

Premières investigations concernant l'amélioration des prévisions de dépassement des seuils d'ozone sur la région de Strasbourg par analyse de données fines de météorologie

First investigations concerning the improvement of ozon rates prediction by fine meteorological elements analysis in the Strasbourg area

Laurent FISCHER (1), Alain TARGET (2), Joseph KLEINPETER (2), Georges NAJJAR (3), Patrice PAUL (3), Dominique STEIGER (2), David DELACOURT (2)

RÉSUMÉ

La prévision des pointes de pollution à l'ozone nécessite une connaissance précise des phénomènes qui agissent dans la couche limite urbaine. Les variables dispensées par les prévisions météorologiques synoptiques à méso-échelle ne suffisent pas à discerner clairement les processus de genèse et de transport de l'ozone dans les grandes agglomérations. Il est donc indispensable d'affiner les prévisions météorologiques par des mesures micro-climatiques urbaines. Pour cela, une étude est menée à partir d'un dispositif mesurant des paramètres pertinents tels que la vitesse et la direction du vent, la température et de l'humidité en 5 points de l'agglomération strasbourgeoise. Ce réseau de mesure est complété par une station de mesure du bilan de rayonnement et par un profileur vertical de vent acoustique (SODAR). Les données fournies par ces dispositifs ont pour but l'élaboration de champs de paramètres énergétiques et météorologiques locaux, qui permettront d'affiner le modèle de prévision statistique. Les travaux de cette première année d'investigation sont présentés ici.

ABSTRACT

Predicting ozon rises and peaks requires an accurate knowledge of the phenomenons which act in urban boundary layer. The results of the meteorological predictions on a synoptic meso-scale are insufficient to distinguish clearly processes of ozon generation and transport in great builtup areas. Therefore it's essential to sharpen meteorological predictions by urban micro-climatic measurements. Our researchs leads us to the study and installation of measurement systems for pertinent parameters like wind direction and velocity, temperature and relative humidity in five points of the Strasbourg builtup area. This measurement network is completed by a radiative balance measurement station and a vertical acoustic wind profiler (SODAR). The datas furnished by our network are aimed at working out local energetic and meteorological parameters fields to sharp a statistical prevision model. The works of this first investigation year are presented here.

Introduction

La connaissance précise de paramètres climatiques et météorologiques, en zone urbaine et périurbaine, est essentielle pour une meilleure

compréhension des processus qui conduisent à la formation d'épisodes de pollution par l'ozone dans les grandes agglomérations. Les prévisions météorologiques synoptiques à méso-échelle (quelques dizaines de km) doivent être précisées au niveau des structures urbanisées (échelles sub-méso de quelques mètres à quelques km) par les données issues d'un réseau de mesure adéquat réduisant la taille des mailles de prévi-

(1) Ademe / ASPA / CEREG.

(2) ASPA.

(3) CEREG.

sion classique dans le but d'affiner les prévisions météorologiques régionales.

De multiples travaux ont montré que les grandes agglomérations sont caractérisées par l'existence d'une couche limite urbaine (OKE 1978). Il convient de noter que l'agglomération strasbourgeoise (environ 420 000 habitants) est particulièrement adaptée à la mise en évidence des effets urbains sur la basse atmosphère ; en effet, elle est située dans une plaine quasi parfaite au milieu du fossé rhénan méridional dont la ventilation moyenne annuelle, particulièrement faible, est inférieure à $2,5 \text{ m.s}^{-1}$. La couche limite est le résultat des conditions de surface sous-jacentes, notamment les bilans radiatifs spécifiques aux milieux urbanisés et la rugosité de surface. Cette dernière est fonction de la structure du bâti et influence en partie, les champs de température, d'humidité et de vent (SCHMID 1991). Ces paramètres engendrent une modification de la structure verticale des basses couches de l'atmosphère. Il convient donc d'explorer l'atmosphère tant sur un plan horizontal que vertical pour mettre en relation les paramètres de surface avec les phénomènes survenant dans la couche limite. La caractérisation de ce temps local sera mise en relation avec les paramètres météorologiques synoptiques étudiés par Météo-France, les émissions étudiées par le LPCA et les imissions caractérisées par l'ASPA.

Pour mener ce type de recherche il convient, dans un premier temps, de disposer d'une analyse fine des variables météorologiques et énergétiques de surface obtenues par la mesure de paramètres locaux caractéristiques tels que le rayonnement, la température et l'humidité de l'air ainsi que les vitesses et directions de vent.

Dans un second temps il est nécessaire de relier ces mesures ponctuelles en établissant des champs bidimensionnels de paramètres de surface. Ces champs seront liés aux données synoptiques d'altitude pour constituer une analyse tridimensionnelle stratifiée et caractériser à l'intérieur d'un « volume » urbain donné, les prédictors d'ozone et leurs interactions.

Cet article présente un état d'avancement de la première année de recherche. Les premiers résultats sont encourageants pour la suite du programme. Ils sont notamment en accord avec les travaux que l'on peut trouver dans la bibliographie.

1. Première année d'investigation et état d'avancement de la recherche

Cette première année d'investigation nous a conduit d'abord à concevoir un réseau de mesures météorologiques en zone urbaine, puis à installer un dispositif cohérent, permettant l'analyse fine des facteurs climatiques et énergé-

tiques de surface. La mise en relation de ces paramètres de surface avec les phénomènes survenant en altitude a également fait partie de nos préoccupations notamment par la mise en place d'un profileur de vent acoustique de type SODAR afin d'obtenir des informations sur la structure verticale de l'atmosphère.

Après une phase d'étude et d'installation, la validation des premiers résultats et l'étude préalable des interactions entre les différents paramètres mesurés vont permettre d'orienter les recherches à venir afin de discerner les outils et les paramètres les plus appropriés pour atteindre les objectifs fixés.

