

Approche de la relation entre l'îlot de chaleur urbain et la persistance nocturne de l'ozone en milieu urbain

Le cas des agglomérations de Tours et d'Orléans

Michaël Berthelot¹, Alain Génin¹ et Yannick Bochatay²

¹ : UMR Cités, Territoires, Environnement, Sociétés 6173, équipe Ville, Société et Territoire, Maison des Sciences de l'Homme "Villes et Territoires" BP 60449, 33 allée Ferdinand de Lesseps, 37204 TOURS.

² : Météo France, Division Climatologie, Direction interrégionale Ile-de-France, Centre, 26 bd Jourdan 75014 PARIS.

Résumé : L'îlot de chaleur urbain de l'agglomération de Tours et d'Orléans est particulièrement marqué durant l'été. L'importante insolation engendre des écarts thermiques marqués entre le centre-ville et la campagne environnante. C'est en fin de journée que les écarts sont les plus importants lorsque les surfaces bâties libèrent la chaleur emmagasinée durant la journée. La variabilité journalière de l'ozone troposphérique est parallèle à celle des températures. Toutefois, en fin de journée, les concentrations d'ozone disparaissent plus rapidement en milieu rural alors qu'elles persistent plus durablement en milieu urbain. L'îlot de chaleur urbain semble être un facteur pouvant en partie expliquer cette persistance nocturne de l'ozone en milieu urbain

Abstract : The urban heat island of heat of the agglomeration of Turns and Orleans is particularly marked during the summer. The important insolation generates thermal variations marked between the downtown area and the surrounding countryside. It is at the end of the day that the variations are most important when built surfaces release the heat stored during the day. The variability day labourer of tropospheric ozone is parallel with that of the temperatures. However, at the end of the day, the ozone concentrations disappear more quickly in rural medium whereas they persist more durably in urban environment. The urban heat island of heat seems to be a factor partly which can explain this night persistence of ozone in urban environment.

La pollution de l'air par l'ozone est issue d'une chimie atmosphérique non linéaire. En effet, la production d'ozone n'est pas proportionnelle aux teneurs initiales en précurseurs et, selon l'abondance relative des divers réactifs, ce sont des réactions de destruction ou de production d'ozone qui peuvent être favorisées [Conseil Supérieur d'Hygiène Publique en France, 1996]. La production d'ozone est aussi très dépendante des conditions météorologiques de sorte que la production de polluants photochimiques est favorisée au printemps et en été, période particulièrement propices à l'apparition de pointes de pollution oxydante [Soedomo, 1988]. Les niveaux d'ozone sont généralement plus importants en cours de journée en zones rurales par rapports à ceux mesurés en zones urbaines ou industrielles. Les concentrations peuvent alors dépasser les valeurs recommandées pour la protection de la santé et des végétaux. Lorsque les situations météorologiques sont favorables, la région Centre se trouve sous le vent de l'agglomération parisienne riche en précurseurs ce qui engendre des concentrations importantes faisant de l'ozone un des polluants les plus préoccupants à l'échelle régionale. Le cycle journalier de l'ozone est connu, les maximums sont régulièrement enregistrés en début d'après midi [Labatut, 1997]. La destruction d'ozone d'opère en fin de journée lorsque la photochimie est freinée. Néanmoins de récentes observations ont montré que cette destruction d'ozone nocturne était plus rapide en milieu rurale qu'en milieu urbain, particulièrement durant les épisodes de fortes concentrations (juillet 2001 et août 2003). Nous souhaitons chercher à comprendre ici si cette persistance s'observe également sur des périodes moins exceptionnelles et si l'îlot de chaleur urbain est un des facteurs pouvant expliquer ce processus. L'étude a été menée sur la période estivale 2004 (juin à septembre) où des capteurs de températures ont été installés sur le réseau de mesure de la qualité de l'air.

1. L'îlot de chaleur urbain (ICU) dans les agglomérations de Tours et d'Orléans

1.1. L'intérêt d'une étude sur deux agglomérations

La principale critique pouvant être apportée aux études faites sur l'îlot de chaleur urbain est l'impossibilité de comparer les résultats des ICU d'une ville à l'autre étant données leurs dissemblances géographiques, démographiques et économiques. Des travaux sont aujourd'hui menés pour modéliser l'ICU tel le projet « Capitoul » effectué à Toulouse par Météo France. Les agglomérations de Tours (unité urbaine de 297 637 habitants en 1999) et d'Orléans (unité urbaine de 263 292 habitants en 1999) rassemblent entre 65% et 80% de la population de leur département respectif. Selon l'INSEE, elles appartiennent à la famille des agglomérations de taille moyenne et font partie des 25 premières aires urbaines du territoire français [www.insee.fr]. La région Centre détient la particularité à l'échelle nationale d'avoir deux agglomérations de taille et de configuration relativement proche. Dans le cadre des connaissances actuelles de l'ICU, cette recherche devrait permettre d'apporter des éléments de réponse approfondis sur les relations entre variabilité climatique et ICU. En effet, lors du premier chapitre, nous avons souligné l'effet de continentalisation de l'ouest vers l'est de la région. Certaines nuances apparaissaient entre Tours et Orléans pourtant séparées seulement de 110 km. Nous voudrions désormais en connaître les répercussions sur l'ICU de Tours et d'Orléans et comparer les résultats.

