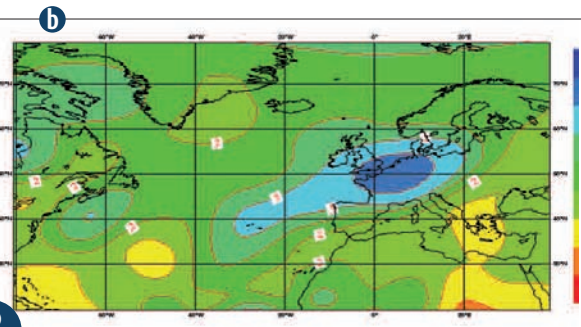
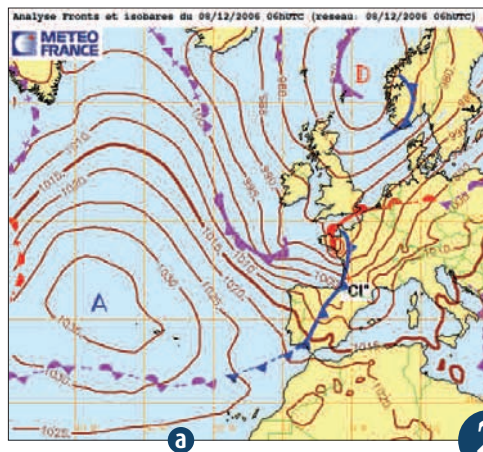
L'assimilation de données dans des modèles de simulation numérique tels qu'Arpège, Aladin ou Arome, permet de corriger régulièrement, à l'aide d'observations, l'état de l'atmosphère prévu. Elle s'appuie sur une caractérisation statistique des erreurs de prévision dont il convient tout d'abord de spécifier les amplitudes attendues : une tâche d'autant plus ardue que ces dernières dépendent fortement de la situation météorologique.

Le 1^{er} juillet 2008 un système d'assimilation variationnelle d'ensemble, reposant sur six assimilations variationnelles perturbées, a été mis en œuvre de façon opérationnelle : une première mondiale. La dispersion d'un tel ensemble d'assimilations permet d'estimer la dynamique spatio-temporelle des erreurs de prévision et de déterminer les régions critiques où l'on devra donner plus de poids aux observations pour réduire les incertitudes.

Il est prévu d'étendre l'utilisation de ce système, notamment pour fournir les conditions initiales perturbées nécessaires aux prévisions d'ensemble, estimer la structure spatiale des erreurs de prévision et prendre en compte l'influence de la situation météorologique sur la propagation des erreurs. 2



▲ Impact sur l'analyse des températures à 500 hPa de l'utilisation de cinquante canaux du capteur lasi.
Les incréments en plages de couleurs sont représentés en degrés Celsius.
Les croix indiquent l'emplacement des observations lasi utilisées dans l'analyse.

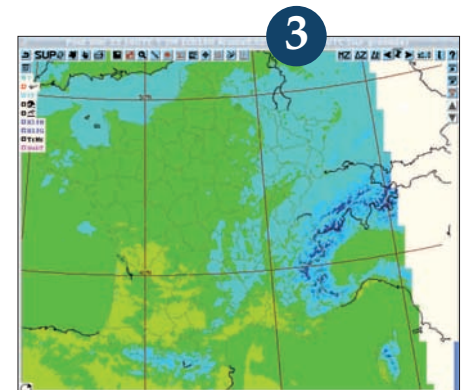


◀ Dépendance des erreurs de prévision à la situation météorologique, estimée à l'aide d'une assimilation d'ensemble.
(a) : champ de pression réduite au niveau de la mer, le 8 décembre 2006 (unité : hPa) ;
(b) : écarts-types des erreurs de prévision de l'ouragan vers 500 hPa (unité : 10^5 s^{-1}).

