

Climat urbain et impact sur la phénologie végétale printanière

H. Quéno⁽¹⁾, V. Dubreuil⁽¹⁾, A. Mimet⁽²⁾, V. Pellissier⁽²⁾, R. Aguejdad⁽¹⁾, P. Clergeau⁽³⁾ et S. Bridier⁽⁴⁾

(1) Laboratoire Costel, UMR 6554 LETG du CNRS et FR-Caren, université de Rennes 2, Place du Recteur Henri Le Moal, 35043 Rennes Cedex

(2) UMR CNRS 6553 Écobio, Écosystèmes - Biodiversité-Évolution et FR-Caen, université de Rennes 1

(3) UMR 7204 CERSP, département écologie et gestion de la biodiversité au Muséum national d'histoire naturelle

(4) UMR 6012 Espace, université de Provence

Résumé

L'impact de la ville, notamment l'îlot de chaleur urbain (ICU), sur la phénologie des plantes a été mis en évidence dans de nombreuses villes, provoquant un avancement phénologique printanier dans les zones urbaines par rapport aux zones rurales environnantes. Ce travail vise à mieux comprendre et approfondir la relation entre phénologie urbaine et climat urbain à l'échelle intra-urbaine, en prenant en compte la structure de la ville. C'est dans cet objectif qu'un réseau dense de stations météorologiques a été mis en place dans l'agglomération rennaise. Il permet de qualifier et quantifier les modifications climatiques dues à l'ICU. Parallèlement, des mesures phénologiques sur le cerisier sont réalisées afin de pouvoir établir le lien entre les données climatiques et biologiques. Les résultats mettent en évidence l'existence d'un gradient climatique et d'un gradient phénologique correspondant au type d'urbanisation sur la ville de Rennes. La ville influe sur la phénologie via la diminution de la différence thermique entre le jour et la nuit et par une augmentation de la température minimale en allant vers le centre urbain. Une influence du type de surface (végétalisée ou bâtie) sur la phénologie est également mise en évidence. ●●●

La variabilité spatio-temporelle du climat urbain est le résultat d'une très forte hétérogénéité de l'espace urbanisé présentant des surfaces horizontales et verticales qui modifient les caractéristiques physiques des basses couches de l'atmosphère (températures, vent, précipitations). Ces effets climatiques, essentiellement thermiques, résultent d'une modification du bilan d'énergie observé au sein de ce type d'espace (Escourrou, 1981 ; Cantat, 2004).

En ville, l'expression la plus concrète de la modification du bilan d'énergie est l'îlot de chaleur urbain (ICU). Caractérisé par un dôme d'air plus chaud couvrant la ville, l'ICU est la manifestation de la hausse de température engendrée par les caractéristiques physiques (bâti, etc.) et les activités de la ville. L'ICU est avant tout défini par la différence de température existant entre les secteurs centraux d'une agglomération et ses secteurs périphériques. Au-delà d'une trop simple distinction centre/périphérie, il s'appuie surtout sur des différences de surface et d'occupation du sol, le centre étant généralement occupé par un bâti dense, présentant des surfaces verticales rapprochées, alors que la périphérie est occupée par des surfaces horizontales végétalisées ou humides. L'intensité et l'extension spatiale de l'ICU dépendent du site de la ville, de sa morphologie (forme et densité du bâti, nature des matériaux de construction et des activités industrielles...), des conditions climatiques régionales et de la succession des types de circulation et de temps (Oke, 1987 ; Cantat, 1989 ; Lee, 1992). L'ICU est d'autant plus important, que la situation atmosphérique est stable (type anticyclonique), que le ciel est clair et que la vitesse du vent est faible. Par

situation anticyclonique, la stabilité de l'atmosphère renforce l'influence de la surface et accentue le gradient climatique ville-campagne ainsi que certains contrastes intra-urbains (exemples : espaces verts, lacs, etc.).

L'urbanisation considérable durant le xx^e siècle fait que de nombreuses études ont été réalisées sur l'ICU dans les principales mégalopoles d'Amérique du Nord (Oke, 1987) ou d'Europe (Escourrou, 1986). Peu d'études ont été réalisées dans des villes de tailles plus modestes et ces expérimentations ont surtout été effectuées pour évaluer l'impact du climat urbain sur la pollution atmosphérique (Besancenot, 1995 ; Janoueix-Yacono, 1995).

Depuis 2003, le programme pluridisciplinaire **Écorurb⁽¹⁾ (Écologie du rural vers l'urbain)** a pour objectif de comprendre les effets de l'urbanisation sur la biodiversité locale et de prévenir les risques biologiques à Rennes (Ille-et-Vilaine). En effet, parmi les modifications environnementales générées par l'accroissement urbain et qui sont susceptibles d'affecter la dynamique des espèces végétales, le climat apparaît comme une des variables clés à étudier.

Après un bref aperçu du programme Écorurb, nous présentons dans cet article les conditions de la mise en place d'un réseau d'observation climatologique pour la ville de Rennes et les choix techniques et de localisation qu'il a fallu opérer. Ensuite, les premiers résultats des années 2005 et 2006 concernant la variabilité spatio-temporelle de l'ICU et son impact sur la phénologie des plantes sont exposés.

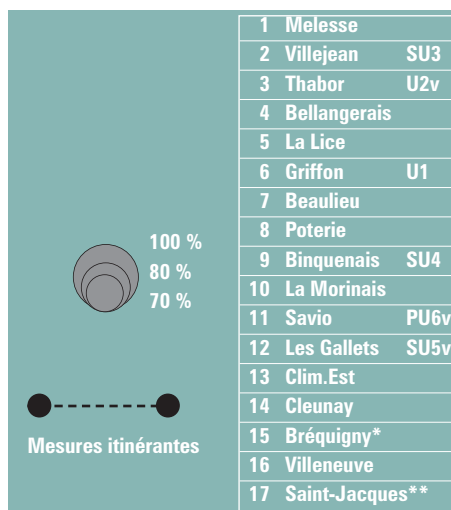
(1) <http://w3.rennes.inra.fr/ecorurb/>

Abstract

Urban climate and its impact on vegetation in Spring

The impact of the city via the Urban Heat Island (UHI) on the phenology of plants was highlighted in many cities causing a spring advance phenologic in the urban areas compared to rural areas. This work aims to understand this better, and to look further into the relation between urban phenology and urban climate on the intra urban scale, by taking into account the structure of the city. It is within this framework that a dense network of weather stations was set up in the urban area of Rennes (France). It makes it possible to qualify and quantify the climatic modifications due to the UHI. In parallel, phenologic measurements on the cherry are carried out, in order to be able to establish the link between the climatic and biological data. The results show the existence of a climatic and a phenologic gradient corresponding to the type of urbanization on Rennes city. The city influences the phenology via the reduction in the thermal difference between the day and the night and by an increase of the minimum temperature while going towards the urban centre. The influence of the type of surface (vegetated or built) on phenology is also shown.