1.1. Les sites de mesure

Les sites de mesure des différents paramètres météorologiques mesurés dans le cadre de nos travaux sont visualisés sur la figure 1. Certains sites faisaient déjà partie du réseau de l'ASPA, d'autres ont été créés ou complétés par un ou plusieurs appareils. Le but était de disposer d'un réseau suffisamment dense et représentatif pour permettre ultérieurement une cartographie des champs des paramètres mesurés.

Les sites 1, 4 et 5 sont placés en zone périurbaine à 10 m. Le site 2 est placé au centre ville sur un bâtiment de 5 étages et le site 3 en périphérie proche sur un bâtiment de 7 étages.

Le tableau I permet de visualiser le type d'équipement installé ou en phase d'installation pour chacun des sites de mesure et identifie le code correspondant à chaque site de mesure.

1.2. Etude des paramètres énergétiques et météorologiques de surface

1.2.1. Les données radiatives

Le rayonnement solaire en tant que support d'énergie agit sur la circulation des basses couches atmosphériques. Sa modélisation locale et l'établissement d'un bilan radiatif sont donc essentiels (notamment pour la modélisation de l'albédo à l'échelle urbaine et le calcul du bilan d'énergie). Le rayonnement conditionne en effet les champs de température, auxquels s'associent des champs de vent locaux tels que les brises thermiques cycliques journalières (principalement par situation anticyclonique marquée). Il est d'autre part déterminant dans les processus photochimiques de formation de l'ozone troposphérique. Les valeurs de rayonnement fournies par la station de mesure du bilan radiatif couvrent un spectre qui s'étend de l'ultraviolet à l'infrarouge (FISCHER 1996).

L'étude du rayonnement s'appuie sur une station de mesure opérationnelle depuis le 27 juillet 1996 sur le site de l'ASPA à Schiltigheim. Ce site a été retenu pour sa situation en zone périurbai-

Tableau I.
Equipements de mesure présents sur chaque site et codification des sites.
Measurement equipments present on each site and sites codification

Site & Code Site	SODAR PA1-LR	Sonde d'humidité relative et de température	Anémogirouette classique	Anémomètre tridimensionnel
ASPA Schiltigheim 1		<i>opérationnel</i>	<i>opérationnel</i>	<i>opérationnel</i>
DRIRE Strasbourg 2		<i>opérationnel</i>	<i>opérationnel</i>	
CROUS Neudorf 3		<i>opérationnel</i>	<i>opérationnel</i>	<i>En voie d'installation</i>
CRR Reichstett 4	<i>opérationnel</i>	<i>opérationnel</i>	<i>opérationnel</i>	
Geispolsheim 5		<i>En voie d'installation</i>	<i>En voie d'installation</i>	<i>En voie d'installation</i>

ne sur un terrain dégagé et pour la proximité des dispositifs d'acquisition de données dans les locaux de l'ASPA. La station se compose : d'un pyranomètre type CM 11 pour la mesure du rayonnement global, d'un pyranomètre type CM 121 pour la mesure du rayonnement diffus, d'un radiomètre ultraviolet type CUVA1 pour la mesure du rayonnement ultraviolet A et d'un pyrgéomètre type CG1 PRV pour la mesure du rayonnement infrarouge atmosphérique. Tous ces appareils sont de marque Kipp & Zonen. L'acquisition des données se fait par moyennage au pas de temps du quart d'heure.

La figure 1 montre les variations du rayonnement infrarouge « brut » et de l'irradiance sur la période automnale du 24 au 28 octobre 1997.

Le rayonnement infrarouge « brut », mesuré par le pyrgéomètre, peut être considéré comme un bilan entre le rayonnement infrarouge atmosphérique descendant et le rayonnement infrarouge ascendant émis par le pyrgéomètre et résultat de sa température. L'irradiance est calculée en tenant compte de cette température selon la formule suivante :

$$L\downarrow = RIR_{brut} + \sigma T^4 \quad (\text{en } W.m^{-2}.sr^{-1})$$

Avec :

RIR_{brut} = rayonnement infrarouge brut mesuré au pyrgéomètre en $W.m^{-2}$

T = température absolue du pyrgéomètre en K

σ = constante de la loi de Stefan = $5,6697.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$

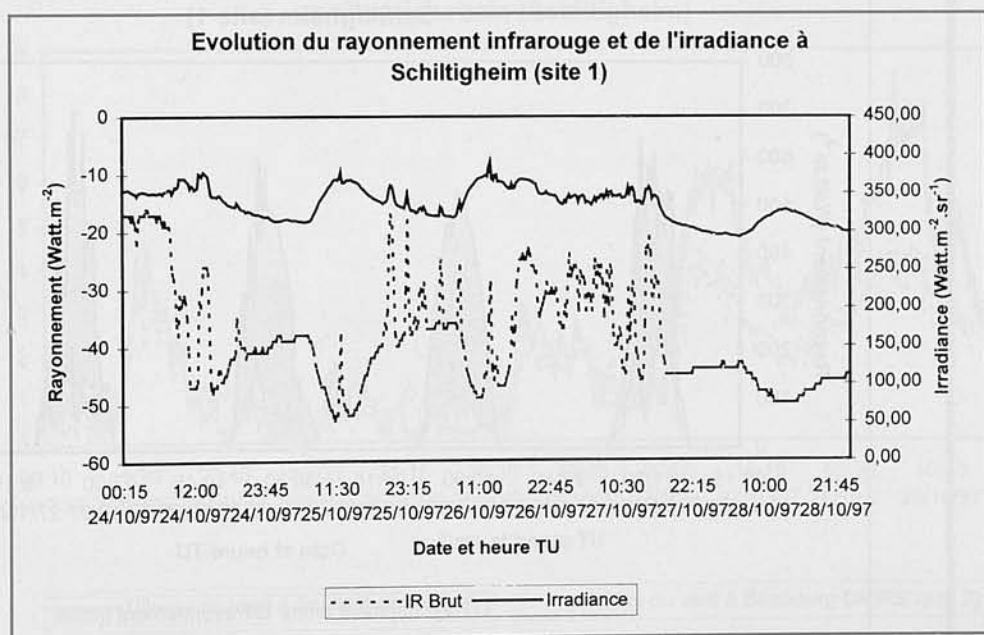


Fig. 1.
Evolution du rayonnement infrarouge et de l'irradiance du 24 au 28 octobre 1997.
Evolution of both infrared radiation and irradiance for the period 24-28 October 1997.