L'étude de l'ICU dans ces deux agglomérations présente un intérêt novateur et fondamental dans la problématique générale de notre travail puisqu'il s'agit d'interpréter la relation entre l'ICU et la pollution de l'air par l'ozone. Notre travail s'inscrit dans un contexte bien spécifique. En effet, en juin 2003 a été mis en place le projet PAPRICA. Ce réseau de recherche : « Pollution Aérienne et Pathologie Respiratoire : Impact de la Communication sur l'Air » est constitué autour de l'EMI-U 00-10 regroupe les différents partenaires de la région Centre concernés par la pollution atmosphérique et son impact sur la santé. Ses objectifs principaux sont de mettre en

place en région Centre un système de prévision des dépassements du seuil de 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ d'ozone dans l'air et une stratégie d'information anticipée des insuffisants respiratoires chroniques graves lors de ces périodes, puis d'évaluer l'impact de cette stratégie sur la consommation médicale, la santé et la qualité de vie des patients. L'impact de cette information anticipée sur la réaction inflammatoire et le remaniement tissulaire pulmonaire sera également évalué à partir d'échantillons d'expectoration prélevés chez les patients [www.med.univ-tours.fr; www.ligair.fr]. De plus, à échéance 2004, les agglomérations de Tours et d'Orléans disposent de Plans de Protection de l'Atmosphère (PPA). Fondés sur une large concertation, l'élaboration de ces PPA débouchera sur un ensemble de mesures concrètes visant à limiter ou à réduire les rejets à l'atmosphère de six polluants prioritaires [www.centre.drivre.gouv.fr].

1.2. Une étude menée sur la période estivale 2004

A ce jour, l'été 2004 ne restera pas comme étant une année particulièrement polluée à l'ozone, contrairement à l'année 2003. Des conditions climatiques changeant rapidement entraînent, dès l'apparition de quelques journées ensoleillées, des périodes orageuses et nuageuses. Cependant, des dépassements ponctuels du seuil d'information et de recommandations ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur une heure) ont été enregistrés sur quelques sites surveillés par Lig'Air. Les concentrations maximales annuelles sont enregistrées comme chaque année sur la zone rurale d'Eure-et-Loir (Oysonville) où la valeur horaire maximale atteinte fut de $202 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces dépassements sont dus essentiellement à la formation de l'ozone pendant le transport des masses d'air vers notre région. On dénombre également 24 journées où le seuil de protection de la santé a été dépassé au moins sur une des agglomérations étudiées (Tours ou Orléans). Dans l'objectif de

spatialiser l'ICU dans les deux agglomérations, la collaboration avec l'association Lig'Air a permis d'équiper les stations de mesure de la qualité de l'air en sonde mesurant la température. Sur Tours, la totalité du réseau de mesure disponible (stations de Météo France existantes et équipement des stations de Lig'Air) comprend 23 postes dont 5 se situent au cœur de l'unité urbaine et 3 à moins de 7 km de celle-ci (Figure 1). Sur Orléans, l'ensemble du réseau de mesure est constitué de 22 stations, dont 4 sont situées dans l'agglomération orléanaise et 4 autres situées dans un périmètre inférieur à 25 km (Figure 2). Les autres stations se trouvant généralement à plus de 30 km du pôle urbain. Malgré cette distance, ces postes sont nécessaires pour l'observation de l'extension de l'éventuel îlot de chaleur urbain.

Figure 1 : Réseau de mesure à Tours

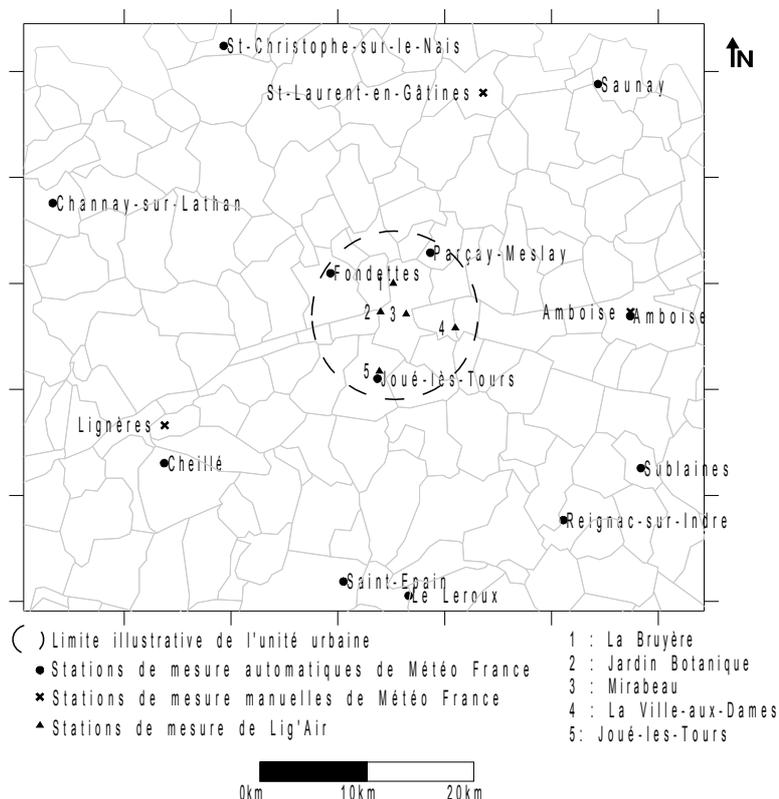
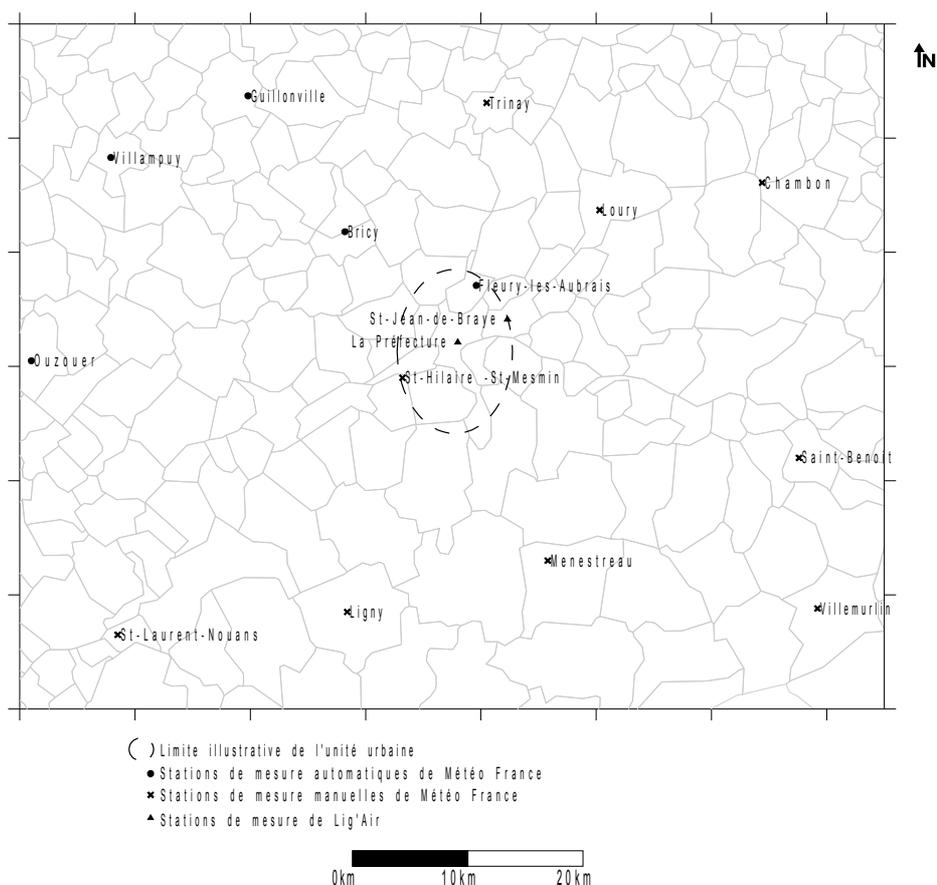