Un nouvel outil de prévision opérationnelle à haute résolution : Arome

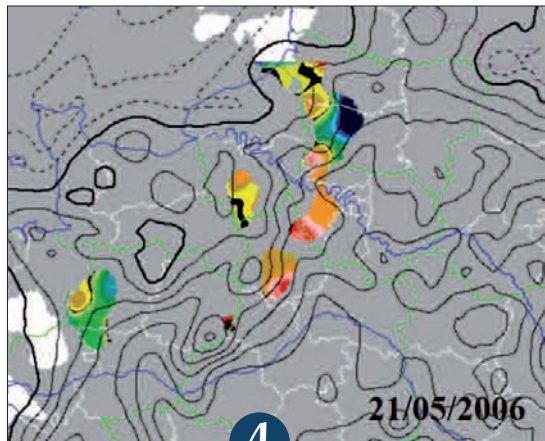
Le 18 décembre 2008, le système de prévision opérationnelle de Météo-France s'est enrichi d'un troisième modèle destiné aux prévisions à haute résolution : Arome a été déclaré opérationnel pour l'utilisation par les prévisionnistes de Météo-France en métropole et pour l'élaboration des produits météorologiques. Avec une définition (dimension des mailles de calcul) horizontale de 2,5 km, Arome couvre un domaine qui englobe la métropole. Il est couplé au modèle Aladin qui lui fournit des informations sur les caractéristiques de l'environnement à plus grande échelle. Son cycle tri-horaire d'assimilation de données utilise les mêmes observations que son coupleur Aladin, mais aussi les mesures de vent effectuées à partir des radars doppler. Les dernières interventions sur le modèle, réalisées au début de l'automne 2008, ont permis de corriger certains défauts réperto-

riés pendant l'évaluation du prototype : circulation irréaliste des vents de couche limite et surestimation des précipitations intenses. Ces améliorations ont pu être mises en place grâce à l'utilisation du schéma de convection peu profonde EDKF (Eddy-Diffusivity-Kain-Fritsch) et l'activation, pour le calcul des variables hydrométéores, du schéma de diffusion numérique SLHD (Semi Lagrangian Horizontal Diffusion) développé dans le cadre du programme Aladin et utilisé par nos partenaires dans certaines versions opérationnelles. Pour favoriser la prise en main de ce nouveau modèle, la formation de l'ensemble des prévisionnistes de métropole, commencée à l'automne 2008, se poursuivra jusqu'au premier trimestre 2009.



▲ Température à 2 m prévue par Arome pour le 25 février 2009 à 14 h UTC à partir du réseau du 25 février 00 h UTC (visualisation sur le poste de travail du prévisionniste).

Évolution de l'intensité des orages en 45 minutes (plages de couleurs) et mesure d'instabilité de l'atmosphère (isolignes noires) dans le nord de la France. Les couleurs chaudes représentent une intensification, les froides un affaiblissement. Les isolignes en pointillés montrent une instabilité en-deçà d'un certain seuil, et celles en trait plein une instabilité supérieure.



4

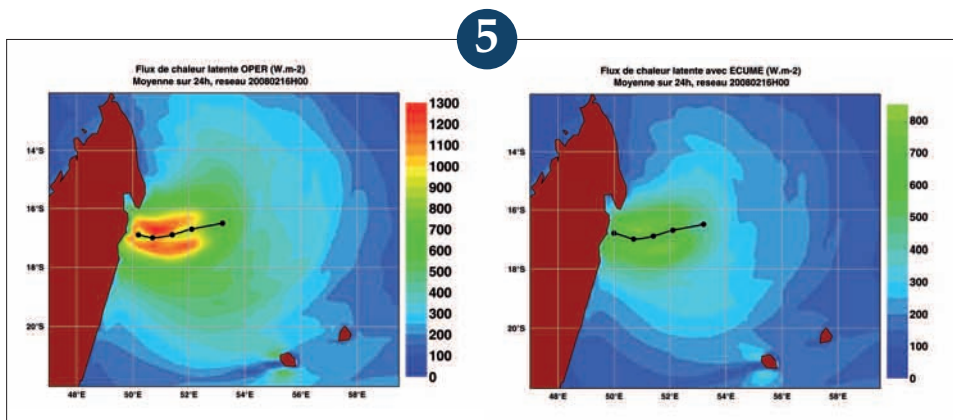
Amélioration de la prévision des orages à deux heures d'échéance

Les orages sont des phénomènes météorologiques qui se développent et évoluent de manière très rapide. Leur durée de vie excède rarement quelques heures et leur prévision est un véritable défi. Les modèles numériques de prévision du temps n'apportent pas une réponse suffisamment rapide et détaillée pour traiter les échéances inférieures à deux ou trois heures, alors que l'extrapolation du mouvement des orages observés (par radar, satellite ou par capteurs de détection de la foudre) est adaptée à des échéances ne dépassant pas une heure.