Figure 1 - Carte de localisation des stations météorologiques et pourcentage de données disponibles pour la période 2005-2007 dans la région de Rennes (Ille-et-Vilaine) [fonds de carte IGN © au 1/100.000].
* Station 15 désactivée en 2006-2007, suite à des travaux sur le site.
** Station 17, station synoptique Météo-France de Saint-Jacques-de-la-Lande.



Un protocole spécifique adapté aux échelles spatiales locales a été établi et appliqué. L'originalité de cette étude est de pouvoir ainsi combiner les données issues des mesures météorologiques et les analyses biologiques et d'en déduire l'influence de l'occupation du sol en milieu urbain.

Le programme de recherche Écorurb

Depuis la fin de l'année 2003, un programme de recherche pluridisciplinaire centré sur la compréhension et la prédiction des relations biologiques ville-campagne (influencées par certains facteurs abiotiques comme le climat) est en place sur les agglomérations rennaise et angevine. Le projet Écorurb s'appuie notamment sur la comparaison de douze stations boisées, de même taille, réparties selon un gradient d'urbanisation (urbain, suburbain et périurbain) sur chacune des villes de Rennes (Ille-et-Vilaine) et d'Angers (Maine-et-Loire). L'équipe rassemble des chercheurs de diverses disciplines – agronomie, écologie, géographie, sociologie... – et organismes – Institut national de la recherche agronomique (Inra),

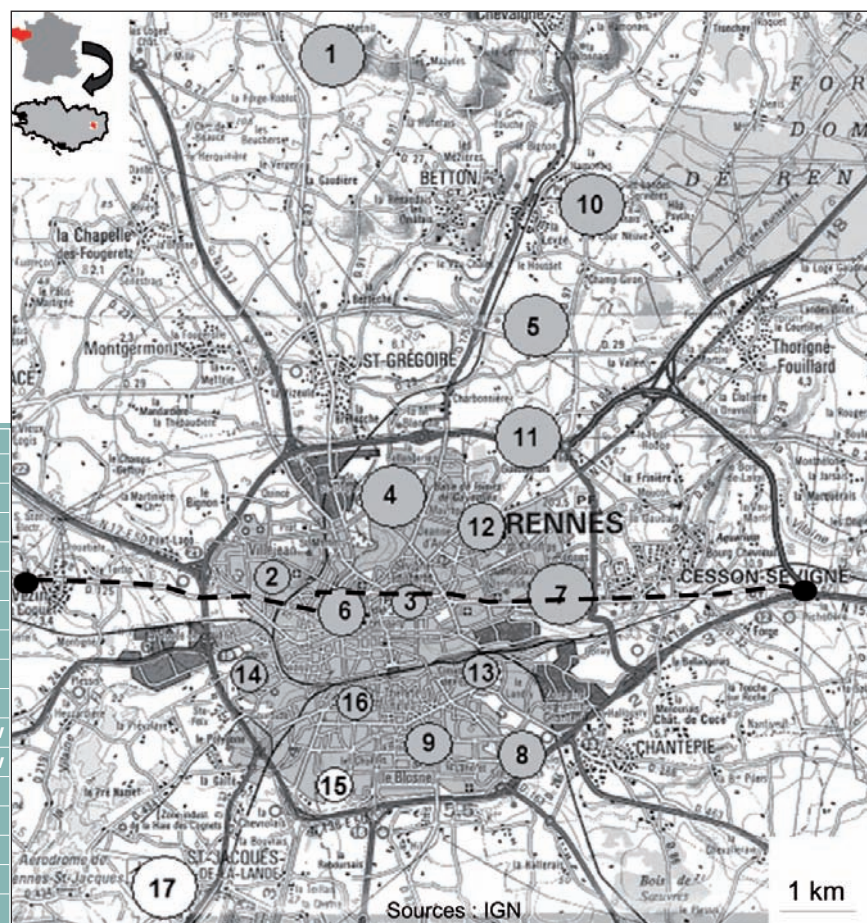
universités, Centre national de la recherche scientifique (CNRS) – et a obtenu un soutien financier et logistique important des deux villes et de leurs communautés d'agglomération ainsi que de l'Institut fédératif de recherche du Centre armoricain de recherches en environnement (Caren)⁽¹⁾. Ainsi, à Rennes, la ville a mis à disposition des terrains pour des expérimentations à long terme (dix ans) permettant l'installation de stations météorologiques le long d'un transect privilégié du centre-ville vers le nord-est de l'agglomération (forêt de Rennes).

Le cœur du projet, d'un point de vue écologique et biologique, porte donc sur l'étude des dynamiques des espèces à l'interface rural-urbain et vise notamment à :

- modéliser et prévoir les processus de colonisation-invasion et d'adaptation des espèces aux milieux très anthropisés ;
- étudier les flux d'espèces invasives et l'évolution de la biodiversité aux interfaces de milieux (écologie évolutive).

Un deuxième volet consiste à étudier les facteurs et/ou indicateurs contrôlant la biodiversité et la biologie urbaines.

(1) <http://www.caren.univ-rennes1.fr/>



Deux aspects ont été retenus pour la ville de Rennes :

- l'étude de la dynamique des paysages et de l'occupation du sol (par télédétection) ;
- la cartographie des climats locaux au moyen d'un réseau de mesure et de la phénologie d'espèces indicatives (Mimet et al., 2005).

Ce dernier point fait donc l'objet d'une attention plus particulière à Rennes avec la mise en place d'un réseau d'observation climatique comportant seize stations réparties sur l'agglomération.

Site d'étude, méthodes et données

Le site expérimental se situe dans la ville de Rennes et sa périphérie (figure 1). Le gradient d'urbanisation s'appuie sur la définition de trois niveaux d'urbanisation (Clergeau et al., 2001 ; Clergeau et al., 2006 ; Pellissier et al., 2008) calculés à partir de données de pourcentage de recouvrement du sol par différentes classes : bâti, voirie, surfaces boisées, surfaces enherbées et surfaces cultivées.

La zone urbaine est caractérisée par un fort recouvrement en voirie et bâti. Elle inclut le centre urbain commercial, le centre historique dont la surface végétalisée n'excède pas 15 % et les espaces résidentiels adjacents dont les immeubles atteignent un à cinq étages avec 20 à 40 % de surface végétalisée.

