

Performances comparées de données météorologiques issues de modèles et de mesures : application aux prévisions et à l'interpolation de concentrations d'ozone en Bourgogne

Richard Yves, Houzé Marie-Laure et Castel Thierry

Centre de Recherches de Climatologie, UMR 5210 CNRS/université de Bourgogne, 6 Bd Gabriel, 21000 Dijon, France.

Introduction

Dans les sciences du climat, la question fondamentale peut être résumée par le trivial « Quel temps fait-il? ». Cette question se décline selon que soit concerné un point, une surface (plan ou coupe), un volume ou un espace quadri-dimensionnel (l'atmosphère ou une portion de l'atmosphère pendant un temps de durée t). Pourquoi veut-on connaître le temps qu'il fait? Par simple curiosité (seuls l'enfant ou/et le scientifique sont dans ce cas)? Pour faire autre chose avec? Aller à la chasse, à la pêche ou à la guerre ; ou bien semer, arroser, biner, récolter, rentrer ou sortir les bêtes? En effet, « du temps qu'il fait » dépend l'aptitude des animaux à nous voir, sentir et entendre ; l'aptitude des végétaux à germer, à fixer la chlorophylle ; notre aptitude à nous déplacer par voie terrestre, par voie d'eau ou par voie aérienne (co-latéralement à émettre des oxydes d'azote et de carbone....) ; la propension de molécules à se marier ($\text{NO}_2 + \text{O}_2 + \text{uv} \rightarrow \text{O}_3 + \text{N}_2 + \text{O}_2$) ou à divorcer ($\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}_2$).

Mais comment-fait-on pour connaître le temps qu'il fait? Si la question se rapporte à « Ici » et « maintenant », nous pouvons utiliser nos sens : la vue (soleil, nuages....), l'ouïe (chaleur, humidité,...), le goût : (la pluie, ...), l'odorat (la pluie sur le sol, l'humidité du sol, ...), le toucher (la température, le rayonnement direct, ...). Nous utilisons aussi parfois des médias : hauteur de vol des hirondelles, chant des crapauds, ou des instruments de mesure (thermo, hydro, anémo, pyrano, mètres). Mais Quand nos sens ne suffisent pas et que l'on ne peut pas mesurer? Lorsqu'il s'agit de connaître le temps qu'il fait « là-bas » ou « après »? Exemples :

- 1/ derrière la montagne, dans la vallée ?
- 2/ cette nuit ?
- 3/ demain ?
- 4/ l'été ?

Nous faisons alors appel à notre imagination. Celle-ci nous dit que :

- 1/ derrière la montagne, dans la vallée, l'air est malsain ;
- 2/ cette nuit il fera sombre et frais ;
- 3/ demain le vent va se lever et il va pleuvoir ;
- 4/ avec l'été viendra la chaleur.

Notre imagination renvoie en fait à des représentations, des modèles. Les modèles mobilisés peuvent être simples ou complexes :

- 1/ L'air est malsain car les usines polluent ;
- 2/ Il fera plus sombre et plus frais car la nuit, le soleil est couché ;
- 3/ Le vent va se lever et il va pleuvoir car « *rouge du matin, pluie en chemin* ».

Note : si l'on combine 1/ et 3/, la perturbation lessivera l'air qui, même dans la vallée, deviendra plus sain.

- 4/ Chaleur estivale car le soleil est haut dans le ciel et les journées longues.

L'idée première est que, par essence, on connaît plus précisément le temps qu'il fait ici et maintenant plutôt que là bas ou demain. Et par là même, implicitement que les mesures sont plus précises que les modèles. Mais si l'on testait ceci? La problématique devient : entre mesures et modèles, qui est le plus performant? Ceci est appliqué à deux cas concrets où connaître le temps qu'il fait est nécessaire pour estimer les concentrations en ozone « demain » et « ailleurs », ce en Bourgogne.