En 2007 et 2008, une étude a été menée pour mettre en relation l'évolution d'intensité des orages avec un certain nombre de paramètres influençant la dynamique des orages : instabilité qui contraint les mouvements verticaux, soulèvements nécessaires au déclenchement des instabilités, convergence des vents de basse couche, etc. La nouveauté de l'approche a consisté à utiliser conjointement le système d'analyse variationnelle VarPack à haute cadence temporelle (15 minutes) pour décrire l'atmosphère en tirant le meilleur parti du réseau d'observation de surface, et un modèle statistique pour prévoir l'évolution des orages observés.

Après un premier réglage, la prévision à deux heures d'échéance de l'intensité des orages en terrain plat peut être considérée d'un niveau qui varie entre « moyen » et « bon ». Certains réglages devront être améliorés et la méthode sera confrontée à de nouveaux cas avant d'envisager sa mise en œuvre opérationnelle.

4



▲ Flux de chaleur latente simulés par Aladin-Réunion dans le cas du cyclone Ivan (trajectoire en noir), le 16 février 2008, dans le sud-ouest de l'océan Indien.

A gauche apparaissent les flux de la paramétrisation actuelle et à droite ceux de la paramétrisation en développement « Ecume ». On note de grandes différences entre les deux champs, surtout au voisinage de l'œil du cyclone.

Prévision des cyclones tropicaux : vers une meilleure prise en compte des caractéristiques de l'océan

Un des processus clés dans le développement et le cycle de vie d'un cyclone tropical est son interaction avec l'océan : une interaction qui dépend fortement de la température de surface de la mer et des variables atmosphériques de basses couches. La modélisation des flux entre l'océan et l'atmosphère permet de prendre en compte ces échanges. Dans un premier temps, une nouvelle analyse de la température de surface de la mer à haute résolution spatiale, intégrant des données satellitaires nombreuses et variées, a été testée. Il s'agit du produit Odyssey développé dans le cadre du projet européen Mersea (Marine Environment and Security for the European Area). Une nou-

velle paramétrisation des flux, nommée Ecume, a ensuite été évaluée dans le modèle Aladin-Réunion. Mise au point à l'issue de nombreuses campagnes de mesures, cette paramétrisation est plus réaliste que les précédentes et modifie de façon importante la représentation des échanges en présence de vents forts, ce qui a un impact significatif sur la modélisation des cyclones. Conjointement à un réglage adéquat des paramétrisations physiques du modèle atmosphérique, Ecume améliore les prévisions des cyclones tropicaux sur le bassin sud-ouest de l'océan Indien. Ces travaux seront poursuivis en couplant les modèles d'océan et d'atmosphère.