Figure 2 : Réseau de mesure à Orléans



1.3. Spatialisation de l'îlot de chaleur urbain

1.3.1. *Les températures moyennes (T_{moy})*

L'interpolation des T_{moy} de la période estivale retenue affiche déjà très nettement un important contraste entre les agglomérations et la campagne environnante. A Tours, ce sont les stations du Jardin Botanique et de Mirabeau qui s'isolent avec des moyennes supérieures à 20° comme pour la station de la Préfecture à Orléans. Pour les deux agglomérations, l'écart de température atteint 2° sur une distance de 25 km en direction du pôle urbain. Les stations situées en zone périurbaine se distinguent plus nettement sur l'agglomération tourangelle où les cercles concentriques sont plus significatifs.

Figure 3 : Répartition des Tmoy sur l'agglomération de Tours, été 2004

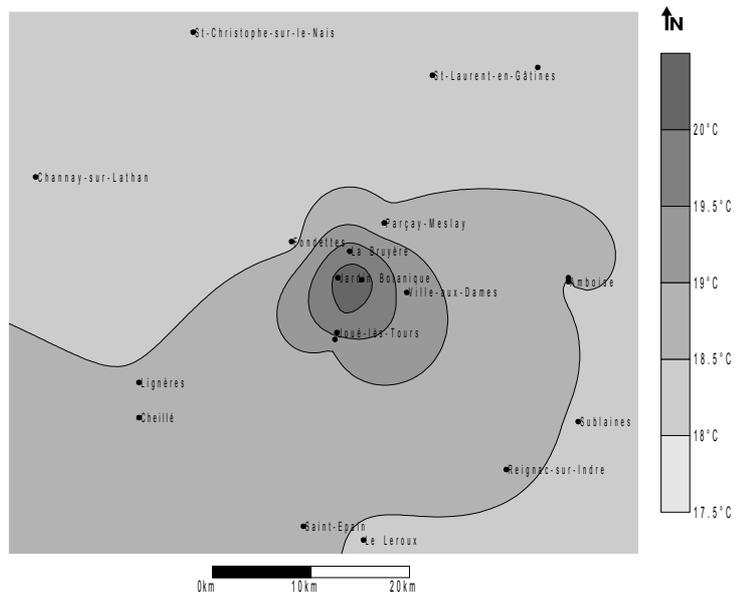
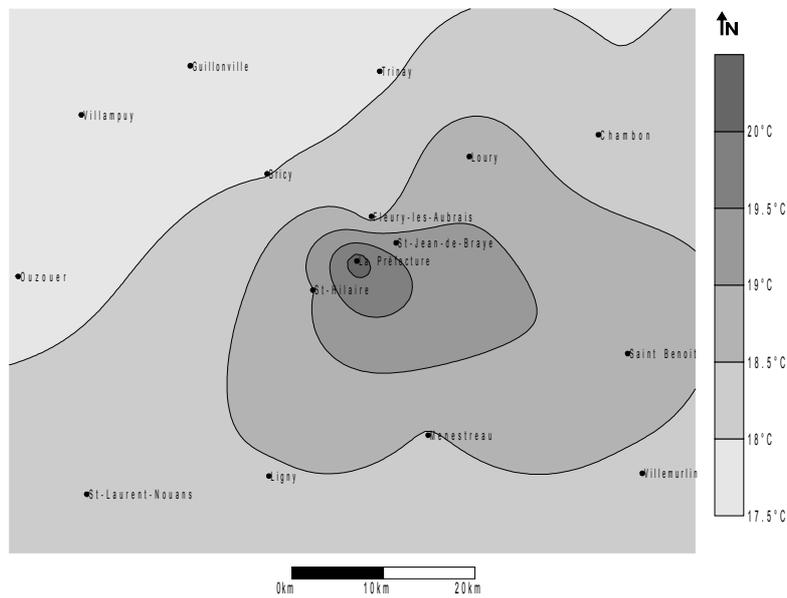


Figure 4 : Répartition des Tmoy sur l'agglomération d'Orléans, été 2004



1.3.2. Les températures minimales (Tn)

Sur l'agglomération lilloise, Y. Charabi enregistre des écarts parfois supérieurs à 4° par temps clair, sur de longues séries de données. L'auteur démontre que les températures minimales s'observent généralement en fin de nuit et à l'aube, c'est à ce moment que l'ICU s'intensifie essentiellement en raison de l'occupation du sol. L'étude réalisée sur Annecy, une agglomération de moindre importance, montre à nouveau des écarts entre les minimales proches de 4° [Endlicher, 1981]. Sur la période estivale 2004, les Tn révèlent des écarts importants sur les deux agglomérations, de 3° à Orléans à 4° à Tours. Les stations situées en zone urbaine dense, Mirabeau (Tours) et la Préfecture (Orléans) détiennent les valeurs les plus élevées. L'extension de l'ICU s'étend de façon notable jusqu'aux stations situées en périphérie. Ces écarts sont essentiellement liés à l'espace bâti dont les matières utilisées sont propices à l'absorption de la chaleur induite par le rayonnement solaire direct. Durant la nuit, les surfaces artificialisées restituent la chaleur et limitent la baisse des Tn. Par opposition, le flux réfléchi est plus important en campagne où le refroidissement nocturne est marqué [Endlicher, 1981 ; Charabi, 2001].