Application 1 : prévisions des concentrations en ozone pour le lendemain en Bourgogne

L'enjeu est de prévoir les concentrations maximales en ozone pour le lendemain dans 12 stations des Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) ATMOSF'air de Bourgogne (Figure 1). Pourquoi ces choix ? Les prévisions au lendemain sont demandées par la Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie (LAURE). Les stations des ASQAA sont les seuls endroits où l'on peut confronter les prévisions (issues de modèles) à des observations (issues de mesures).

Comment faire ces prévisions? Nous avons mis en oeuvre un grand classique de la statistique explicative : la régression linéaire pas à pas (stepwise). Nous avons pour cela préalablement défini un échantillon d'apprentissage (on joue en trichant car on connaît le résultat) : il s'agit de 183 jours (1 avril - 30 septembre) que multiplie 3 ans (1999-2001) = + de 500 jours. Celui-ci a permis d'élaborer un modèle par station. Les 12 modèles ont ensuite été testés sur un échantillon de validation (on ne triche plus) de 183 jours (1 avril - 30 septembre 2002).

Comment sont bâtis les modèles ? Le prédicand, ou variable dépendante que l'on veut prévoir, est constitué de la concentration maximale d'ozone du lendemain. Sur la période d'apprentissage cette valeur connue. Une batterie de prédicteurs, ou variables indépendantes supposées susceptibles d'expliquer le prédicand car physiquement liées à ce dernier, est élaborée. Un premier groupe émane de la composition chimique de l'atmosphère. Ils s'agit de précurseurs azotés de l'ozone (NO et NO₂) mesurées dans les 12 stations ATMOSF'air (Figure 1) et de l'ozone du jour mesuré sur les mêmes sites et supposés persister (au moins un peu....) d'un jour sur l'autre. Le deuxième groupe de prédicteurs regroupe des variables météorologiques. Le problème est que, compte tenu des fortes fluctuations météorologiques observées d'un jour à l'autre (problème particulièrement aigu aux latitudes moyennes), les valeurs du jour sont peu explicatives de celles du lendemain. Il nous faut donc les valeurs du lendemain. Comment les connaître ? Tout le problème est là.

Stratégie 1 : mode prévisibilité

On triche (on connaît les cartes de l'adversaire). Cela porte un nom : la « prévisibilité ». On ne prévoit pas, mais on regarde si le système est prévisible. Concrètement : on travaille *a posteriori* en utilisant des mesures météorologiques (Température, Pression, Humidité, Composantes zonale et méridienne du vent, Rayonnement Global, Précipitations) du lendemain. Dans notre exemple d'application, ces mesures sont effectuées en routine dans trois stations Météo France (Dijon-Ouges, Chalon Champforgeuil et Macon Champlevet) situées à proximité des 12 stations ATMOSF'air (Figure 1). On suppose, à tort ou à raison, mais on est contraint par le réseau, que le temps qui y est noté ne doit pas être bien différent de celui qui prévaut dans les environs, et tout particulièrement sur les sites des stations ATMOSF'air.

Les résultats des régressions obtenues sur ces bases, en mode prévisibilité, indiquent que les performances sont stables lorsque l'on passe de l'apprentissage à la validation (Tableau 1). Ils montrent également que pour les trois stations ATMOSF'air présentées, situées dans des agglomérations différentes, les performances sont similaires. Ceci montre, et sans juger de leurs performances (R^2 = Coefficient de détermination et LEPS = Linear Error in Probability Space, et de l'ordre de 60% de variance expliquée ou prévisible), que ces modèles ont le mérite d'être robustes. Le système, ne serait-ce que sur ces bases sommaires, est en bonne partie prévisible.

Stratégie 2 : mode prévision

On ne triche plus (on imagine que l'adversaire tient entre ses mains les cartes suivantes). Cela porte un nom : la « prévision ». On utilise des données issues de modèles, ou prévisions météorologiques pour le lendemain. Nous avons sélectionné des prévisions pour 3 points de grille de 10Km côté issues du Modèle ALADIN de Météo France. Les simulations sont réalisées à 00h00 UTC. Nous

avons analysé les échéances 27h00 et 36h00 prévoyant respectivement les conditions météorologiques du lendemain pour 03h00 (05h00 locales) et 12h00 (14h00 locales) UTC, supposées représenter schématiquement les conditions météorologiques de fin de nuit et de pleine journée (donc les plus fraîches et les plus chaudes par exemple). Les variables retenues sont : température, pression, humidité relative, composantes zonale et méridienne du vent, rayonnement global et précipitations. Ces grandeurs sont prévues sur 11 niveaux d'altitude (du sol à 1500 m).