La mesure du rayonnement global et du rayonnement diffus (fig. 3) est représentative d'une situation automnale avec des journées claires entrecoupées de passages nuageux (dents de scie sur les courbes) montrant des valeurs maximales de rayonnement pouvant dépasser les $500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. En fin de semaine une courbe en cloche parfaite traduit une journée de faible trouble atmosphérique. Ces nuages ont été balayés par les vents forts intervenant en fin de semaine (fig. 4). Cet aspect est confirmé sur les courbes de rayonnement infrarouge et d'irradiance qui prennent une allure lissée.

Le rayonnement global est l'ensemble du rayonnement direct et du rayonnement diffus reçu sur une surface horizontale (fig. 2).

$$G = I \sin h + D$$

Avec : G = rayonnement global

I = rayonnement direct

D = rayonnement diffus

L'étude d'images satellitales qui fournira des informations sur l'albedo urbain et sur les températures de surface est également envisagée. Ce type d'investigation sera d'un grand intérêt pour l'établissement du bilan d'énergie. Il est en outre prévu de corrélérer ce type d'information aux données de géométrie urbaine dans la perspective de la réalisation des champs du bilan radiatif.

Ces travaux sont essentiels pour une compréhension plus fine des champs de température, d'humidité ou de vent, qui ne sont que la résultante des conditions énergétiques de surface.

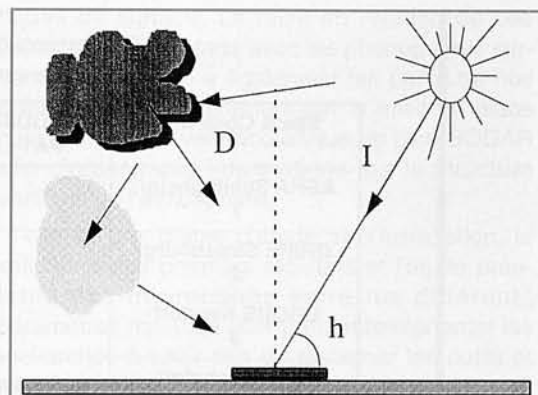


Fig. 2.
Rayonnement direct et diffus format
le rayonnement global.

*Direct solar radiation and diffuse solar radiation components
of global solar radiation.*

1.3. Etablissement des champs de vent, de température et d'humidité en surface

Les champs de vent, de température et d'humidité semblent directement influencer les concentrations en ozone troposphérique. Leur analyse précise, par une méthode adaptée, impose la mise en place d'appareils de mesure fournissant des données de haute précision et faisant preuve d'une grande fiabilité dans le temps pour une maintenance classique.

Ces études sont rendues possibles par l'utilisation d'appareils de mesure tels que des sondes de température et d'humidité, les anémo-

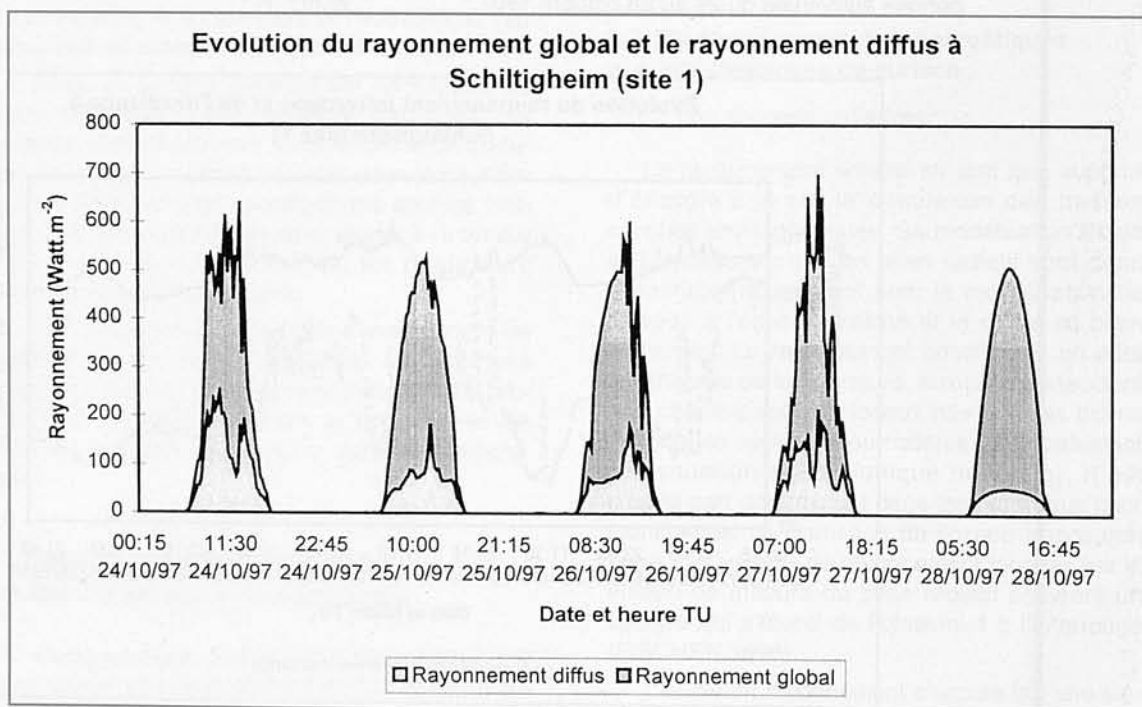


Fig. 3.