Figure 5 : Répartition des Tn moyennes sur l'agglomération de Tours, été 2004

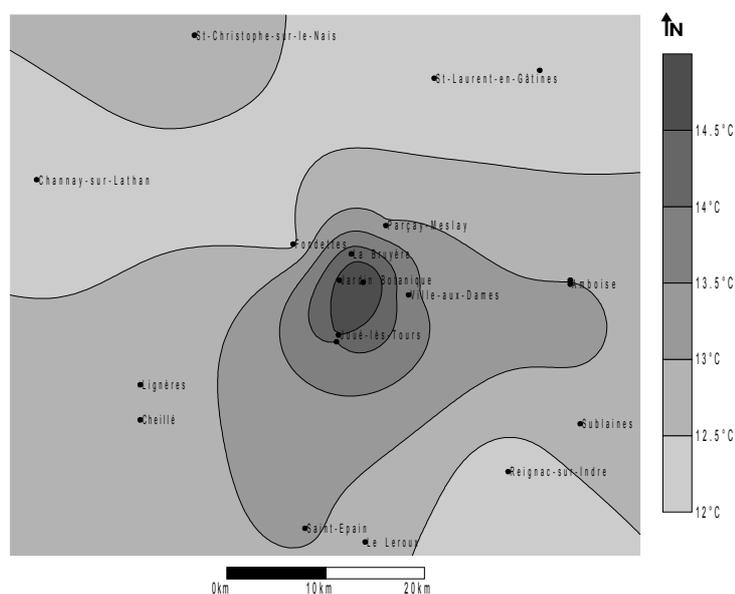
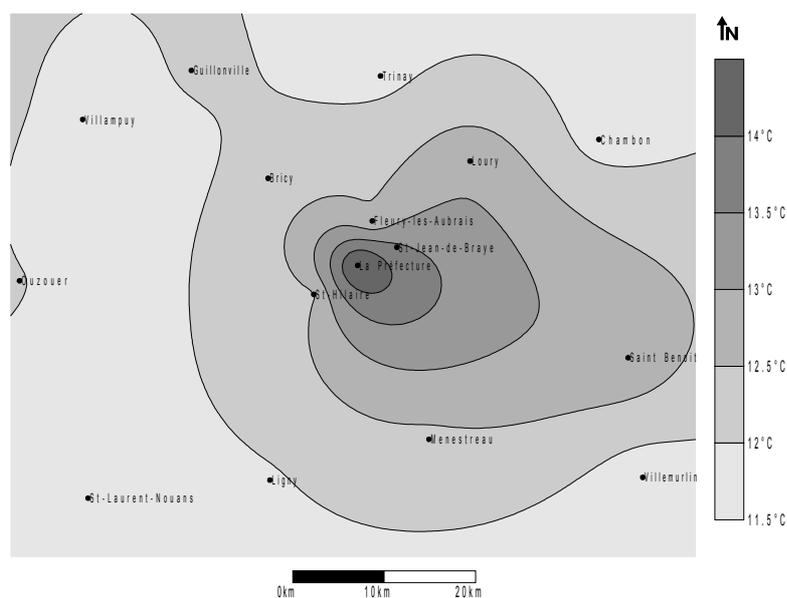


Figure 6 : Répartition des Tn moyennes sur l'agglomération d'Orléans, été 2004



1.3.3. Les températures maximales (Tx)

Les températures maximales estivales sont généralement enregistrées au moment où l'insolation est la plus importante, entre 13h TU et 16 h TU [Charabi, 2001]. En été, la capacité du sol en milieu rural à absorber le rayonnement solaire est particulièrement faible. La végétation et l'importante évapotranspiration réfléchissent une grande partie du flux solaire. En ville, la densité du bâti et l'artificialisation des sols favorisent le stockage de l'énergie, donc de la chaleur [Conrads, 1975 ; Endlicher, 1981 ; Escourrou, 1991]. Dans une étude récente menée dans différentes villes des Etats Unis, l'auteur s'appuie essentiellement sur l'albédo et l'évapotranspiration pour interpréter l'ICU et souligne l'importance des surfaces végétales au sein du centre-ville [Haider, 1997]. A travers l'interpolation des Tx moyennes sur les deux agglomérations, l'ICU n'apparaît

pas aussi franchement que sur les analyses faites avec les Tn. Sur la ville de Tours, les écarts entre les extrêmes n'excèdent pas 1.5° alors que sur Orléans, l'unité urbaine ne se dissocie pas de la campagne environnante. L'absence d'écarts significatifs s'explique en partie par le caractère des stations de mesure. Celle de la Préfecture (Orléans) est située à proximité immédiate d'espaces végétalisés au même titre que la station de Fleury-les-Aubrais et de Saint-Jean-de-Braye. Ces espaces suffisent à réfléchir l'énergie solaire et à favoriser des Tx sans excès par rapport à la campagne. L'influence des espaces verts est très importante dans la dynamique de l'ICU. Au sein du pôle urbain de grandes différences peuvent apparaître entre les stations situées en zone de bâti resserré et les stations situées à proximité d'un espace vert. Dans une étude menée sur Mexico, les Tx mesurées à proximité du parc de Chapultepec pouvaient être jusqu'à 4° inférieures à celles situées en zone bâtie [Jauregui, 1997]. De la même manière à Paris, le parc de Montsouris, provoque une baisse moyenne de 1°, plus sensible sur les Tx en été [Cantat, 1989].