Les résultats des regressions élaborées en mode prévision montrent que lorsque l'on passe de la période d'apprentissage la période de validation, les performances sont stables, voir meilleures (Tableau 2). Ce paradoxe apparent pose une première question? Réponse : amélioration liée à des versions plus récentes d'ALADIN, modèle de prévision météorologique qui progresse donc. Par ailleurs, les performances sont plus variables, selon la station (ou l'agglomération), qu'en mode prévisibilité. Pourquoi? Hypothèse : la maille ALADIN peut être bien représentative des conditions météorologiques qui prévalent sur une agglomération. C'est cas de Macon où la maille, à l'image de l'agglomération, est intégralement située en plaine de Saône. Mais parfois, le découpage régulier fait qu'elles le sont moins comme l'illustre l'exemple dijonais. La maille ALADIN est à cheval sur le plateau (situé à 500 m d'altitude) et la plaine (à guère plus de 200m). Enfin, le plus surprenant est le niveau de performance : 75% de variance expliquée. 15 points de plus qu'en mode prévisibilité. Seule explication possible : la description des conditions météorologiques utilisée est plus opérationnelle lorsque l'on se base sur les prévisions ALADIN que sur les observations. Pourquoi ? Parce que les mesures ne concernent qu'un petit nombre de variables météorologiques, qu'elles sont limitées à quelques points éventuellement peu représentatifs des alentours (effet du site) et qu'elles ne sont effectuées que sur une seule couche de l'atmosphère : 2m.

Moralité ? Les tricheurs ont perdu. Vive les modèles. Bravo Météo-France. « Pour connaître utilement le temps de demain, par exemple pour prévoir l'ozone, rien ne sert d'attendre, utilisons les prévisions météorologiques disponibles aujourd'hui et plus performantes que les mesures qui ne seront effectuées que trop tard : demain ». Victoire indiscutable des modèles sur les mesures. Bien sur, les partisans des mesures diront que les dés sont pipés, puisque d'un côté on a des informations limitées à la surface, alors que de l'autre on travaille sur une colonne d'air de 1500m. C'est vrai. Mais combien de sites sont équipés de radio-sondages?

Application 2 : spatialisation des concentrations en ozone en Bourgogne lors de 6 journées d'août 2000

En 2000, une importante campagne de mesures a été coordonnée par les AASQA ATMOSF'air. Conformément à la LAURE qui précise qu'*« un dispositif de surveillance de la qualité de l'air et de ses effets sur la santé et sur l'environnement sera mis en place au plus tard : pour le 1er janvier 1997 dans les agglomérations de plus de 250 000 habitants, pour le 1er janvier 1998 dans les agglomérations de plus de 100 000 habitants, et pour le 1er janvier 2000 pour l'ensemble du territoire national. »*, il s'agissait d'effectuer des mesures de concentrations d'ozone sur l'intégralité du territoire régional. Compte tenu des moyens disponibles, le choix effectué fut de disposer des échantillonneurs passifs sur 115 sites (Figure 2). Le critère retenu fut : un point par maille de grille de 30 km de côté. Les sites furent sélectionnés en fonction d'un compromis permettant d'être à la fois les plus représentatifs de la maille correspondante et d'être situés à proximité d'un bénévole Météo-France. Il convenait en effet d'effectuer des manipulations synchrones en 115 points différents.