La zone suburbaine possède également un recouvrement important en voirie et bâti avec un recouvrement en zones végétalisées supérieur. Elle correspond aux zones résidentielles constituées de maisons individuelles avec des jardins et des complexes résidentiels entourés d'espaces verts. La surface végétalisée dans cette zone peut atteindre 70 %.

La zone périurbaine est la zone agricole et naturelle adjacente à la ville. Elle s'étend sur plusieurs kilomètres au-delà des limites de la zone suburbaine.

Données climatiques

Deux types de mesures météorologiques ont été réalisés : des mesures fixes et des mesures mobiles. Les mesures sur des stations fixes permettent d'obtenir simultanément sur divers points de



Figure 2 - Station suburbaine non végétalisée de Villejean (SU3).

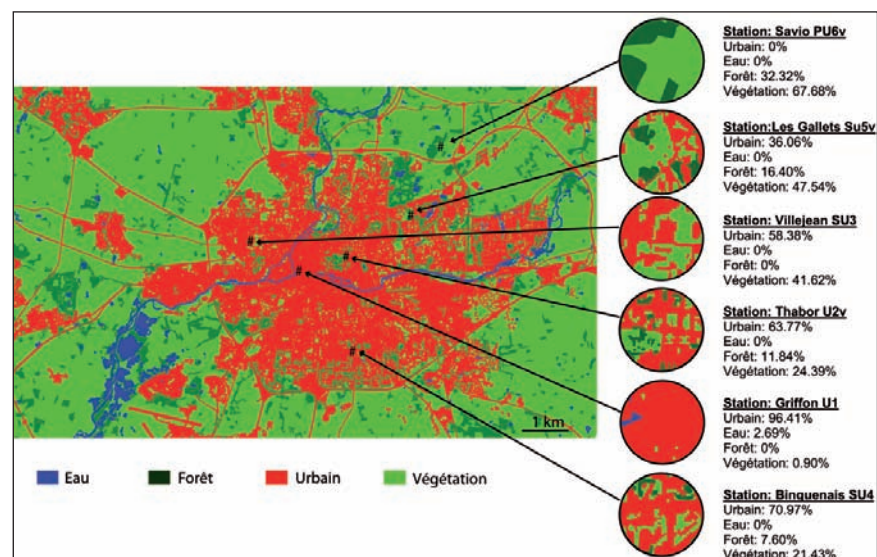
l'espace des données en continu ; cependant, le nombre limité de stations météorologiques ne permet pas de couvrir la totalité de l'espace étudié. Pour pallier cette insuffisance et affiner les observations, des mesures itinérantes de la température de l'air à l'aide d'un capteur à thermistance, embarqué sur un véhicule, ont été effectuées.

Des stations fixes et automatiques Weather Monitor 2 ont été installées dans la ville de Rennes et dans sa périphérie (figure 2). Elles permettent de mesurer l'ensemble des paramètres météorologiques en continu. Dès leur acquisition, les stations ont d'abord été contrôlées pendant plusieurs semaines afin de tester l'homogénéité des mesures effectuées par tous les capteurs. Les tests de contrôle ont montré la bonne

cohérence des mesures effectuées par les stations. Pour les températures (thermistance sous abri), l'écart moyen varie entre +0,17 °C et -0,09 °C par rapport à la station de référence ; l'écart maximal moyen entre les deux stations les plus différentes est inférieur à trois dixièmes. Pour toutes les stations, les écarts supérieurs à 1 °C représentent environ 1 % des observations et les écarts supérieurs à 0,5 °C représentent en général moins de 5 % des observations. Pour l'humidité relative (capteur sous abri avec mesures capacitatives), les écarts varient de +1,9 % à 3,9 %, ce qui, compte tenu de la précision annoncée des capteurs par le constructeur (± 5 %), est parfaitement acceptable.

Après cette période de test, les stations ont progressivement été installées entre la fin de l'année 2003 et la fin 2004 (2005 pour la dernière). Pour cette implantation, le plan cadastral du bâti de l'agglomération rennaise a été consulté afin de repérer les secteurs a priori favorables à l'installation des stations. Logiquement, les espaces disponibles sont essentiellement les parcs, mais aussi les cimetières, les enceintes de bâtiments scolaires et de certaines administrations. Enfin, les sites retenus doivent aussi être à proximité des parcelles de suivi de la biodiversité, être répartis de façon assez homogène sur l'agglomération (la partie nord-est étant cependant privilégiée pour l'étude écologique) et tenir compte des types de bâtis existants (grands ensembles, zones pavillonnaires...). De façon plus précise, les obstacles à proximité des stations restant nombreux en ville, nous avons également cherché à placer les stations dans des sites bien dégagés vers le sud (afin d'éviter les effets d'ombre pour la

Figure 3 - Occupation du sol dans un rayon de 200 mètres autour des six stations météorologiques et agromonomiques de la région rennaise.



mesure des températures maximales) ainsi que vers l'ouest afin de mieux tenir compte des vents dominants. De façon délibérée, il a donc été choisi de privilégier les mesures de températures, la quantification précise de l'îlot de chaleur urbain étant, par hypothèse, le phénomène le plus susceptible d'affecter la répartition des espèces.

Chaque station a été intégrée dans un Système d'informations géographiques (SIG) contenant l'occupation du sol. L'analyse de l'occupation du sol dans un rayon 200 mètres (buffer) a été réalisée pour chaque station de manière à intégrer son environnement proche (figures 1 et 3).

Données biologiques

Ce dispositif expérimental a pour objectif d'étudier le rôle direct du climat urbain sur la phénologie printanière, par la mise en relation directe entre les données phénologiques et les données climatiques des sites. Il est complété par un protocole expérimental novateur visant à éliminer le biais causé par la variabilité phénologique intraspécifique. Des branches de cerisier sont prélevées sur un même individu et à la même hauteur. Cette dernière précaution limite les variations phénologiques qui pourraient découler d'une alimentation différentielle des niveaux de la plante en qualité ou en quantité de sève. Les rameaux possèdent différentes propriétés de taille et de nombre de bourgeons :

- **rameaux « simples »** : 6 à 9 bourgeons, 18 à 25 cm, sans ramification ;
- **rameaux « moyens »** : 11 à 17 bourgeons, 15 à 25 cm, une ramification ;
- **rameaux « grands »** : 20 à 31 bourgeons, 31 à 43 cm, au moins une ramification.

Cinq rameaux, soit un simple, deux moyens et deux grands, ont été placés sur chaque station. Le nombre total de bourgeons disposés sur chaque site est compris entre 76 et 93. S'il existe des réactions phénologiques différentielles des rameaux en fonction de leur taille ou du nombre de bourgeons, elles seront prises en compte sans affecter les résultats. Les rameaux ont ensuite été installés dans des sachets d'eau (avec eau de Javel diluée au 1/1000 pour limiter la prolifération des micro-organismes). Ces sacs sont orientés au sud et placés contre un mur ou une haie à 1,5 m de hauteur, pour se trouver dans les mêmes conditions d'ensoleillement.