Evolution du rayonnement global et du rayonnement diffus du 24 au 28 octobre 1997.
Evolution of both global and diffuse solar radiation for the period 24-28 October 1997

girouettes classiques et les anémomètres tridimensionnels soniques.

1.3.1. Les champs de vent

L'étude des vitesses (Fig. 4) et directions de vent sur des sites urbains et périurbains permet de mettre en lumière les variations dynamiques de la circulation régionale lorsqu'elle subit les effets d'une zone urbanisée.

Les sites de mesure retenus sont visualisés sur la figure 1.

Sur la figure on voit très nettement que les maxima de vitesse de vent sont observés hors agglomération. Les directions sont elles aussi sujettes à des variations selon que leur mesure est pratiquée en agglomération ou hors agglomération.

L'absence de corrélation directe entre les mesures urbaines et périurbaines nous conforte dans la poursuite des investigations concernant la classification des champs de vent. Il devient en effet évident que la dynamique des vents est soumise en zone urbaine à des contraintes particulières, dont la résultante pourrait être un aspect essentiel dans la compréhension de la répartition et la dispersion des polluants en zone urbaine.

L'étude de la rugosité urbaine semble ici essentielle et un modèle d'élévation tridimensionnel est en cours de développement avec l'ENSAIS (Ecole Nationale Supérieure des Arts et

Industries de Strasbourg). Les résultats seront intégrés dans l'exploitation du réseau de mesures du vent.

1.3.2. Les anémomètres tridimensionnels

Les anémomètres tridimensionnels (METEK USA-1) offrent des possibilités avancées et présentent un complément idéal aux appareils dits « classiques » de type anémomètre à coupelles et girouette à drapeau. Outre la vitesse horizontale et la direction du vent ces appareils permettent une mesure précise de la vitesse verticale et fournissent aussi une température normalisée, précise au $1/100^{\text{e}}$ de degré. Ces paramètres sont intéressants notamment pour le calcul de flux ou pour la caractérisation de la turbulence atmosphérique.

Le principe de mesure de ce type d'appareil repose sur des impulsions ultrasoniques émises dans trois directions de l'espace par des couples de capteurs émetteurs/récepteurs, ce qui à l'avantage de baisser le seuil de détection des vitesses de vent. Le seuil de détection et la précision de l'appareil ultrasonique sont de l'ordre de 10 cm.s^{-1} . Comparé à un dispositif classique dont le seuil de détection est de 50 cm.s^{-1} et la précision de l'ordre de 10 à 50 cm.s^{-1} (selon les modèles), le gain est évident. La suppression de tout frottement dû aux pièces mécaniques en mouvement et l'absence de déformation des matériaux conduisent à ce gain de précision.

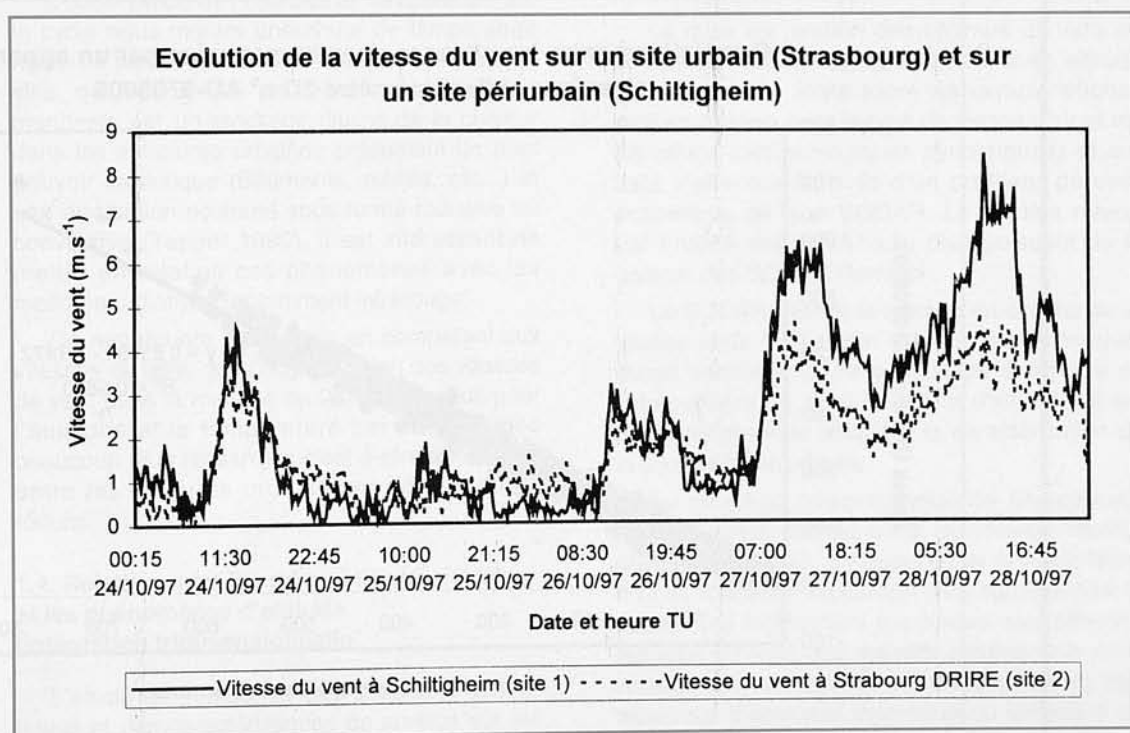


Fig. 4.