Les échantillonneurs passifs permettent d'effectuer des mesures qui ne sont ni instantanées ni exactes. Dans les conditions utilisées, l'erreur de mesure associée a été estimée à 26,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le protocole prévoyait 10 mesures, effectuées sur deux périodes disjointes, constituées pour chacune d'entre-elles de 3 journées (08h00 – 16h00 UTC) et de 2 nuits (16h00 – 08h00 UTC). Le

déclenchement de la procédure reposait sur les prévisions météorologiques de Météo France, avec un choix délibéré : sélectionner des périodes propices à de fortes concentrations en ozone, à savoir des périodes estivales de beau temps chaud et stable, associées à des conditions anticycloniques persistantes. L'été 2000 a été bien avare en la matière (comme quoi 2007 n'est pas si original que l'on voudrait bien le croire). Ainsi, à défaut de conditions souhaitées entre mai et juillet, le premier déclenchement a concerné la période du 09 au 11 août 2000, le second du 24 au 26 août. La cartographie point à point des concentrations mesurées montre de fortes variations dans le temps, d'un jour à l'autre (Figure 3). En revanche, les concentrations varient moins et de manière non systématique (pas de configurations spatiales récurrentes) dans l'espace.

A partir de là, la question initiale « *Peut-on estimer les concentrations en ozone en tout point?* » reste-t-elle réaliste? Oui, mais à condition que l'on connaisse correctement en tout point les concentrations en précurseurs et les conditions météorologiques. Qu'en est-il? Concernant les précurseurs, pour toute la Bourgogne : seul les NO_x sont mesurés, et ce en une douzaine de stations qui de surcroît sont concentrées dans les principales agglomérations de la plaine de Saône (Figure 1). Concernant les conditions météorologiques, la situation est moins catastrophique. Les stations Météo France sont bien réparties et relativement nombreuses, sur certaines variables tout au moins (37 pour le vent, 9 seulement pour le rayonnement global). De surcroît, l'application précédente, dédiée à la prévision, a démontré que les mesures pouvaient être utilement complétées (voir remplacées) par des simulations issues du modèle méso-échelle ALADIN. Nous avons donc considéré les conditions météorologiques prévues à échéance 27h et 36h, à savoir pour 03h00 et 12h00 UTC, ce respectivement pour l'ensemble des nuits et des journées considérées. Les prévisions ALADIN concernent l'ensemble des mailles (Figure 4).

Le problème est que les températures (grandeur en général parmi les mieux prévues) peuvent être très différentes entre le modèle et les mesures (Figure 5). Des écarts de 10°C sont observés. Notons également que si les écarts sont souvent du même signe sur tout la Bourgogne, les gradients thermiques résultant sont parfois très différents.... Concernant les vents, leurs vitesses sont surestimées dans ALADIN (Figure 6) ou sous-estimées par les mesures que le nombre réduit rend peu représentatives de l'ensemble de la Bourgogne. Leurs directions (Figure 7) ne sont souvent pas en adéquation entre de trop rares stations de mesures où des effets de sites sont potentiellement importants et rendant ainsi les simulations difficiles à valider.

Compte tenu de toutes ces difficultés, mesures et modèles se sont avérés tous les deux fournir des indications bien incomplètes d'un côté, bien imprécises de l'autre. Force est de reconnaître que, même pour un pays comme la France disposant d'un excellent réseau météorologique et de modèles de prévisions numériques tournant aujourd'hui en routine, on ne dispose pas d'informations permettant de connaître correctement, à savoir utilement pour une application avale, le temps qu'il fait en tous points. Pour revenir à la question de départ : on ne sait pas bien quel temps fait-il ou a-t-il fait « là bas ». Quelles solutions dans un avenir proche? Multiplier les stations de mesures. C'est économiquement peu probable et serait quoiqu'il arrive, car par essence, jamais à la hauteur de l'attente. L'alternative? Utiliser des modèles méso-échelles plus aptes à reproduire des phénomènes d'échelle fine. Cela suppose qu'ils prennent bien en compte les échanges avec la surface, et par là même que les états de surface soient correctement appréhendés. Nous nous employons au CRC à développer ceci en utilisant WRF doté d'un LSM.

Conclusion

Lorsque l'on veut savoir le temps qu'il a fait, qu'il fait ou qu'il va faire, allons chercher ou générons observations et sorties de modèles. Ne réservons pas les sorties de modèles aux problématiques se heurtant à l'absence d'observation, typiquement « le temps qu'il va faire ». Les deux jeux de

données, lorsqu'ils ont le mérite d'exister, offrent des informations le plus souvent complémentaires. Obtenues sur des bases totalement indépendantes, les informations qui en sont issues seront jugées robustes si elle convergent. Si ce n'est pas le cas, le fait qu'elles divergent conduira l'utilisateur à faire émerger des questionnements souvent riches.