Ces conditions sont respectées sur l'ensemble des sites à l'exception du site des Gallets (en zone suburbaine), qui est une grande pelouse sans haie ni mur. Les sachets y ont été fixés à un grillage.

Les suivis phénologiques ont été réalisés en déterminant les stades de développement phénologique des bourgeons à l'aide des quatre variables allant du débourrement du bourgeon à la floraison :

- **BG** : bourgeon gonflé ;
- **BS** : bourgeon éclaté ;
- **BF** : fleur visible ;
- **F** : bourgeon en fleur.

Le dispositif est mis en place à proximité (1 à 2 m) de six stations météorologiques, le 8 mars 2005. Les stations se répartissent sur un gradient d'urbanisation nord-est/sud-ouest s'étendant du centre-ville à la zone périurbaine. Chaque station est caractérisée par son appartenance à l'une des trois zones d'urbanisation : urbain (**U**), suburbain (**SU**) et périurbain (**PU**) ; ainsi que par les conditions de végétalisation de la station : végétalisée (**v**) ou non-végétalisée (pas de marqueur).

Les six stations, numérotées de la plus proche du centre-ville à la plus éloignée et en fonction de leur environnement, sont :

- en zone urbaine (**U**), deux stations : **U1**, station urbaine non-végétalisée de Griffon ; **U2v**, station urbaine végétalisée de Thabor ;
- en zone suburbaine (**SU**), trois stations : **SU3**, station suburbaine non-végétalisée de Villejean ; **SU4**, station suburbaine non-végétalisée de Binquenais ; **SU5v**, station suburbaine végétalisée de Gallets ;
- en zone périurbaine (**PU**), une station : **PU6v**, station périurbaine végétalisée de Savio.

La station **SU4** a été choisie pour sa localisation au sud-est du centre, zone apparaissant plus chaude sur les données climatiques que les autres quartiers suburbains.

Figure 4 - Températures maximales (a) et minimales (b) mensuelles en 2005 pour les stations de Melesse (périurbaine) et de la Binquenais (suburbaine).

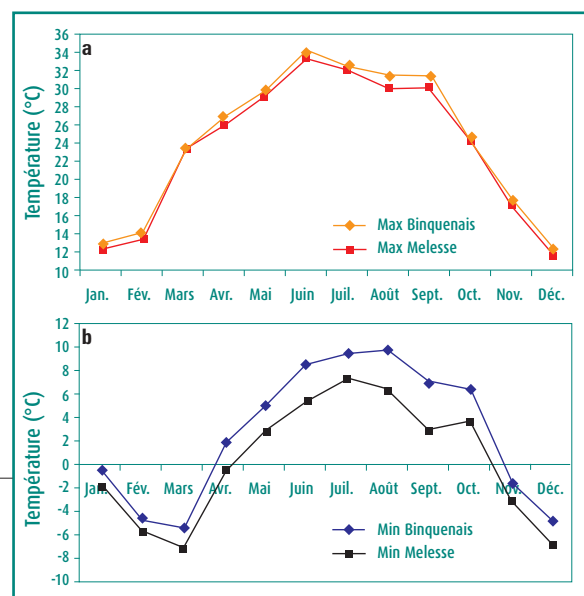
Résultats

Variabilité importante des températures dans Rennes et sa périphérie

Les résultats montrent que l'îlot de chaleur urbain est plus marqué pour les températures minimales (moyennes et absolues) que pour les températures maximales. En septembre 2005, par exemple, l'écart pour les minima entre les stations de Melesse (périurbaine) et de la Binquenais (suburbaine) atteint ainsi 4 °C contre 1,4 °C pour les maxima ; l'écart entre les températures moyennes est également plus modeste, mais dépasse tout de même 2 °C certains mois (figure 4).

À l'échelle intra-urbaine, l'environnement immédiat de chaque station laisse apparaître des nuances liées à l'hétérogénéité du bâti ou l'existence de parcs intra-urbains : ainsi, par exemple, la température minimale d'avril 2005 de la station centrale du Thabor (principal parc du centre-ville) est un peu moins élevée que celle du Griffon située dans une cour fermée sans végétation du centre historique (figure 5).

Les données saisonnières et horaires montrent aussi clairement la variabilité temporelle de l'ICU. En 2005, des situations atmosphériques favorables (situations anticycloniques à ciel clair et vent faible) en août et septembre ont favorisé le développement de l'ICU pendant la nuit. En revanche, les mois couverts et pluvieux n'ont pas été propices à sa formation. L'intensité de l'ICU est plus marquée l'été en fin de



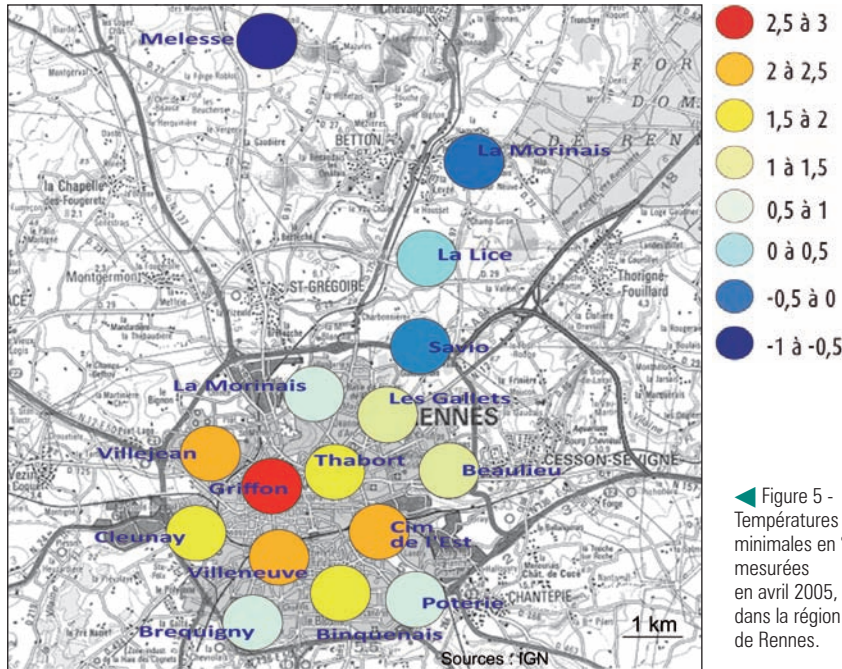
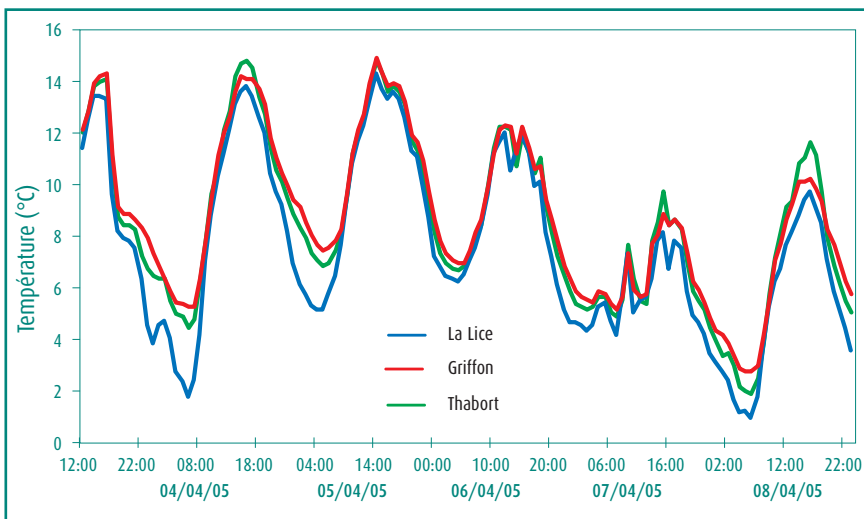


