

Incertitudes des mesures en climatologie appliquées aux échelles fines: exemple de l'aérodologie nocturne dans la région caennaise

Aurélie Dudouit Fichet*, Hervé Quénot**

Aux échelles fines, les conditions atmosphériques au niveau de la couche limite sont tributaires des conditions de surface (Yoshino, 1975; Oke, 1987). La morphologie, les aspérités et la nature de la surface définies par le relief, la végétation ou par diverses infrastructures humaines, modifient le comportement des variables météorologiques et caractérisent à terme le microclimat (Carrega, 1994; Quénot, 2002). Pour étudier le climat aux échelles fines, il est nécessaire d'aborder le milieu dans sa globalité et de définir l'influence des différents éléments de la surface susceptibles de modifier la météorologie locale. D'après Guyot (1997), les distances caractéristiques sont de 100 km pour le climat régional, de 10 km à 1 km pour le climat local et de 100 m à moins d'1 m pour le microclimat.

Les approches de ces phénomènes à partir des réseaux météorologiques apportent des résultats trop approximatifs. En effet, les stations météorologiques françaises sont disposées suivant une maille moyenne de 30 km et sont "*plus représentatives du climat régional que du climat local et du microclimat*" (Guyot, 1997). L'analyse des données des réseaux météorologiques pour déterminer le climat local ne permet pas d'évaluer l'influence des caractéristiques de surface sur les variables atmosphériques (sauf si la station est disposée à proximité). Cela engendre une source d'incertitude importante ne permettant pas de répondre à des problématiques de climatologie aux échelles fines.

Une étude exploratoire des journées de brises, à partir des données météorologiques horaires de la station régionale de Météo France de Caen-Carpique, a permis de déterminer les caractéristiques temporelles de la brise de mer (fréquence et conditions d'apparition, horaires d'apparition et de disparition) dans la région caennaise (Dudouit, 2004).

* Université de Caen Basse Normandie, UMR 6554, LETG du CNRS, Laboratoire GEOPHEN, Esplanade de la Paix, BP 5186, 14032 Caen cedex, France

** Université Rennes 2, UMR 6554, LETG du CNRS, Laboratoire COSTEL, Place du Recteur-Henri-Le-Moal, 35043 Rennes cedex, France.

Mais l'étude spatiale de la brise de mer n'a pu être appréhendée en raison de l'inexistence d'un réseau de mesures dense. Pour pallier ce manque de données nous avons créé notre propre base d'information adaptée aux échelles spatiales fines. Les résultats montrent que ce nouveau réseau de mesures permet d'affiner la compréhension de l'aérodynamique locale et met également en évidence des phénomènes atmosphériques d'échelles très fines (ex: écoulements de pente) indétectables avec le réseau régional.

Ce type de démarche, sur la compréhension du fonctionnement du système aux échelles fines fait donc appel à des techniques de mesures adaptées de manière à pallier au manque de données. Après une présentation des différentes méthodes d'acquisition des données atmosphériques aux échelles fines, nous exposerons nos résultats.

Cette étude permettra ainsi de mieux comprendre certains épisodes de pollution photochimique. En effet, l'agglomération caennaise est soumise aux circulations de brises de mer et de terre qui, dans un contexte général de pollution importée depuis l'Europe du Nord et de l'Est, entraîne une "organisation" spatio-temporelle des concentrations d'ozone particulière.

Acquisition des données météorologiques aux échelles fines

Deux méthodes de mesures complémentaires : fixes et itinérantes

L'observation du climat aux échelles fines implique une méthode d'acquisition des données météorologiques adaptée. L'objectif étant de déterminer l'influence du milieu sur les variables météorologiques, l'emplacement des postes de mesure ne peut pas être défini en fonction de normes standard (OMM, 1990) mais suivant l'emboîtement des échelles spatiales auxquelles les différents éléments de la surface sont susceptibles de modifier la météorologie locale. Les stations météorologiques automatiques du réseau français permettent d'obtenir des informations en continu et simultanément sur plusieurs points de l'espace mais ce réseau est peu adapté aux expérimentations climatiques aux échelles fines. La densité du réseau météorologique est trop lâche (à part quelques exceptions comme le réseau de la Champagne viticole) pour mettre en évidence la variabilité spatiale du climat aux échelles fines et l'emplacement des stations météorologiques n'est pas déterminé spécifiquement suivant la problématique des expérimentations. Face à l'insuffisance du réseau classique, l'observation de la variabilité des paramètres météorologiques aux échelles fines passe donc par la mise en place d'un réseau de mesures plus ou moins temporaire adapté à la configuration du milieu. Les données peuvent être obtenues soit simultanément sur plusieurs points grâce à des