5

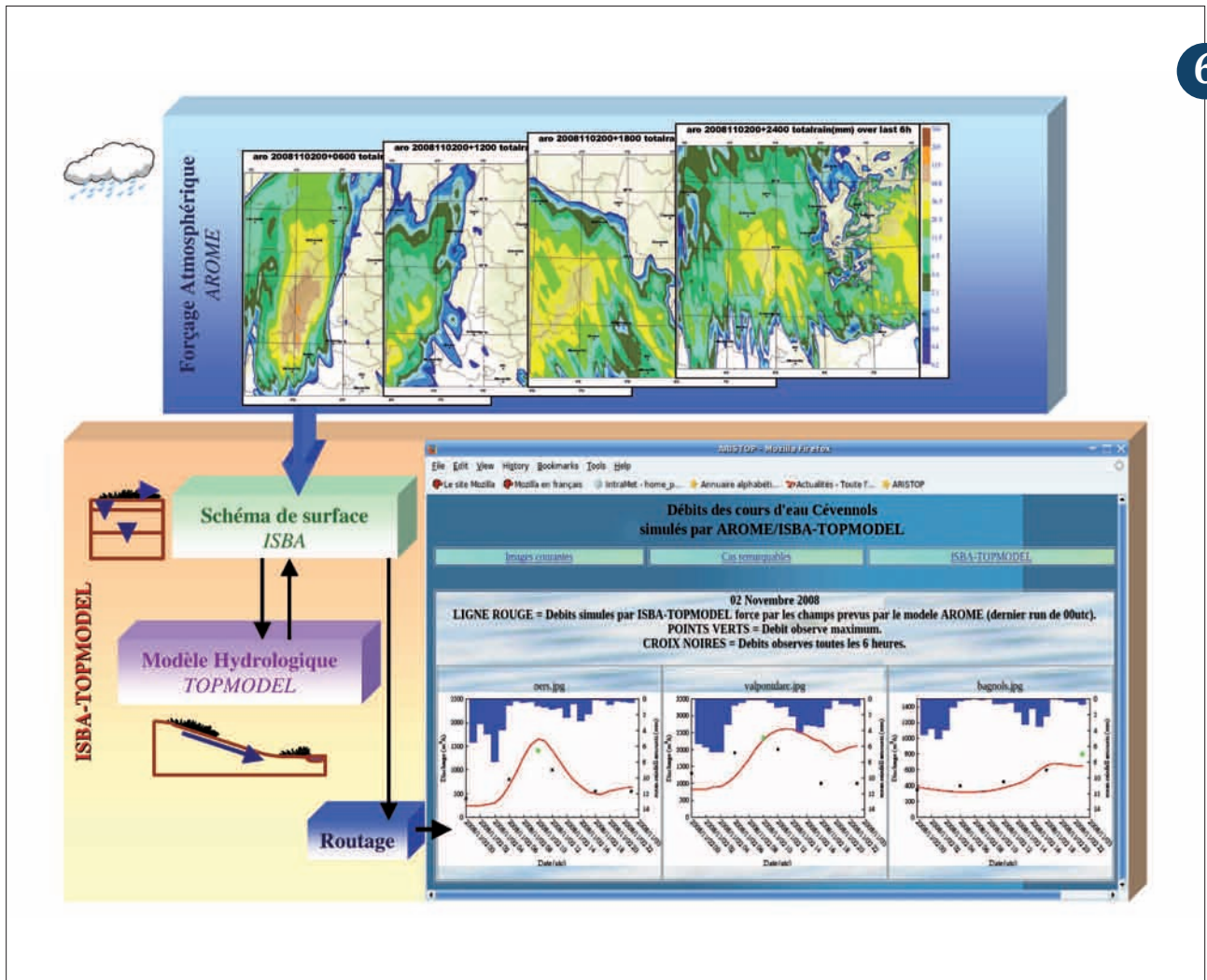
Prévision des crues rapides : le système couplé Arome/Isba-Topmodel

En automne, les bassins versants cévenols sont souvent concernés par des phénomènes pluvieux intenses susceptibles d'engendrer des crues-éclair. La prévision de ces phénomènes n'est pas toujours aisée car sensible à la fois à la prévision des précipitations et à la réponse des sols et des cours d'eau. Pour prévoir le développement des crues rapides, le modèle hydrologique Topmodel (Topography based hydrological Model) a été couplé au schéma de surface Isba utilisé dans les modèles météorologiques Meso-NH et Arome. Isba gère l'interface sol-atmosphère et les bilans en eau sur des colonnes, alors que de son côté Topmodel réalise les transferts latéraux de l'eau dans le sol des bassins versants. Le ruissellement de subsurface et le drainage profond prévus sont ensuite routés vers un exutoire où sont évalués les débits. Depuis septembre 2008, ce système couplé Isba-Topmodel tourne tous les jours en utilisant

comme donnée d'entrée la prévision de 00 h UTC du modèle Arome. L'automne 2008 a été marqué par deux épisodes de pluies intenses sur les Cévennes : les 21 et 22 octobre, puis le 1^{er} et le 2 novembre. Dans les deux cas, la chaîne hydrométéorologique Arome/Isba-Topmodel a permis de simuler de manière satisfaisante les débits des trois principaux cours d'eau cévenols (Gardon à Ners, Cèze à Bagnols et Ardèche à Vallon-Pont-d'Arc) avec une chronologie de la crue bien simulée et des pics prévus du même ordre de grandeur que ceux observés.

Si ces résultats préliminaires sont encourageants, la prévision de débit reste toutefois très fortement liée à celle de la pluie et les erreurs de localisation des cellules pluvieuses peuvent s'avérer très préjudiciables. L'étape suivante tentera donc de quantifier cette incertitude en développant une méthode de prévision hydro-météorologique d'ensemble.

6



▲ Principe de fonctionnement de la chaîne hydrométéorologique Arome/Isba-Topmodel et résultats obtenus pour la journée du 2 novembre 2008.