Figure 5 - Températures minimales en °C, mesurées en avril 2005, dans la région de Rennes.

Figure 6 - Variations horaires de la température (°C) à Rennes du 4 au 9 avril 2005 pour les stations de Griffon (urbaine non-végétalisée U1), du Thabor (urbaine végétalisée U2v) et de La Lice (périurbaine végétalisée).



Par exemple, l'écart thermique est en moyenne de plus de 2 °C de 21 heures à 6 heures en août et septembre, alors que pendant les mois d'hiver, il est inférieur à 1 °C. En revanche, pendant la journée, les écarts moyens horaires entre le centre-ville et la campagne ne dépassent pas quelques dixièmes de degrés (tableau 1).

La variabilité journalière de l'intensité de l'ICU peut également être illustrée sur les stations de Griffon (urbaine), Thabor (urbaine-végétalisée) et La Lice (périurbaine) entre le 4 et le 9 avril 2005 (figure 6). Au cours de cette période, l'ICU peut être mis en relation avec les types de temps observés (Cantat, 2004), ainsi :

- l'ICU est plus marqué le 4 et 5 avril 2005, où la situation atmosphérique était de type anticyclonique avec un ciel clair et un vent faible. Les écarts nocturnes atteignent 3 °C entre la station du centre-ville et celle en campagne. À l'échelle intra-urbaine, on observe des écarts de températures de l'ordre de 0,5 à 0,7 °C ;
- les 6, 7 et 8 avril 2005, les écarts thermiques sont beaucoup moins importants. La situation atmosphérique dépressionnaire (nuages et vent fort) engendre une homogénéisation des températures par brassage de l'air et effet de la nébulosité. Toutefois, les températures enregistrées en ville sont quand même plus chaudes (environ 1 °C).

Ces résultats issus des stations fixes ont été complétés par des transects thermiques nocturnes. Les résultats confirment que le gradient campagne/

Tableau 1 - Différence de températures moyennes horaires (°C) entre Binquenaais (suburbaine SU4) et Melesse (périurbaine) pendant l'année 2005, par mois et par heure TU de la journée.

Heure TU	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
Janv.	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,6	0,9	1,0	0,9	0,7	0,7	0,6	0,6
Fév.	1,0	1,0	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	0,6	0,4	0,1	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6	0,8	1,1	1,2	1,1	1,1	0,7
Mars	1,7	1,7	1,7	1,5	1,5	1,5	1,3	1,1	0,8	0,3	0,0	-0,2	-0,2	-0,1	0,0	-0,1	-0,1	0,2	0,6	1,0	1,5	1,7	1,6	1,5	0,9
Avril	1,4	1,3	1,3	1,2	1,0	1,0	1,0	0,9	0,5	0,1	0,1	0,2	-0,2	-0,2	0,0	0,0	0,1	0,4	0,4	0,7	0,8	1,0	1,2	1,3	0,7
Mai	1,5	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,4	0,6	0,6	0,8	1,1	1,3	1,4	1,4	0,8
Juin	1,6	1,5	1,6	1,6	1,6	1,5	1,2	0,7	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,7	0,7	0,8	1,0	1,0	1,2	1,6	1,6	1,6	1,0
Juil.	1,5	1,5	1,5	1,3	1,3	1,1	1,1	0,8	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,3	0,4	0,6	0,6	0,6	0,8	0,9	1,1	1,3	1,6	1,6	0,9
Août	2,1	2,2	2,4	2,4	2,3	2,3	2,3	1,8	1,2	0,7	0,6	0,5	0,3	0,3	0,4	0,5	0,4	0,5	0,8	1,2	1,5	1,9	2,1	2,3	1,4
Sept.	2,2	2,3	2,3	2,3	2,2	2,0	1,9	1,8	1,2	0,9	0,8	0,6	0,3	0,1	0,4	0,2	0,2	0,7	1,1	1,4	1,8	2,0	2,1	2,1	1,4
Oct.	1,0	1,2	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,4	0,5	0,5	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,6	0,8	1,1	1,3	1,3	1,2	1,0	0,8
Nov.	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1	0,8	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8
Déc.	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8	0,6	0,5	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,7	1,0	1,0	1,1	1,2	1,1	0,9	0,8
	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,2	1,0	0,8	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,4	1,4	0,9

2,4 et plus de 2,0 à 2,3 de 1,5 à 1,9 de 1,0 à 1,4 de 0,5 à 0,9 de 0,1 à 0,4 de -0,2 à 0

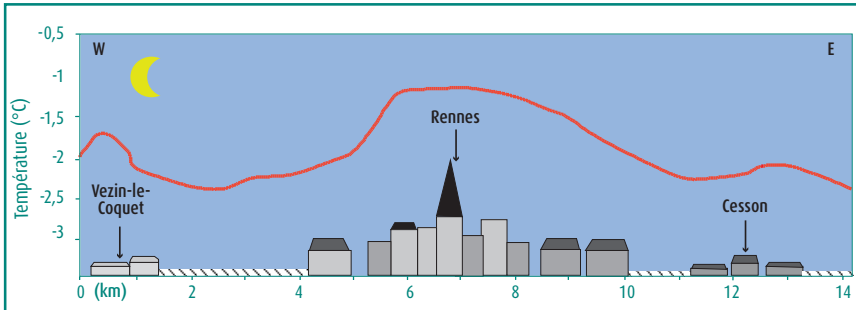


Figure 7 - Mesure de l'îlot de chaleur urbain (ICU) en °C à Rennes par mesures itinérantes en situation anticyclonique : exemple de la nuit du 25 février 2005.