capteurs reliés en réseau, soit par l'intermédiaire de mesures itinérantes. Dans le premier cas, l'avantage est de pouvoir obtenir des informations en continu et simultanément sur plusieurs points de l'espace étudié. Toutefois, pour déterminer précisément le climat et limiter les incertitudes entre différents points de mesures, il est nécessaire de disposer d'un maximum de postes, or cela n'est pas toujours possible (ex: coût des capteurs). Les mesures itinérantes permettent de pallier le manque d'information entre les stations météorologiques. Elles consistent à effectuer des relevés météorologiques ponctuels sur divers points de l'espace étudié. Cette technique est régulièrement utilisée en microclimatologie car les stations fixes sont souvent trop espacées pour étudier la variabilité spatiale des facteurs météorologiques à cette échelle. « *Pour obtenir des données sur les conditions du climat local d'un espace rural comme par exemple le Kaiserstuhl, on peut d'abord faire une comparaison ponctuelle entre quelques stations climatiques installées en des points bien précis à l'intérieur du terrain de recherche. Cependant, si l'on veut faire des mesures en des endroits beaucoup plus nombreux (ex: plusieurs versants, collines ou vallées), il nous faut alors un nombre de stations bien plus élevé, ou alors on se base sur des mesures itinérantes* » (Endlicher, 1980). Ce type de mesure présente l'avantage de pouvoir quadriller l'espace d'étude avec un maximum de postes. Le principal inconvénient de cette technique est lié à la variation temporelle des facteurs météorologiques. En effet, il faut tenir compte que la plupart des variables météorologiques (dont les températures) varient fortement sur un laps de temps très court. Par conséquent, l'intervalle entre chaque prise de mesures génère une part d'erreur non négligeable. La « *formule idéale* » consisterait donc à allier les avantages des deux méthodes d'acquisition de données, c'est-à-dire de disposer d'un maximum de postes de mesures répartis sur l'ensemble de l'espace et acquérant simultanément les données météorologiques

Quelle que soit la technique employée, les mesures des variables météorologiques étant souvent soumises à des influences diverses susceptibles de générer des erreurs dans la prise d'informations, l'emplacement des instruments n'est pas choisi au hasard. Un maximum de précautions sont prises concernant notamment l'action du milieu (ex: nature du sol) mais aussi les caractéristiques et la disposition des appareils de mesure (ex: temps de réponse du capteur, orientation de la cellule du thermomètre...).

Installation des instruments de mesures: précautions pour limiter les erreurs

Les différents éléments du milieu influencent les paramètres météorologiques. Afin d'effectuer des comparaisons entre les données, les instruments de mesures doivent être disposés de façon à ce qu'il y ait le

moins de différence possible entre les divers points de mesures. Des normes existent dans le but de limiter l'action d'obstacles sur le climat. Selon l'OMM (1990), "les instruments de mesures doivent être installés dans un poste d'observation météorologique sur une surface horizontale de 6 x 9 m couverte par une végétation courte. La station météorologique doit également être située en terrain dégagé, éloignée des bâtiments et des rideaux d'arbres de plus de 10 fois leur hauteur". Dans une étude de climatologie aux échelles fines, ces règles ne sont pas applicables. L'objectif des mesures étant d'étudier l'impact d'éléments du milieu sur le climat, il est donc nécessaire de disposer les instruments à proximité de ces obstacles. Néanmoins, tous les postes expérimentaux doivent être disposés dans les mêmes conditions. Il reste que l'ensemble des éléments du milieu agissant à des échelles différentes complique fortement cette phase. La répétition des mesures, que l'on améliore au fur et à mesure, permet de découvrir des anomalies et de les corriger. Après avoir compris quels étaient les éléments qui influençaient les données, on peut mettre en place les points de mesures définitifs.