Figure 7 : Répartition des Tx moyennes sur l'agglomération de Tours, été 2004

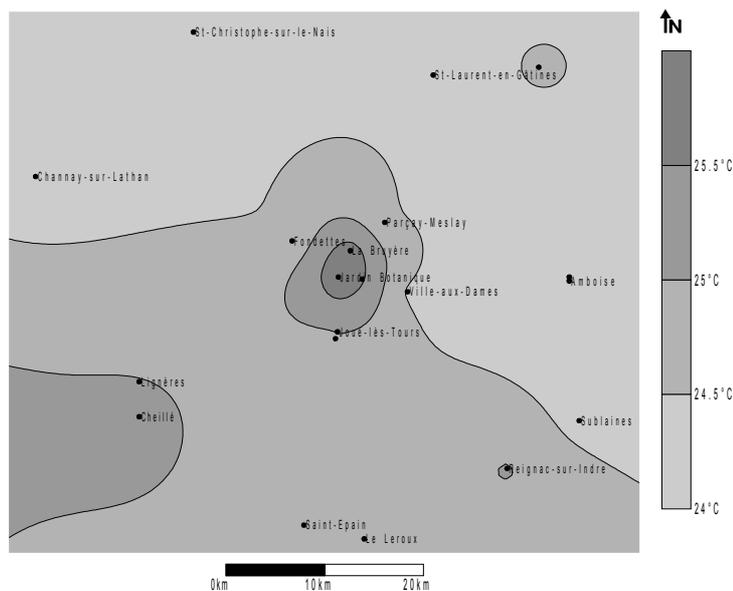
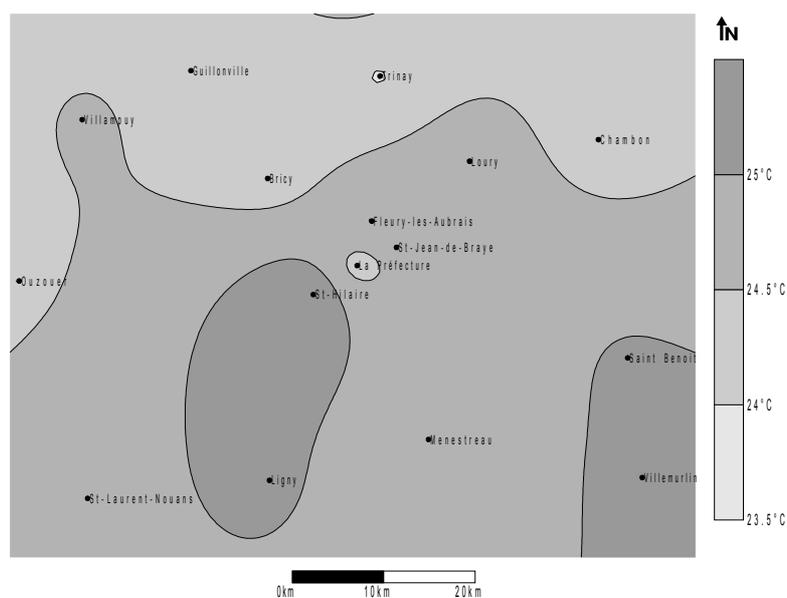


Figure 8 : Répartition des Tx moyennes sur l'agglomération d'Orléans, été 2004



1.4. Evolution nocturne des écarts thermiques entre les différents milieux

Les résultats de la classification automatique réalisée sur l'ensemble des postes automatiques associés aux observations des comportements des stations permettent de confirmer que 3 postes témoins pour chaque agglomération. A Orléans : la Préfecture (urbain), Saint-Jean-de Braye (périurbain) et Bricy (rural). A Tours, Jardin Botanique, (Urbain) la Ville-aux-Dames (périurbain) et Parçay-Meslay (rural).

1.4.1. *Dans l'agglomération tourangelle*

Quelque soit le type de temps, les écarts thermiques par rapport à la station rurale ou par rapport à la station périurbaine atteignent leur valeur maximale en fin de soirée ou au début de nuit entre 20h et 3h. Les types de temps radiatifs affichent les écarts les plus importants par rapport à la station rurale. Durant ces journées l'écart moyen entre le Jardin Botanique et Parçay-Meslay atteint 3.9° vers 20h. Les situations nuageuses montrent des valeurs beaucoup moins importantes ($< 2^\circ$) avec un maximum qui intervient généralement vers 20h. Pour chacune des situations on observe une décroissance progressive des écarts, par rapport au milieu rural, à partir de 22h. L'absence d'intensification de l'ICU au cours de la nuit peut s'expliquer par la proximité de la station de Parçay-Meslay par rapport au centre-ville. En effet, bien qu'ayant un caractère rural, la station se trouve dans la couronne périurbaine de Tours à proximité d'une zone d'activité en extension. Ainsi un processus similaire s'opère sur chacune des trois stations de manière dépendante de la couche limite atmosphérique. En période nocturne, la majeure partie des aérosols va sédimenter après le coucher du soleil et former la couche nocturne. La couche limite atmosphérique urbaine n'est jamais stable, mais plutôt neutre, quelques fois instable [Menut, 1997]. De plus, le flux de chaleur surfacique au Jardin Botanique ne semble pas être assez suffisant pour entraîner une persistance de l'ICU au cours de la nuit. Les surfaces bâties ou asphaltées favorables à l'absorption de chaleur durant la journée ne sont pas assez importante dans le périmètre de la station pour engendrer d'importants écarts. L'ICU disparaît presque totalement au lever du jour pour l'ensemble des AC, après 6h, la couche convective apparaît et la couche limite atmosphérique devient instable

Figure 9 : Ecart thermique nocturnes moyens par types de temps entre le Jardin Botanique et Parçay-Meslay