Variation de la vitesse du vent entre un site urbain et un site périurbain du 24 au 28 octobre 1997.
Variation of wind speed between both urban and periurban site for the period 24-28 October 1997.

Cet aspect sera très intéressant lors des épisodes de pollution estivaux caractérisés en général par des vents faibles pour lesquels un seuil de détection bas devrait permettre de mettre en évidence des effets climatiques locaux.

Ces appareils utilisés pour la première fois sur le réseau de mesure de l'ASPA ont été comparés à des dispositifs classiques afin de nous assurer de leur bon fonctionnement. La procédure retenue consiste dans un premier temps à comparer deux anémomètres tridimensionnels entre eux et de les confronter à leur tour à un anémo-girouette « classique » (de type Chauvin-Arnoux).

La période de comparaison s'est étendue sur un mois. Le site de référence était le toit plat du bâtiment de l'ASPA à Schiltigheim, a proximité de l'anémo-girouette classique utilisé est placé sur le toit de l'ASPA, depuis 3 ans, et soumis aux exigences en assurance qualité de la norme ISO9002.

Les premiers résultats montrent que les mesures effectuées avec les dispositifs ultrasoniques se corrélaient très bien aux dispositifs classiques pour la vitesse horizontale et la direction (Fig. 5).

Pour les vitesses verticales le test n'a porté que sur l'intercomparaison entre les 2 dispositifs soniques puisque nous ne possédons pas d'appareil de mesure des vitesses verticales comparable. Les résultats sur ce point sont sujets à

quelques interrogations de notre part. Les vitesses mesurées sur un mois sont négatives dans 95 % des cas. Cela semble assez étonnant puisque les valeurs négatives indiquent un mouvement descendant. Les valeurs obtenues devraient à priori tendre vers 0 en moyenne sur 24 heures.

Un retour chez le constructeur pour un test de calibration en soufflerie n'a pas résolu le problème. Les recherches sont en cours pour tenter de déterminer les facteurs influençant ce type de mesure (notamment le choix du site de mesure et ses qualités aérodynamiques et thermodynamiques).

1.3.3. Les sondes humidité-température

Les sondes de mesure de la température et de l'humidité installées en différents points de l'agglomération sont d'une grande utilité pour l'étude de phénomènes tels que l'îlot de chaleur urbain, la connaissance de la dynamique des températures et de l'humidité en zone urbaine ou le calcul de flux. Les sondes sont de marque Vaisala et de type HMP 35 D (de type capacitives pour l'humidité et résistives -Pt-100- pour la température).

Les premiers résultats (Fig. 6) mettent en lumière la pertinence de ce type de mesures. Sur l'exemple présenté on remarque que sur 5 cycles nyctéméraux l'humidité relative est toujours plus

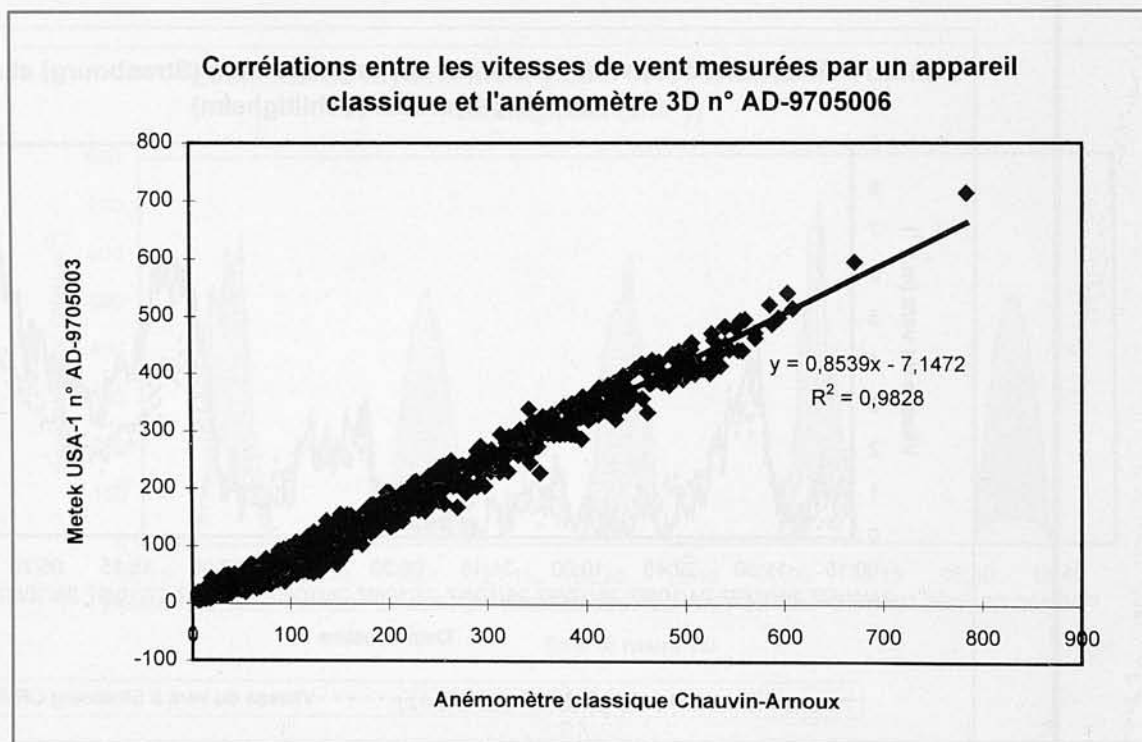


Fig. 5.