centre-ville est important. Il atteint 1,5 à 2 degrés en moyenne en fin de nuit, mais peut dépasser 7 degrés dans certaines situations : deux écarts records de 8,1 °C et 8,2 °C ont même été observés le 22 septembre 2005 à 21 heures et le 19 juillet 2005 à 5 heures ! Ces transects mettent en évidence une forte variabilité spatio-temporelle de la température qui est fonction de la proportion et de la densité du bâti par rapport aux secteurs végétali-

sés. Par exemple, lors d'un itinéraire ouest/est réalisé au cours de la nuit du 25 février 2005 (avec ciel clair et vent très faible), on observe que la température augmente dans les secteurs avec du bâti dense (centre-ville), alors qu'elle baisse instantanément dès que l'on traverse un secteur végétalisé (figures 1 et 7).

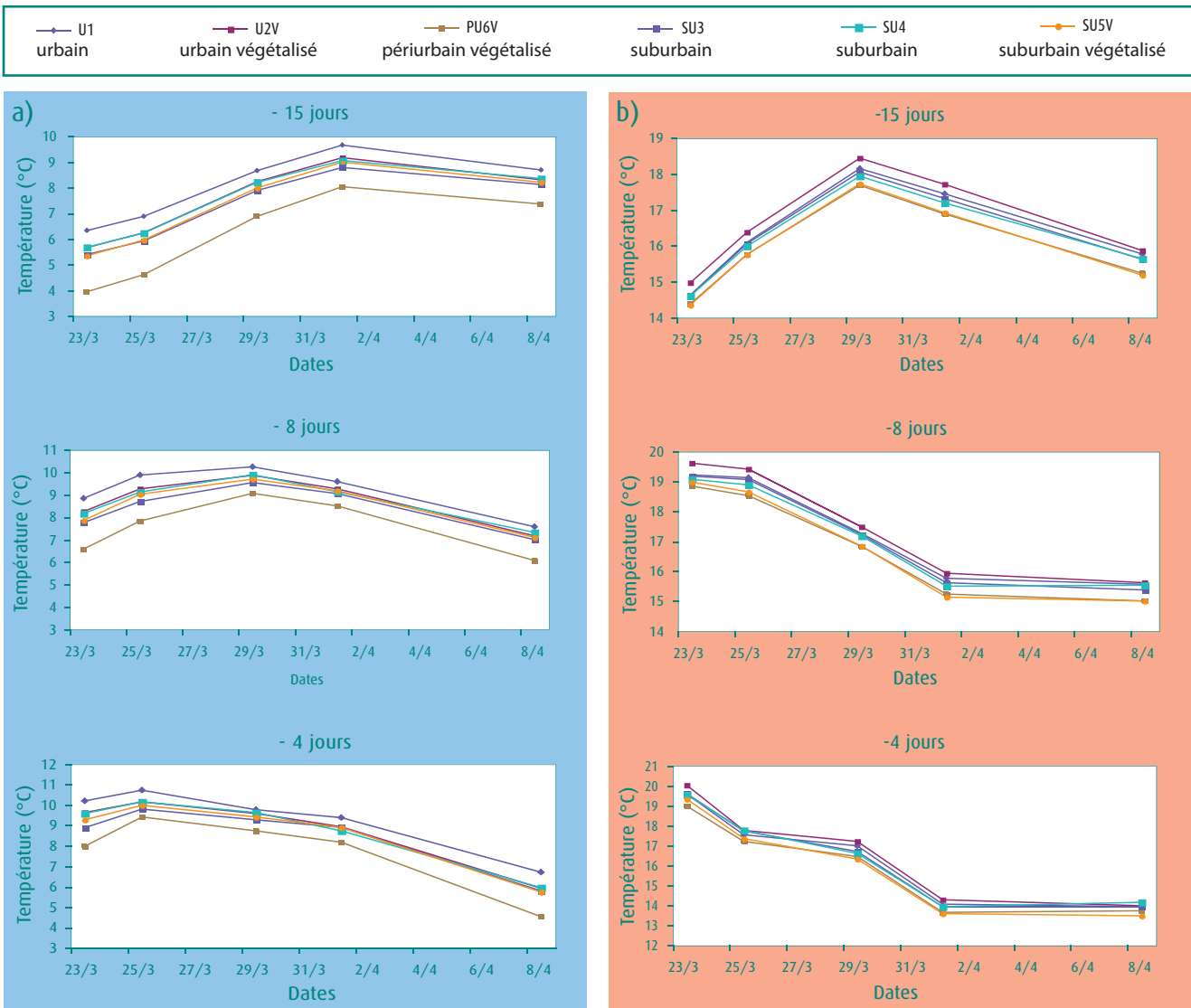
L'ensemble des données météorologiques relevées durant la période expérimentale

a mis en évidence une forte variabilité des températures sur des espaces relativement restreints. Les observations biologiques durant le printemps 2005 ont pour objectif d'examiner s'il existe une relation entre la forte variabilité spatio-temporelle des températures et la croissance des plantes.

Réponse phénologique

L'analyse de la phénologie en relation avec l'îlot de chaleur urbain a nécessité le calcul des moyennes des températures minimales et maximales 15 jours, 8 jours et 4 jours avant les dates d'observation de la phénologie (23/03/05, 25/03/05, 29/03/05, 01/04/05). En effet, l'état d'avancement des bourgeons à une date précise dépend de nombreux facteurs et en particulier des conditions thermiques précédant la date d'observation. Il est donc nécessaire de connaître le comportement des

Figure 8 - Moyenne des températures minimales (a) et maximales (b), sur 15 jours, 8 jours et 4 jours avant les dates d'observation de la phénologie (23/03/05, 25/03/05, 29/03/05, 01/04/05), pour les six stations météorologiques et agronomiques de la région rennaise.