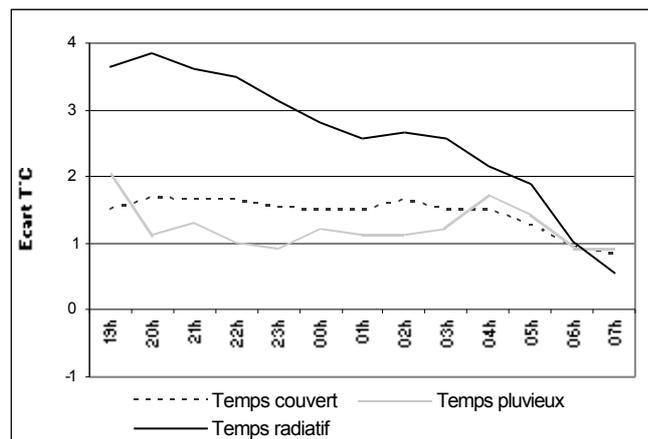
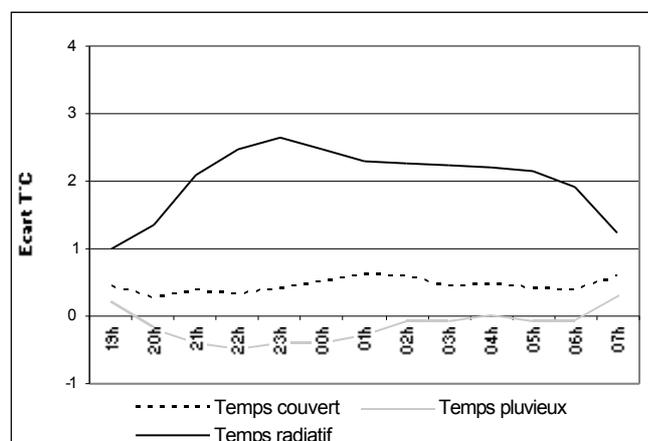


Figure 10 : Ecart thermique nocturnes moyens par types de temps entre le Jardin Botanique et la Ville-aux-Dames



1.4.2. Dans l'agglomération orléanaise

Les écarts moyens par rapport à Bricy peuvent dépasser 4° par temps radiatif. En revanche, les écarts moyens par rapport à la périphérie n'excèdent pas $2,5^{\circ}$. Les situations nuageuses effacent l'ICU tout au long de la nuit. La dynamique des écarts moyens montre une intensification des valeurs en milieu de nuit. A partir de 19h, les écarts (par rapport au centre-ville et par rapport à la périphérie) augmentent régulièrement pour atteindre leur maximum entre 0h et 2h. Par temps clair, les écarts sont proches de 5° entre la Préfecture et Bricy. Les écarts se stabilisent durant la deuxième partie de nuit et chutent vers 5h où l'ICU commence à s'effacer. L'évolution des écarts thermiques moyens peut s'expliquer par le caractère et la situation des stations. Le poste de Bricy se situe très distinctement en milieu rural à 12 km d'Orléans. La couche nocturne va avoir tendance à se stabiliser alors qu'elle restera neutre ou instable au niveau du poste de la Préfecture. De la même manière le flux de chaleur sensible surfacique sera nettement plus important sur le poste urbain alors que le refroidissement nocturne va s'opérer plus rapidement sur Bricy. Ce processus explique en partie la persistance de l'ICU jusqu'en milieu de nuit et illustre le schéma du bilan thermique urbain sans que l'intervention de la chaleur issue des activités humaines soit significative étant donné que nous sommes en été. Les écarts sont d'autant plus marqués que l'absorption de chaleur durant la journée fut importante. Les caractères de la station de Saint-Jean-de-Braye peuvent établir un processus similaire puisque l'environnement végétal est important autour de station et le flux de chaleur sensible y est moins important que sur le poste de la Préfecture. Cette hypothèse permet de justifier les écarts restant élevés jusqu'en deuxième partie de nuit.

Figure 11 : Ecart thermique nocturnes moyens par types de temps entre la Préfecture et Bricy

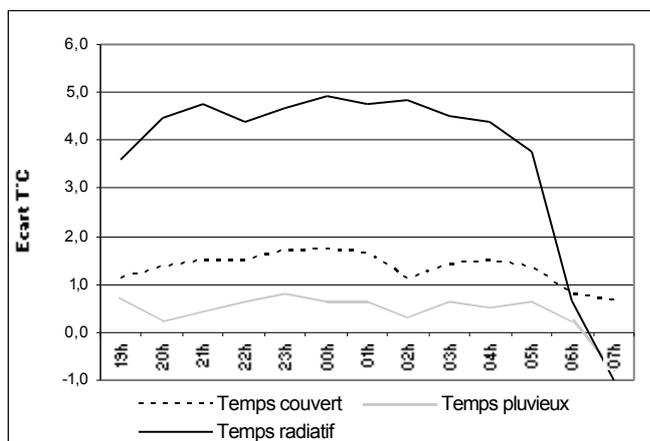
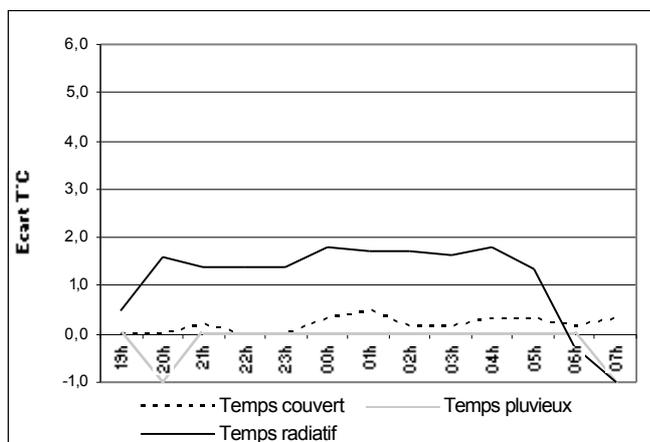


Figure 12 : Ecart thermique nocturnes moyens par types de temps entre la Préfecture et Saint-Jean-de-Braye



2. Une persistance nocturne de l'ozone en milieu urbain induite par l'îlot de chaleur urbain ?

2.1. Les données utilisées

Le réseau retenu est constitué de 2 postes à Orléans (la Préfecture et Saint-Jean-de-Braye) et de 4 à Tours (Jardin Botanique, la Bruyère, Joué-les-Tours, la Ville-aux-Dames) mesurant simultanément la température et la concentration d'ozone. Les stations rurales de Chambord et de Oysonville n'ont pu être équipées de capteurs de températures. Pour pallier à ce problème, nous avons associé à ces stations, les températures des stations automatiques de Météo France (proposant des valeurs horaires) les plus proches. Aussi, nous avons associé la station de Oysonville au poste de Louville situé à 12 km au sud-ouest. De la même manière la station de Chambord est associée au poste de Saint-Laurent-Nouan situé à 13 km au nord-est.