Corrélation entre les vitesses de vent mesurées par un anémomètre classique à coupelles et un anémomètre sonique.
Correlation between wind speeds measured by a cup anemometer and a sonic anemometer.

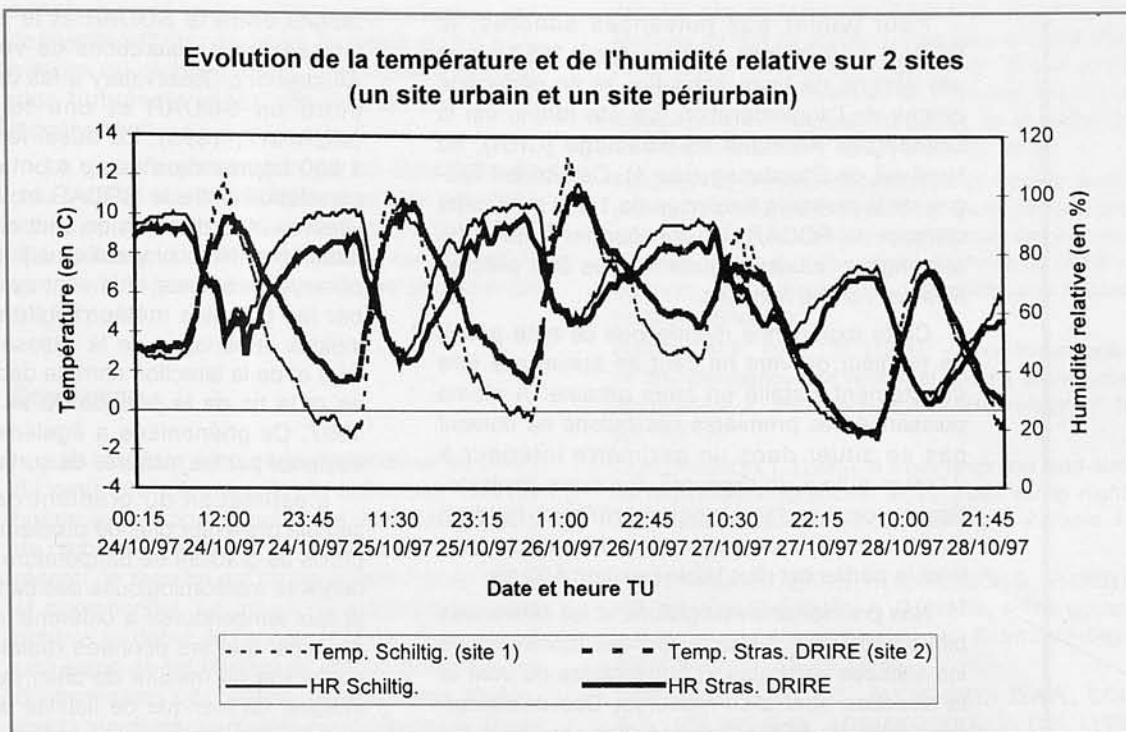


Fig. 6.

Evolution de la température et de l'humidité relative entre un site urbain et un site périurbain du 24 au 28 octobre 1997.
Evolution of temperature and relative humidity between both urban and periurban site for the period 24-28 October 1997.

importante en zone périurbaine qu'en zone urbaine. Cela s'explique notamment par la quasi absence, en zone urbaine, de végétation ou de sol nu et par des températures plus élevées.

L'observation des courbes de température sur le cycle nous montre une chute de température nocturne plus importante en site périurbain qu'en ville, qui traduit l'îlot de chaleur urbain qui se manifeste par un stockage diurne de la chaleur dans les structures urbaines présentant un haut pouvoir calorifique (Bâtiments, routes, etc...) et une dissipation nocturne sous forme radiative ou convective (Tapper 1990). Il est intéressant de mettre en relation ces phénomènes avec les mesures radiatives (notamment infrarouge).

On remarquera également, en comparant aux vitesses de vent, que l'augmentation des vitesses de vent dans la matinée du 27/10 se traduit pour l'humidité et la température par des courbes beaucoup plus resserrées c'est-à-dire des écarts entre les mesures urbaines et péri-urbaines réduits.

1.4. Relation entre les paramètres de surface et les phénomènes d'altitude (intégration tridimensionnelle)

L'étude de l'influence des situations synoptiques et des caractéristiques de surface sur les champs des paramètres météorologiques et sur leurs évolutions, vise à définir des configurations synoptiques régionales d'extension assez réduite

(une centaine de km), susceptibles d'engendrer des types de temps propices à l'apparition de fortes concentrations en ozone (phénomènes de brises thermiques locales). Cette étape impose la mise en place d'un dispositif spécifique et adapté.

La mise en relation des champs de vent en surface avec la dynamique des vents en altitude dans la couche limite (dont les caractéristiques sont en relation avec le type de masse d'air et les situations météorologiques synoptiques) et au-delà s'effectue à l'aide d'un profileur de vent acoustique de type SODAR. Le modèle retenu par l'ASPA est le PA1-LR, plus puissant de la gamme des SODAR Remtech.

Le SODAR permet la mesure en continu de la vitesse et de la direction du vent, de ses mouvements verticaux, et de la structure thermique de l'atmosphère de 10 à 1 200 m d'altitude. Il est donc parfaitement adapté à la caractérisation de la couche limite urbaine.

La situation géographique de Strasbourg, dans le Fossé rhénan entre les massifs montagneux des Vosges à l'Ouest et de la Forêt Noire à l'Est, imposait l'acquisition d'un appareil dont la portée soit légèrement supérieure aux altitudes les plus élevées des massifs montagneux environnants. Ceci devrait permettre l'étude des situations d'inversion thermique ou les effets de cisaillements des vents synoptiques au-dessus de la couche limite urbaine et de la couche limite régionale liée au Fossé rhénan.