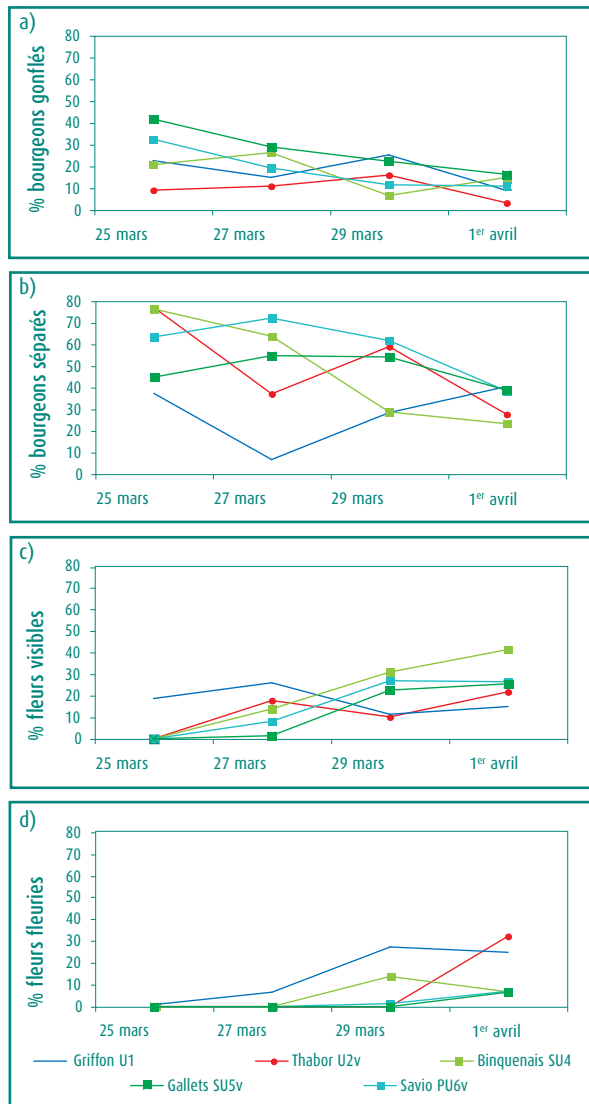


Figure 9 - Pour chacun des quatre stades phénologiques, comparaison des évolutions entre stations pour les 25, 27, 29 mars et 1^{er} avril 2005 :

a) pourcentage de bourgeons ayant atteint le stade « bourgeons gonflés »
 b) pourcentage de bourgeons ayant atteint le stade « bourgeons séparés »
 c) pourcentage de bourgeons ayant atteint le stade « fleurs visibles »
 d) pourcentage de bourgeons ayant atteint le stade « fleurs fleuries ».

01/04/05. Les bourgeons n'étant pas encore entrés dans le stade « bourgeons gonflés » et les bourgeons étant sortis du stade « fleurs fleuries » (c'est-à-dire que les fleurs ont fané) ne sont pas représentés ici. La somme des pourcentages par date et par station n'est donc pas nécessairement égale à 1 (Mimet et al, 2009).

Les stations SU5v et PU6v, les deux plus extérieures à la ville, situées dans des espaces verts, montrent des profils similaires : leur nombre de bourgeons gonflés décroît de façon

à peu près régulière pendant la période d'observation. Le maximum « bourgeons séparés » apparaît autour du 25 mars alors que les rameaux commencent à fleurir entre le 29 mars et le 1^{er} avril. Les deux stations ont d'ailleurs moins de fleurs visibles le 29 mars que les autres stations. Les maximums de ces deux stations sont bien identifiés. La période d'observation ne permet de voir que le début de la floraison. Pour les trois premiers stades et les trois premières dates, il existe une différence d'environ 10-15 % entre les deux stations, qui tend à diminuer pour disparaître à la fin de l'observation. Cette tendance est confirmée par le graphique représentant les bourgeons fleuris, sur lequel les courbes des deux sites sont pratiquement superposées. Le commencement du débourrement apparaît donc plus précoce en zone périurbaine, mais cette différence n'a ensuite pas d'incidence sur le nombre de bourgeons du début de la floraison.

Les stations U1 et U2v sont deux stations urbaines. U2v est placée dans un espace vert, alors que U1 se trouve dans des

conditions très urbanisées. Les deux stations montrent un comportement similaire assez chaotique durant les trois premières phases au cours desquelles il est difficile de lire une tendance. Deux maximums sont identifiables aux stades « bourgeons gonflés » (25 et 29 mars), « bourgeons séparés » (25 et 29 mars pour U1 et 25 mars et 1^{er} avril pour U2v) et « bourgeons en cours de floraison » (27 mars et 1^{er} avril). Si les deux courbes suivent le même schéma pendant une grande partie du développement, ce n'est pas le cas au moment de la floraison. La station U1 a fleuri plus tôt et elle atteint un maximum de floraison alors que l'U2v n'a pas commencé à fleurir (29 mars). Les deux courbes se croisent à la fin de la période d'observation et les bourgeons de la station U2v se mettent à fleurir beaucoup et d'un seul coup, rattrapant le pourcentage de floraison de U1 en fin d'observation. Les deux stations urbaines se différencient des autres stations par leur floraison le 1^{er} avril.

Le comportement des bourgeons de la station SU3 se rapproche au cours de la phase « bourgeons gonflés » de celui des stations du centre-ville, avec deux maximums (27 mars et 1^{er} avril), bien que les deux pics soient plus tardifs. Sa floraison suit également le même schéma que U1, et vient se placer entre les stations urbaines et les stations périurbaines. Pour les autres stades, les courbes indiquent des tendances nettes, proches de celles des sites périurbains, avec une légère avance sur eux. De manière générale, cette station apparaît comme intermédiaire entre les comportements observés en centre-ville et en périurbain.

Deux maximums de débourrement sont identifiables au stade « bourgeons gonflés » pour les trois stations. Le deuxième maximum de la station SU3 apparaissant à fin des observations, il est normal de ne pas l'observer dans les stades postérieurs de développement.

D'une façon plus générale, il apparaît que la station la plus précoce en termes de floraison est la station U1. Les deux premières stations à atteindre une floraison supérieure à 25 % sont les deux stations du centre-ville, suivies de SU3 (périphérie chaude de la ville). Ces observations biologiques semblent correspondre avec les résultats de l'étude climatique. En effet, on note des températures plus élevées (en particulier, pour les minimales) d'environ 2,5 °C pour la station urbaine et d'environ 1,5 °C pour les stations urbaines et suburbaines par rapport à la station périurbaine. Ces constatations sont vérifiées pour chaque

températures antérieures à l'avancée phénologique.

La moyenne des températures minimales, 15 jours, 8 jours et 4 jours avant les dates d'observation de la phénologie (23/03/05, 25/03/05, 29/03/05, 01/04/05) montrent que l'îlot de chaleur urbain est bien marqué pour les températures minimales, plus que pour les températures maximales (figure 8). Les températures les plus basses sont relevées dans le secteur périurbain, mais en zone suburbaine végétalisée ou même urbaine végétalisée, la présence de végétation limite l'influence de la ville sur l'augmentation des températures (figure 8).