Qui sort vainqueur de ce duel? Tout le monde, à savoir observateurs et modélisateurs, dès lors que les scientifiques du climat acquièrent ce réflexe : compte tenu de ma problématique, sur quelles observations **et** sur quelles simulations puis-je m'appuyer?

Figure 1 : Les stations des ASQAA ATMOSF'air en 2000

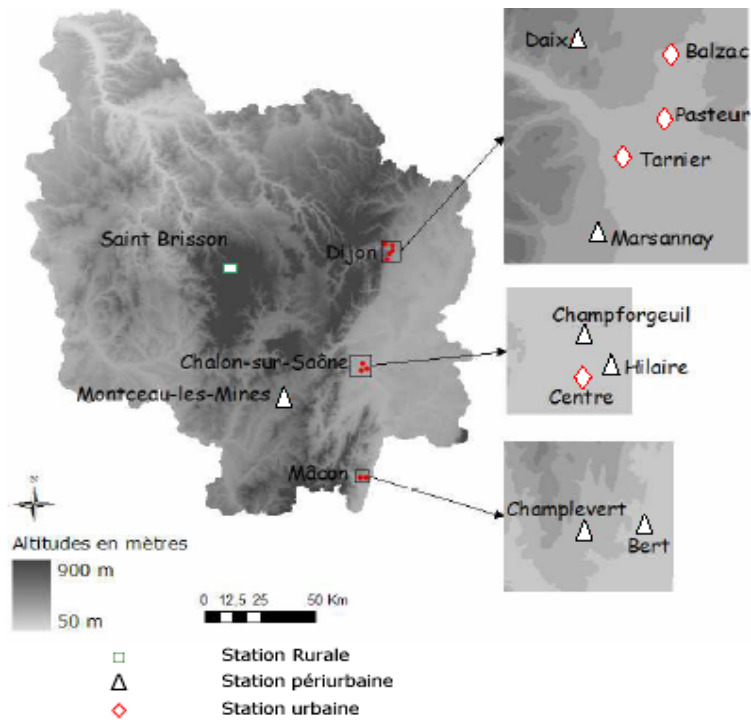


Figure 2 : Sites échantillonnés lors de campagne de mesure de l'ozone en d'août 2000