Pour pallier aux nuisances sonores, le SODAR a été installé au mois d'août 1997 sur un site éloigné de toute habitation et en périphérie proche de l'agglomération. Le site retenu est la Compagnie Rhénane de Raffinage (CRR), au Nord-est de Strasbourg (site 4). Ce site est éloigné de la première habitation de 1 250 m. A cette distance le SODAR doit fonctionner à 60 % de son régime maximum pour ne pas être perceptible par l'oreille humaine.

Cette expérience montre que ce type précis de profileur de vent ne peut en aucun cas être directement installé en zone urbaine. A pleine puissance, les premières habitations ne doivent pas se situer dans un périmètre inférieur à 2 000 m autour de l'appareil. Pour une implantation au centre d'une agglomération il faudrait avoir recours à un appareil moins puissant et dont la portée est plus faible (environ 450 m).

Nos premières investigations et les références bibliographiques disponibles nous montrent que les vitesses verticales et horizontales de vent et la direction sont bien mesurés. Des comparaisons entre un SODAR et un ballon sonde ont été faites aux Etats-Unis par le North American Weather Consultants (WILKERSON, 1993). Les résultats obtenus montrent de très bonnes corrélations

entre le SODAR et le ballon pour les vitesses et les directions de vent. Le Boulder Atmospheric Observatory a fait des comparaisons entre un SODAR et une tour de mesure (MURRAY, 1993). Là aussi les résultats sur 4 000 heures de mesure montrent une bonne corrélation entre le SODAR et la tour pour les vitesses et la direction de vent ainsi que pour la turbulence. Nos comparaisons portent sur le vent observé en surface et le vent synoptique indiqué par les bulletins météorologiques. La figure 7 indique la variation de la vitesse horizontale de vent et de la direction entre le début de la semaine et la fin de la période du 24 au 28 octobre 1997. Ce phénomène a également été mis en évidence par les mesures de surface.

L'estimation du gradient de température semble présenter plus de problèmes. L'étude des profils de gradient de température confrontée aux données météorologiques des cartes synoptiques et aux températures à différents niveaux d'altitude, ainsi que les données radiatives exploitées sur le site de mesure du bilan radiatif, semblent indiquer un manque de fiabilité des données de stratification thermique. Lors d'épisodes anticycloniques à forte subsidence des inversions de rayonnement se créent la nuit (déficit radiatif important) et engendrent des couches stables en

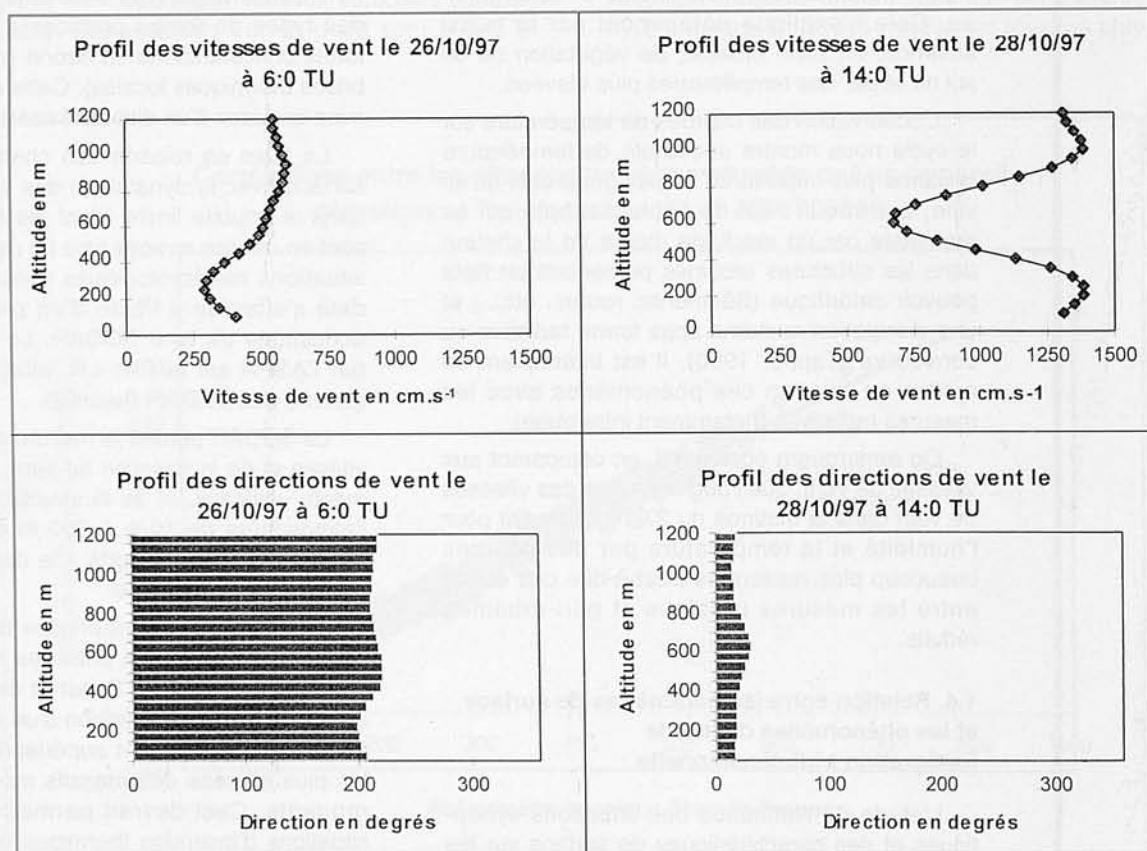


Fig. 7.
Données SODAR à 6hTU et à 18hTU le 18 novembre 1997.
SODAR data on November 18th 1997 at 6 :am GMT and 2 :pm GMT.

surface jusqu'à environ 200 m caractérisées par des vents faibles. Au lever du soleil au fur et à mesure du réchauffement l'atmosphère devient plus turbulente et les vitesses de vent s'homogénéisent.