2.2. variabilité des moyennes horaires sur l'ensemble de la période estivale 2004

L'analyse comparative menée à partir de l'ensemble des journées de la période étudiée confirme les résultats issus de séries plus longues. Toutefois, des dissemblances apparaissent sur Orléans. Pour Tours, la station de Chambord observe les valeurs les

plus élevées en milieu d'après midi alors que les stations urbaines de la Bruyère et du Jardin Botanique restent en retrait avec des écarts de 15 à 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ par rapport à la station rurale. A partir de 19h, la destruction d'ozone s'opère sur chaque milieu. Néanmoins, cette destruction est plus rapide sur Chambord alors que l'ozone persiste plus durablement à Joué-les-Tours et au Jardin Botanique. Cette tendance se confirme jusqu'en milieu de nuit où les stations urbaines citées enregistrent des concentrations d'ozone supérieures de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ par rapport à la station rurale. Sur Orléans, les résultats diffèrent puisque la station rurale de Oysonville enregistre les concentrations les plus importantes tout au long de la journée. Cette situation permet d'émettre l'hypothèse d'une prédominance de conditions atmosphériques favorables au déplacement des masses d'air polluées de l'Ile-de-France vers le nord de la région Centre. Ces conditions se vérifient principalement en juillet et septembre. Les résultats obtenus diffèrent de ceux observés sur de plus longues séries où la persistance nocturne de l'ozone en milieu urbain est plus manifeste. Durant l'été 2004, les valeurs observées en milieu rural reste supérieures, même en fin de journée, concentrations urbaines. Néanmoins, il est nécessaire de rappeler l'importante distance qui sépare les stations rurales de chacune des agglomérations. De plus, situation géographique particulière de la station de Oysonville forme un paramètre supplémentaire qu'il faut intégrer dans les analyses.

Figure 13 : Variabilité des concentrations moyennes horaires d'ozone à Tours pour la période estivale 2004.

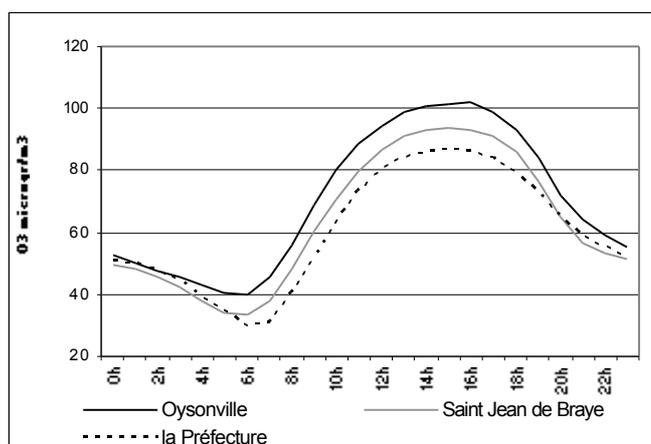
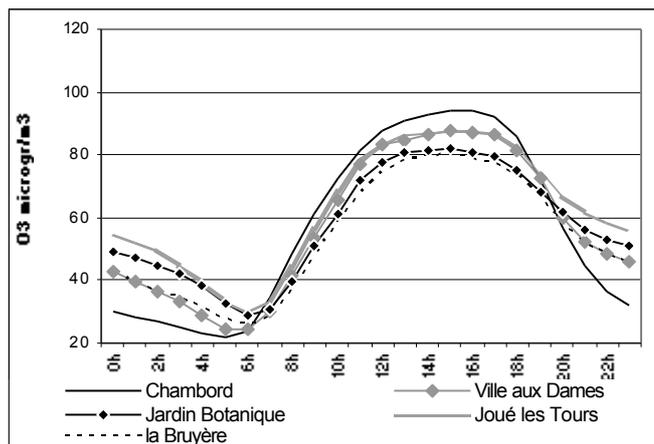


Figure 14 : Variabilité des concentrations moyennes horaires d’ozone à Orléans pour la période estivale 2004.



2.3. Variabilité des moyennes horaires durant les journées de dépassement du seuil de protection de la santé

L’analyse effectuée sur les 24 journées où le seuil de protection de la santé a été dépassé sur au moins une agglomération présente des résultats semblables à la comparaison précédente. A Orléans, la station de Oysonville conserve les valeurs les plus importantes en fin de journée et au cours de la nuit. Cependant, on remarque également que la station urbaine de la Préfecture observe des valeurs moyennes légèrement plus élevées que celles de Saint-Jean-de-Braye à partir de 19h, mais les écarts restent peu significatifs. Sur l’agglomération tourangelle, le même processus se reproduit avec une persistance marquée de l’ozone en milieu urbain en fin de journée.

L'écart maximal au cours de la nuit entre la station rurale de référence et la station urbaine de Joué-les-Tours peut atteindre $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figure 15 : Variabilité des concentrations moyennes horaires d'ozone à Tours sur les journées où le seuil de protection de la santé a été dépassé sur au moins une des deux agglomérations.