Évaluation des énergies échangées entre surfaces urbaines et atmosphère

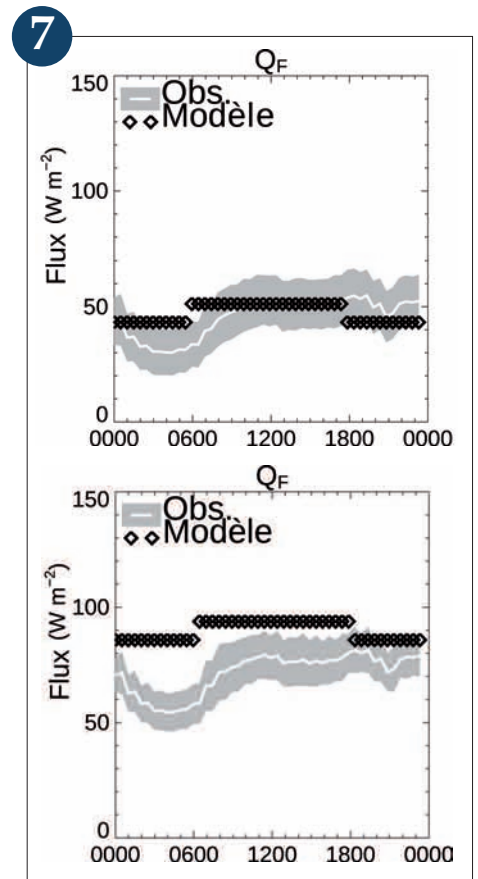
En 2008, le modèle TEB (Town Energy Budget), dédié au calcul des échanges d'énergie entre les surfaces urbaines et l'atmosphère, a été évalué sur les données de la campagne de mesures Capitoul, menée sur Toulouse entre 2004 et 2005.

Les mesures de bilan d'énergie ont mis en évidence l'importance du dégagement de chaleur par les activités humaines (chauffage domestique principalement) en zone urbaine pendant la période hivernale, et ont permis d'évaluer la capacité du modèle TEB à reproduire ce flux pour l'automne et l'hiver. Le terme de chauffage, qui dépend fortement des conditions météorologiques, est paramétré dans le modèle, mais il n'avait jamais pu être évalué. Les premiers résultats sont très satisfaisants puisque le modèle a été capable de reproduire ce terme à 5 % près pendant la période automnale et à 25 % pendant la période hivernale. Une expérience a ensuite été menée pour comparer les flux infrarouges restitués avec ceux des modèles de plusieurs laboratoires :

Office national d'études et recherches aérospatiales (Onera), École centrale de Nantes (ECN), Centre d'étude spatiale de la biosphère (Cesbio), et Centre de recherche méthodologique d'architecture (Cerma). Le modèle TEB s'est montré très performant dans la restitution des flux infrarouges à la fois sur deux cas idéalisés de canyon urbain, mais également à l'échelle du quartier du site de mesure de l'expérience Capitoul. Les futurs travaux porteront notamment sur l'amélioration du calcul du dégagement de chaleur associé au chauffage et incluront un calcul du terme associé à l'usage des climatiseurs qui devient sensible en période de canicule.

7

► Cycle journalier moyen des dégagements de chaleur par l'activité humaine observé pendant la campagne Capitoul (courbe blanche et écart-type en grisé et reproduit par le modèle TEB (losanges noirs) en automne (en haut) et en hiver (à droite).



8


Toulouse-Fog : une campagne de mesures dédiée au brouillard

L'influence des hétérogénéités de surface et des aérosols atmosphériques sur le cycle de vie du brouillard fait l'objet de nombreuses études.

Une première campagne de mesures, nommée Paris-Fog, s'était déroulée au cours de l'hiver 2006-2007 en région parisienne en collaboration avec l'Institut Pierre-Simon-Laplace (IPSL) et le Centre d'enseignement et de recherche en environnement atmosphérique (Cerea, laboratoire commun EDF et ENPC). De manière continue, pendant cinq mois, Paris-Fog a permis de documenter précisément différents processus intervenant dans le cycle de vie du brouillard : de sa formation à sa dissipation.

A la suite de ces observations, il a été décidé d'organiser une nouvelle campagne de mesures, Toulouse-Fog, en région toulousaine, pour mieux documenter les aspects microphysiques des brouillards. Les données enregistrées au cours de l'hiver 2007-2008 sont maintenant en cours d'analyse avec pour objectif d'améliorer les paramétrisations physiques dans les modèles de prévision.

8



▲ Mât instrumenté mis en place dans le cadre de la campagne Toulouse-Fog. Ce dispositif permet des mesures de température et d'humidité à 0,5, 1, 2, 5 et 10 m de hauteur, ainsi que des mesures du vent à 10 m.