Le type d'approximation par un algorithme de calcul utilisé sur le SODAR ne semble pas pouvoir remplacer les données fournies par un RASS (Radio Acoustic Sounding System) qui mesure la température par télédétection à une précision de 0,2 °C près.

Conclusion

Les résultats encourageants obtenus au cours de cette première année de recherche sont de bonne augure pour la poursuite de ce programme de recherche. A l'issue de cette phase d'étude le réseau de mesure est pratiquement mis en place et opérationnel. Le travail d'installation qui sera achevé au début de l'année 1998 laissera place à une étape de fiabilisation du réseau (transmission d'information par réseau téléphonique notamment) rapidement achevée pour débiter la phase d'exploitation des données. Les premiers résultats nous permettront de décider des orientations de recherche à prendre.

Les premiers épisodes de pollution par l'ozone seront en 1998 l'occasion de confronter nos mesures aux concentrations de polluants et de déterminer les paramètres les plus pertinents pour l'aide à la prévision.

Les données obtenues par ces différents dispositifs seront d'une grande utilité pour la caractérisation des situations de pollution les plus défavorables et pour l'analyse des types d'écoulement dans la basse atmosphère.

L'association des épisodes de pollution avec des types de temps caractéristiques devrait être un apport supplémentaire pour affiner la prévision.

Mots clés

Prévision des pointes de pollution, climat urbain, bilan de rayonnement, mesures météorologiques, ozone.

Bibliographie

- BRIDGMAN H.A. (1980), « Diurnal variations in the spectrum of direct beam visible radiation at urban and rural locations at Milwaukee », *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, n° 28, Springer Verlag, pp. 101-113.
- DABBERDT W.F., DAVIS P.A. (1978), « Determination of energetic characteristics of urban-rural surfaces in the greater St. Louis area », *Boundary-Layer Meteorology*, n° 14, pp. 105-121.
- FALLOT J.M., BUMAN A.M., ROTEN M., RUFFIEUX D. *Mesures de l'îlot de chaleur urbain dans le cadre d'une petite ville à topographie tourmentée : le cas de Fribourg (Suisse)*, Université de Fribourg, Institut de Géographie, Fonds national suisse de la recherche scientifique (subside n° 2.094-0.83), pp. 20-29.
- FISCHER L. (1996), *Rayonnement et teneurs troposphériques en ozone à Strasbourg, étude et réalisation d'un dispositif de mesure, exploitation des premiers résultats*, tome I & II, Strasbourg, Mémoire de DESS en Sciences de l'Environnement, Université Louis Pasteur, Institut de Géologie.
- FUGGLE R.F., OKE T.R. (1976), « Long-Wave radiative flux divergence and nocturnal cooling of the urban atmosphere », *Boundary-Layer Meteorology*, n° 10, pp. 113-120.
- GUSTAVSSON T. (1995), *A study of air and road-surface temperature variations during clear windy nights*, International Journal of Climatology, Volume 15, pp. 919-932.
- HÖGSTRÖM U., TAESLER R., KARLSSON S., ENGER L., HÖGSTRÖM SMEDMAN A. O. (1978), « The Uppsala urban meteorology project », *Boundary-Layer Meteorology*, n° 15, pp. 69-80.
- MEDEIROS FILHO F.C., JAYASURIYA D.A.R., COLE R.S., HELMIS C.G., ASIMAKOPOULOS D.N. (1988) « Correlated humidity and temperature measurements in the urban atmospheric boundary layer », *Meteorology and Atmospheric Physics*, n° 39, pp. 197-202.
- MURRAY D.R., CATIZONE P.A., HOFFNAGLE G.F. (1993), *Evaluation of Remtech PA-2 Phased Array SODAR performance in complex terrain using in-situ turbulence instruments*, American Meteorological Society, 8th Air Pollution Meteorology, pp. 19-22.
- NUNEZ M., OKE T.R. (1976), « Long-wave radiative flux divergence and nocturnal cooling of the urban atmosphere », *Boundary-Layer Meteorology*, n° 10, pp. 121-135.
- OKE T.R. (1978), *Boundary layer climates*, Londres, Editions Methuen & Co Ltd, 372 p.
- OKE T.R. (1984), *Methods in urban climatology*, Department of Geography University of British Columbia, Vancouver. Official Representative, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, pp. 19-29.
- PENEAU J.P. (1995), « Des densités aux rugosités - Les modalités instrumentales d'une transposition », *Les annales de la recherche urbaine*, n° 67, pp. 128-133.
- SCHMID H.P., CLEUGH H.A., GRIMMOND C.S.B., OKE T.R. (1991), « Spatial variability of energy fluxes in suburban terrain », *Boundary-Layer Meteorology*, n° 54, pp. 249-276.
- TAPPER N.J. (1990), « Urban influences on boundary layer temperature and humidity : Results from Christchurch, New Zealand », *Atmospheric Environment*, Vol. 24B, n° 1, pp. 19-27.
- WILKERSON G.W., CATIZONE P.A., COBLE T.D. (1993), « Use of a tethered measurement system to conduct a Doppler SODAR performance audit », *American Meteorological Society*, 8th Air Pollution Meteorology, pp. 61-67.
- LEE D.O. (1992), « Urban warming ? - An analysis of recent trends in London's heat island », *Weather*, Vol. 47, n° 2, pp. 50-56.