L'environnement dans lequel est disposé le capteur météorologique est très important. Le relief, la nature et l'état du sol, la végétation, la présence d'obstacles comme un mur ainsi que les caractéristiques des parcelles avoisinantes sont autant de facteurs à repérer avant de disposer les capteurs. Ainsi, au cours de campagnes expérimentales, la variabilité spatiale des paramètres météorologiques liée à l'environnement du poste de mesure peut être équivalente à des écarts entre des stations météorologiques distantes de plusieurs centaines de kilomètres. La marge d'erreur liée à une mauvaise installation des postes expérimentaux peut dépasser largement les écarts réels. Par exemple, pour les mesures de température de l'air, les capteurs doivent être disposés au-dessus d'un sol nu et tassé. En effet, la température de l'air est fortement tributaire de la température du sol. Des relevés de températures entre deux postes distants de 5 m, l'un au-dessus d'un sol enherbé et l'autre au-dessus d'un sol nu, font apparaître des différences supérieures à 3-4°C : la surface herbeuse restreint, ici, l'approvisionnement solaire du sol et la conduction est nettement diminuée parce qu'une « couche d'air isole partiellement la surface de l'herbe du sol sous-jacent plus chaud (effet paillasse) » (AVC, 1991 ; Carrega, 1994 ; Quénot, 2002).

L'environnement du matériel déterminé, le positionnement du capteur doit aussi être étudié. Le mauvais placement d'un capteur peut engendrer des erreurs dans la prise d'information. Par exemple, pour les mesures de température nocturne en situation radiative (ciel clair, vent faible), l'orientation de la cellule sensible du capteur vers le sol, vers le ciel ou horizontalement détermine le paramètre mesuré. Dans le premier cas, le capteur est soumis principalement aux déperditions énergétiques du sol, dans le second, au rayonnement atmosphérique, puis dans le dernier, à ces deux éléments réunis qui définissent un refroidissement par

rayonnement. On peut observer un écart de plusieurs degrés Celsius suivant le positionnement du capteur.

En définitive, toutes les étapes nécessaires à la production de données climatiques à une échelle fine sont sujettes à une succession de risques d'erreur liés aux caractéristiques, au positionnement et à l'étalonnage du capteur, à l'action du milieu et au choix de l'unité de mesures... Cette accumulation d'erreurs accentue la probabilité d'incertitudes au niveau de la qualité des résultats.

L'étude climatique sur la circulation des vents locaux en relation avec la pollution par l'ozone dans la région caennaise montre que la réalisation de mesures adaptées aux échelles fines permet de pallier aux insuffisances du réseau existant (nombre de stations, emplacement des stations, sensibilité des capteurs). Nous présentons, ici, la méthodologie qui a permis de mettre en évidence la présence d'une brise de terre et d'écoulements de pente que les réseaux fixes (Météo France et stations fixes installées dans le cadre de ce programme) n'ont pas pu détecter.

Incertitudes spatio-temporelles en climatologie locale: exemple de l'aérogologie nocturne dans la région caennaise

Située à environ 15 kilomètres de la Côte de Nacre, l'agglomération caennaise est soumise aux circulations de brises de mer et de terre qui, dans un contexte général de pollution importée depuis l'Europe de l'Est, entraîne une "organisation" spatio-temporelle des concentrations d'ozone particulière. Avec la mise en place de la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie, les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) ont pour mission d'informer le public des situations et des secteurs à risque. Dans cette perspective une étude météorologique des brises littorales a été effectuée afin de constituer un modèle statistique de prévision de ces circulations pour en faire un outil d'aide à la décision. Or, la brise de mer n'est pas le seul type d'écoulement susceptible d'influencer la répartition spatiale de l'ozone. D'autres écoulements nocturnes, plus localisés et fortement influencés par les caractéristiques de surface (brise de terre, écoulements de pente) sont difficilement détectables par le réseau météorologique, soit parce que les stations sont mal disposées, soit parce que les capteurs ne sont pas adaptés à la mesure de ce type de phénomène atmosphérique.