Les graphiques représentant l'évolution temporelle de la phénologie des rameaux de cerisier (figure 9) permettent de classer les stations selon leurs profils d'évolution. Sur les six stations mises en place, seuls les résultats de cinq sont exploitables, les rameaux de la dernière station (SU4), situés dans une école, ont disparu. Les observations ont été réalisées les 25/03/05, 27/03/05, 29/03/05 et

station quel que soit le nombre de jours avant les observations phénologiques (figures 8 et 9).

Discussion et conclusion

Les données issues du réseau météorologique ont montré une forte variabilité spatio-temporelle du climat à l'échelle ville/campagne mais également à l'échelle intra-urbaine. Ainsi, d'importantes variations climatiques sont observées entre les stations urbaines, suburbaines et périurbaines. Outre la distance au centre-ville (où le bâti dense engendre une augmentation diurne et nocturne des températures), la nature de l'occupation du sol a un impact important sur le climat local. Ainsi, le climat observé dans une zone dégagée et végétalisée suburbaine peut être très proche de celui relevé dans une zone périurbaine.

L'ICU possède deux caractéristiques principales liées à la température : une augmentation de la température moyenne en ville accompagnée d'une diminution des écarts journaliers de température entre jour et nuit. Les espaces végétalisés urbains connaissent

donc des températures moyennes plus élevées que celles des zones rurales. À l'intérieur de ces espaces, les écarts journaliers de température sont plus conséquents et se rapprochent de ceux existant en zones rurales (Carrega, 1994).

Nos résultats phénologiques confirment les travaux déjà réalisés dans des villes européennes (Roetzer et al., 2000) et chinoises (Luo et al., 2007). La première constatation est un déclenchement plus précoce de la floraison en ville. Les écarts thermiques enregistrés entre chaque station météorologique montrent une concordance avec les observations phénologiques : les différences de température (notamment températures minimales) entre les secteurs urbains, suburbains et périurbains sont plus importantes au cours des premières observations, notamment au moment du débourrement. C'est à cette période que les écarts phénologiques sont les plus forts.

Une analyse statistique de la relation entre les données météorologiques et la phénologie a montré que le facteur principal expliquant les différences de floraison dans les différentes zones d'urbanisation est la différence thermique entre le jour et la nuit mesurée pendant

les 8 jours avant l'observation (Mimet et al., 2009). Les grands écarts thermiques journaliers favorisent le début précoce du débourrement des bourgeons, puis retardent le développement des fleurs (situation en campagne) ce qui a pour conséquence d'aligner les dates de floraison des zones végétalisées, qu'elles se trouvent en zone urbaine, suburbaine ou périurbaine.

La méthodologie simple et efficace mise en œuvre dans ce travail a permis de mettre en évidence l'impact direct d'un phénomène climatique bien connu, l'îlot de chaleur urbain, sur le déclenchement des phénophases printanières. Elle a permis de s'affranchir des problèmes posés par l'étude des végétaux à long cycle de vie, tels que les arbres, pour ne se concentrer que sur les variations directes engendrées par des conditions climatiques urbaines sur les bourgeons.

Les applications de ce type d'étude bioclimatique sont nombreuses. Outre l'impact du climat urbain sur l'évolution de la biodiversité et l'adaptation des espèces végétales en milieu urbain, l'analyse spatio-temporelle fine du climat et de la phénologie peut être notamment appliquée aux plantes allergogènes afin de mieux prévoir les pathologies telles que l'asthme.

Bibliographie

- **Besancenot J.-P.**, 1995 : Vague de chaleur, pollution atmosphérique et surmortalité urbaine. In : *Climat, pollution atmosphérique, santé. Hommage à Gisèle Escourrou*. Dijon, GDR climat et santé, 47-70.
- **Cantat O.**, 1989 : *Contribution à l'étude des variations du bilan d'énergie en région parisienne. Essai sur les bilans d'énergie dans les grandes métropoles*. Thèse de doctorat, université de Paris 4, 2 volumes, 362 p. et 254 p.
- **Cantat O.**, 2004 : L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois*, 2, 75-102.
- **Carrega P.**, 1994 : *Topoclimatologie et habitat. Revue d'analyse spatiale quantitative et appliquée*, Thèse d'État, 35 & 36. 408p.
- **Clergeau P., J. Jokimäki et J. P. L. Savard**, 2001 : Are urban bird communities influenced by the bird diversity of adjacent landscapes? *J. Appl. Ecol.*, 38, 1122-1135.
- **Clergeau P, S Croci, J. Jokimäki, M. L. Kaisanlahti-Jokimäki et M. Dinetti**, 2006 : Avifauna homogenisation by urbanisation: Analysis at different European latitudes. *Biological Conservation*, 127, 336-344.
- **Escourrou G.**, 1981 : *Climat et environnement. Les facteurs locaux du climat*. Masson, Paris. 182 p.
- **Escourrou G.**, 1986 : Le climat de l'agglomération parisienne. *L'Information géographique*, 50, 96-102.
- **Janoueix-Yacono D.**, 1995 : Rapports entre brise de mer ou de lac, structure de la couche limite planétaire et pollution atmosphérique sur des plaines littorales urbanisées. *Climat, pollution atmosphérique, santé*. Dijon, GDR climat et santé, 177-201.
- **Lee D. O.**, 1992 : Urban warming? An analysis of recent trends in London's heat island. *Weather*, 47 (2), 50-56.
- **Luo Z., O. J. Sun, Q. Ge, W. Xu et J. Zheng**, 2007 : Phenological responses of plants to climate change in an urban environment. *Ecology Research*, 22, 507-514.
- **Mimet A., V. Dubreuil, H. Quéno, F. Rozé et P. Clergeau**, 2005 : Dynamique de la végétation en relation avec la température dans l'interface rural-urbain. *XX^e colloque de l'Association internationale de climatologie*, Gênes, 81-84.
- **Mimet A., V. Pellissier, H. Quéno, V. Dubreuil, R. Aguejdad et F. Roze**, 2009 : Urbanisation induces early flowering: evidence from *Platanus acerifolia* and *Prunus cerasus*. *International Journal of Biometeorology* (sous presse).
- **Oke T. R.**, 1987 : *Boundary Layer Climates*. Deuxième édition, London, 372 p.
- **Pellissier V., F. Rozé, R. Aguejdad, H. Quéno et P. Clergeau**, 2008 : Relationship between the soil seed bank, vegetation and soil fertility along an urbanisation gradient. *Applied Vegetation Science*, 11/03, 325-334.
- **Roetzer T., M. Wittenzeller, H. Haeckel et J. Nekovar**, 2000 : Phenology in Central Europe. Differences and trends of spring phenophases in urban and rural areas. *International Journal of Biometeorology*, 44. 60-66.