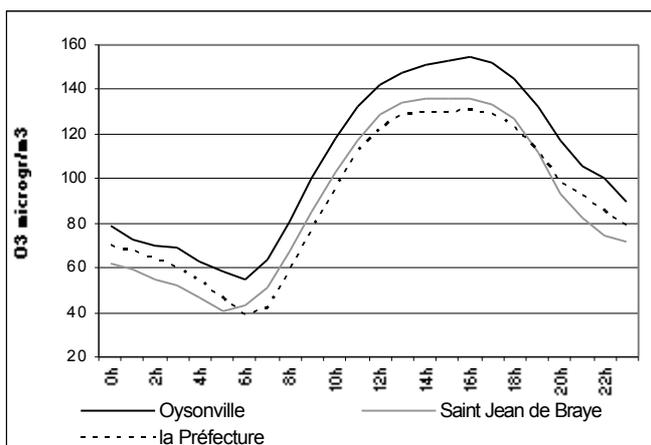
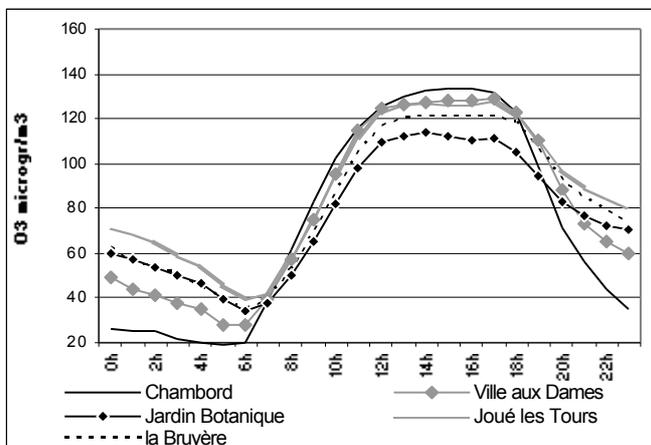


Figure 16 : Variabilité des concentrations moyennes horaires d'ozone à Orléans sur les journées où le seuil de protection de la santé a été dépassé sur au moins une des deux agglomérations.



2.4. L'influence de l'îlot de chaleur urbain ?

L'ozone se détruit durant la nuit près du sol au contact des NOx, mais aussi par déposition sèche. Ces deux mécanismes sont plus efficaces lorsqu'une inversion de température se développe depuis le sol, piège les NOx près du sol et empêche tout mélange d'air avec les couches d'air situées plus haut. En milieu urbain, un processus exogène à la photochimie semble atténuer le développement d'une inversion de température au moins au début d'une nuit claire et peu ventilée, par rapport à la campagne environnante. Par conséquent, la destruction de l'ozone par déposition sèche et au contact des NOx serait plus faible en ville qu'en campagne au début de la nuit, même si les NOx sont plus abondants en ville à ce moment de la journée [Labatut, 1997]. En outre, l'absence d'une inversion de température au début de la nuit en ville peut aussi favoriser un meilleur brassage de l'air dans la dimension verticale: la destruction nocturne de l'ozone près du sol par la déposition sèche est plus efficace dans un air calme que dans un air ventilé ou brassé. L'îlot de chaleur urbain apparaît comme le facteur le plus probable freinant le développement de l'inversion de températures

2.5. Une hypothèse difficile à justifier statistiquement

Il est difficile d'ignorer l'influence de l'îlot de chaleur urbain sur la persistance nocturne de l'ozone. Les analyses descriptives montrent de nombreuses similitudes entre la

variabilité horaire des deux variables suivant les différents milieux. Toutefois, il est également délicat de justifier statistiquement cette relation à travers les analyses multivariées. Dans notre cas nous disposons de trois variables actives : la température, l'ozone et les heures puisqu'il s'agit essentiellement de travailler sur la fin de journée. Les méthodes d'analyse des données permettent de caractériser un nuage de points en le projetant dans différents sous espaces, plus ou moins équivalents à des combinaisons linéaires et projections de l'espace initial. Cela marche très bien à deux conditions : les "caractères" les plus explicatifs apparaissent assez clairement dans l'espace initial (l'expérience montre qu'on a du mal à appréhender des relations à plus de 3 facteurs agissant simultanément) et on part d'une photo des données. Cette dimension temps ne peut pas être prise en compte correctement par des méthodes standard. De nouvelles investigations doivent être entreprises avec des outils utilisant le traitement du signal. On a un ou plusieurs signaux, et on cherche à caractériser son évolution afin de le simplifier. Ici, le temps est une variable primordiale.

Bibliographie

Cantat O., 1989 : *Contribution à l'étude des variations du bilan d'énergie en région parisienne, essai sur le bilan d'énergie dans les grandes métropoles*, Thèse de doctorat, Université de Paris IV-Sorbonne, volume n°1, 354 p.

Charabi Y., 2001 : *L'îlot de chaleur urbain de la métropole lilloise : mesures et spatialisation*, Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 236 p.

Conseil Supérieur d'Hygiène Publique en France, 1996 : *L'ozone, indicateur majeur de la pollution photochimique en France : évaluation et gestion du risque sur la santé*, Ministère du travail et des affaires sociales, Lavoisier, 164 p.

Endlicher W., 1981: « L'îlot de chaleur urbain d'Annecy. Quelques remarques sur le climat local d'une ville alpine », *Revue de Géographie Alpine*, LXIX, p. 407-419.

Labatut A., 1997 : *Contribution à l'étude des flux d'ozone dans la couche de surface*, Centre commun de recherche, Laboratoire d'Aérodologie de Toulouse, 214 p.

Soedomo M., 1988 : *Ozone troposphérique à l'échelle régionale : production et transfert dans le bassin parisien*, Thèse de doctorat, U.E.R de Sciences, Université de Paris XII Val-de-Marne, 315 p.

Conrads L-A., 1975: *Observations of meteorological urban effects, the heat island of Utrecht*, 83 p.

Escourrou G., 1991 : *Le climat et la ville*, Géographie d'aujourd'hui, Nathan Université, 190 p.

Haider T., 1997: « Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat », *Energy and Building*, p. 99-103.

Jauregui E., 1997: « Heat island development in Mexico city », *Atmospheric Environment*, volume 31, n°22, p. 3821-3831.

Menut L., 1997 : *Etude expérimentale et théorique de la couche limite atmosphérique en agglomération parisienne*, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris IV, 235 p.