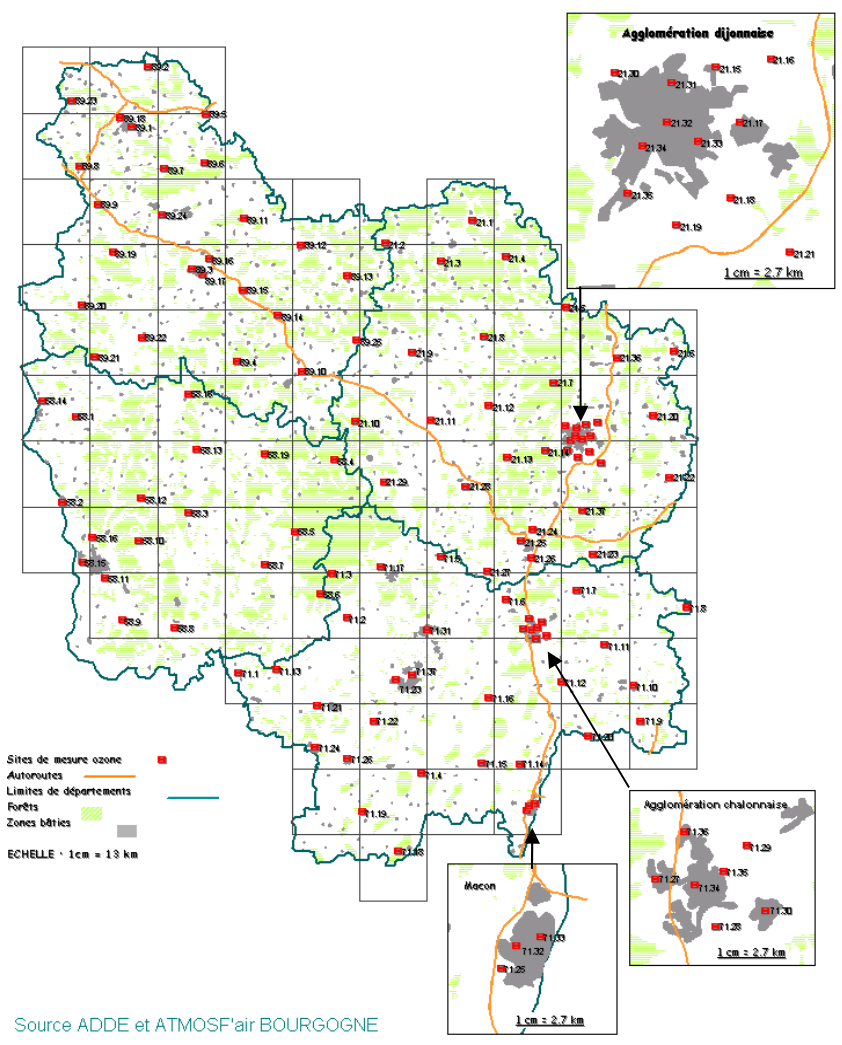


Figure 3 : Concentrations d'ozone mesurées lors des deux périodes de 3 jours

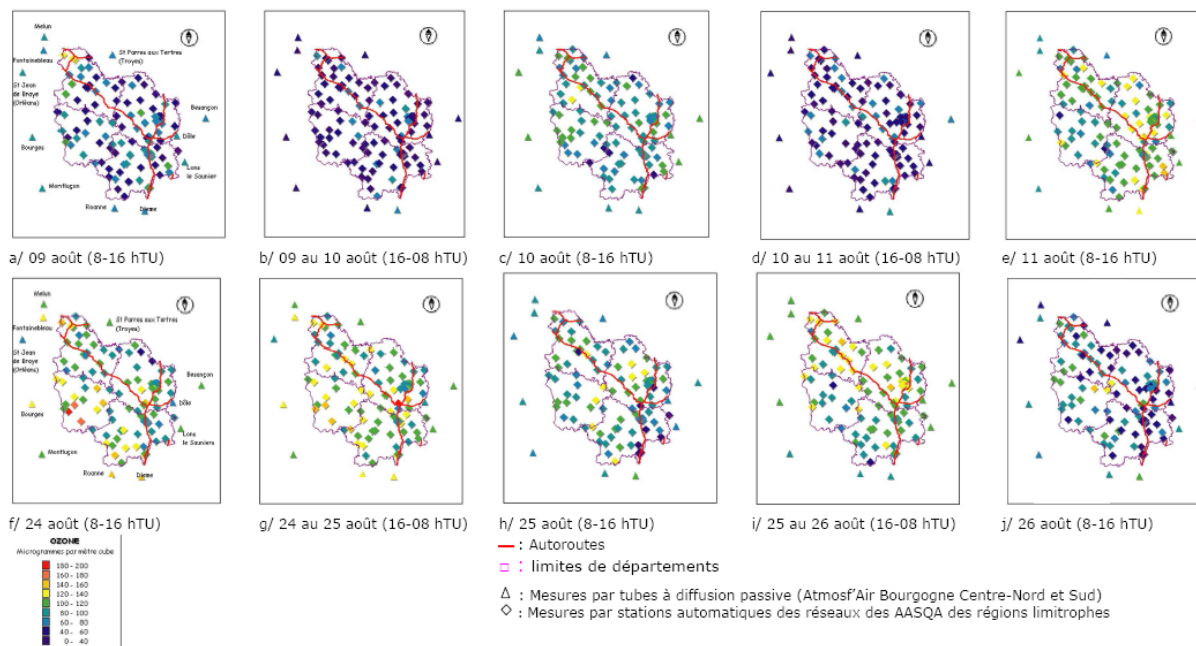


Figure 4 : Grille ADADIN et stations Météo France (violet)

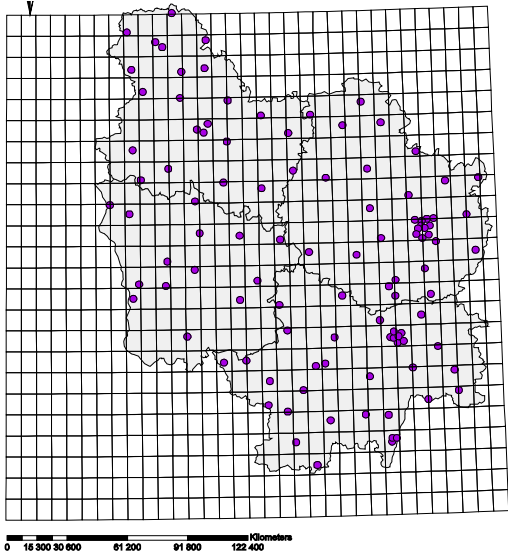


Figure 5 : Température mesurée – Température prévue (ALADIN) à 12h UTC

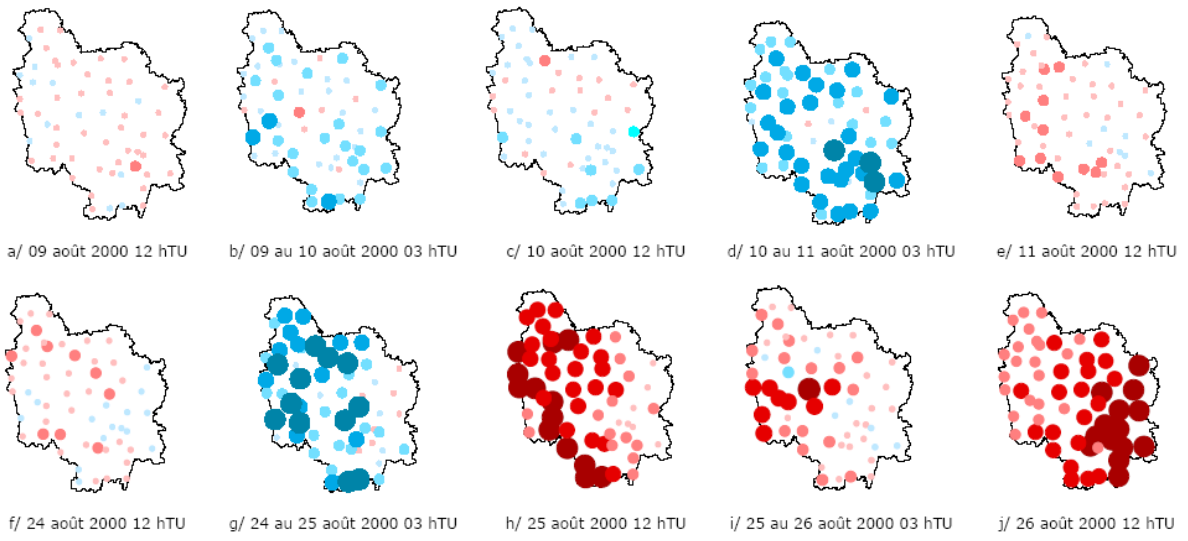


Figure 6 : Vitesses de vent prévues (tirets rouge) et mesurées (bleu) à 10 m du sol.

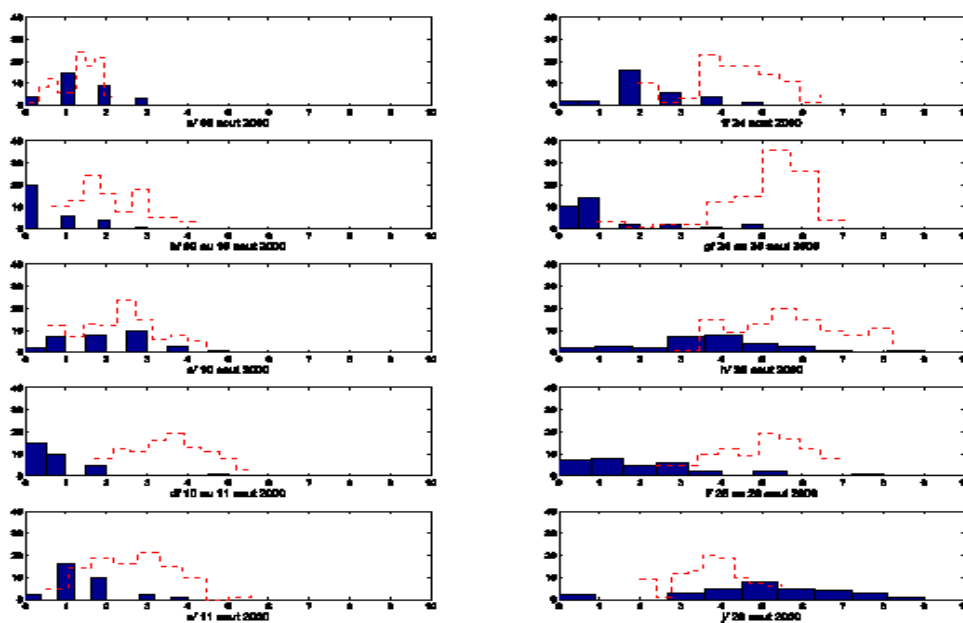
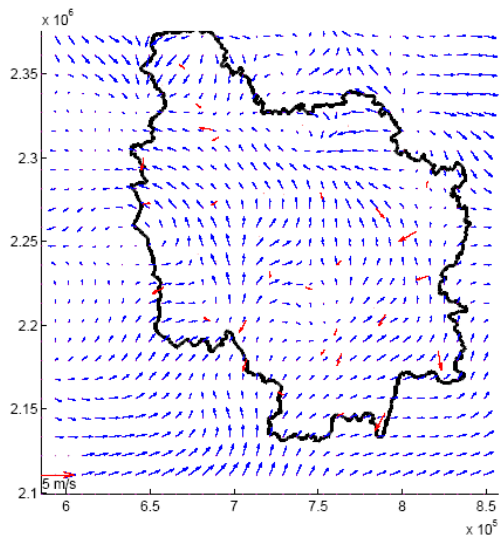
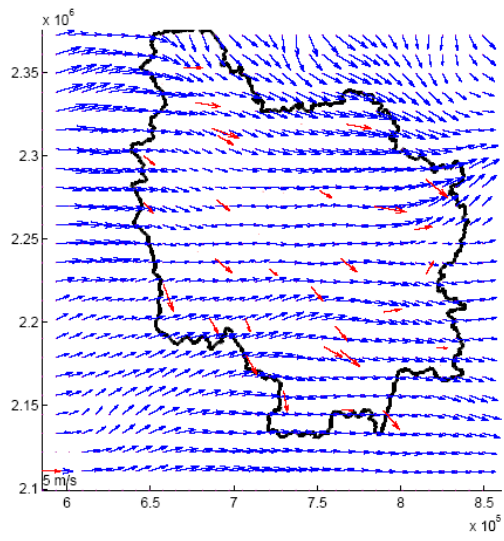


Figure 7 : Directions de vent prévues (flèches bleues) et mesurées (flèches rouges) à 10 m du sol.



a/ 09 août pour 12hTU



b/ 26 août pour 12hTU

Tableau 1 : Performance des modèles de prévision d'ozone basés sur des mesures

		Dijon	Chalon-sur-Saône	Mâcon
R ²	Apprentissage	0,61	0,63	0,62
R ²	Validation	0,61	0,62	0,60
LEPS	Apprentissage	0,40	0,44	0,41
LEPS	Validation	0,41	0,43	0,40

Tableau 2 : Performances des modèles de prévision d'ozone intégrant un modèle météorologique

		Dijon	Chalon-sur-Saône	Mâcon
R ²	Apprentissage	0,71	0,75	0,78
R ²	Validation	0,77	0,74	0,79
LEPS	Apprentissage	0,48	0,53	0,56
LEPS	Validation	0,52	0,48	0,53