L'objectif de ce travail est d'améliorer les connaissances sur les écoulements nocturnes observés en période de brises de mer et de terre, le but principal étant de s'assurer de l'existence de la brise de terre. En effet, l'analyse des données enregistrées grâce à la mise en place d'un réseau de mesures local n'a pas permis de la détecter parce que la vitesse du vent mesurée durant la nuit en période de brises peut être faible (Dudouit, 2003). Or, les capteurs (anémomètres et girouettes) des stations météorologiques ne sont pas assez sensibles pour détecter ces écoulements dont la vitesse

est souvent inférieure à 1 m/s. Ainsi, en utilisant un matériel mieux adapté à la mesure des écoulements de très faible intensité (girouette en balsa ultra légère conçue par Hervé Quénol et Sébastien Bridier), nous avons tenté de mettre en évidence les flux présents en période nocturne par temps de brises. De plus, lorsque les conditions atmosphériques sont stables avec un ciel clair et un vent synoptique faible, des écoulements très localisés peuvent venir s'imbriquer. Pour les étudier, nous avons donc eu recours à la technique des mesures itinérantes qui permet de multiplier les points de mesures et ainsi de mieux prendre en compte les effets microlocaux. En effet, aux échelles fines, les caractéristiques du milieu (relief, occupation du sol) engendrent une forte variabilité spatiale du climat sur des espaces relativement restreints. L'utilisation de postes de mesures fixes et espacés de plusieurs km provoque une part importante d'incertitude entre chaque point expérimental. Le recours aux mesures itinérantes permet ainsi de pallier ce manque de données et de limiter les erreurs d'interprétation.

La finalité de cette étude est donc d'une part, de s'assurer de l'existence de la brise de terre et d'autre part, de vérifier la mise en place de vents microlocaux pouvant venir s'imbriquer avec la brise de terre. L'intérêt de ce travail est ainsi d'améliorer les connaissances sur le système "brise de mer / brise de terre" en apportant des précisions sur la brise de terre. De plus, il apportera des renseignements très intéressants sur la circulation des polluants la nuit.

Ce travail s'appuie sur les données acquises au cours de la campagne de mesures itinérantes lors de deux journées de brises de mer et de terre: les 29 et 30 août 2005.

Les mesures fixes

Afin de limiter d'éventuelles erreurs au moment de l'interprétation des mesures, nous avons installé deux stations météorologiques fixes dans le but de disposer de données enregistrées en continu. Elles auraient dû nous permettre de mesurer la direction et la vitesse du vent et ainsi nous fournir des renseignements entre deux prises de mesures itinérantes. Mais, il s'est avéré qu'aucune donnée n'a été enregistrée parce que le vent soufflait avec une trop faible intensité (les seules données de vent enregistrées ont été observées lorsque la brise de mer soufflait encore et lorsqu'elle a disparu le soir aucune donnée n'a été mesurée). Et lorsque la vitesse du vent est inférieure à 2 m/s, il n'y a pas de données de vent mesurées. Nous avons alors dû nous appuyer sur les mesures itinérantes réalisées avec un matériel adapté à la mesure des écoulements de très faible intensité (girouette ultra légère en balsa).

Les mesures itinérantes

Les résultats de la campagne des mesures itinérantes sont successivement présentés pour la zone Sud de la région caennaise où les données aérologiques ont été principalement enregistrées dans les

hauteurs bocaines à proximité de la forêt de Grimbosq (Figure 1). Rappelons que l'un des objectifs de ces mesures était de mettre en évidence l'existence d'écoulements microlocaux. Des mesures ont également été réalisées au Nord de la région d'étude près du littoral, dans la vallée de l'Orne et aux pourtours de l'Avant butte de Bavent. Le but était ici de vérifier l'existence de la brise de terre ainsi que d'autres écoulements nocturnes liés à la topographie (vallée de l'Orne, Avant butte de Bavent).

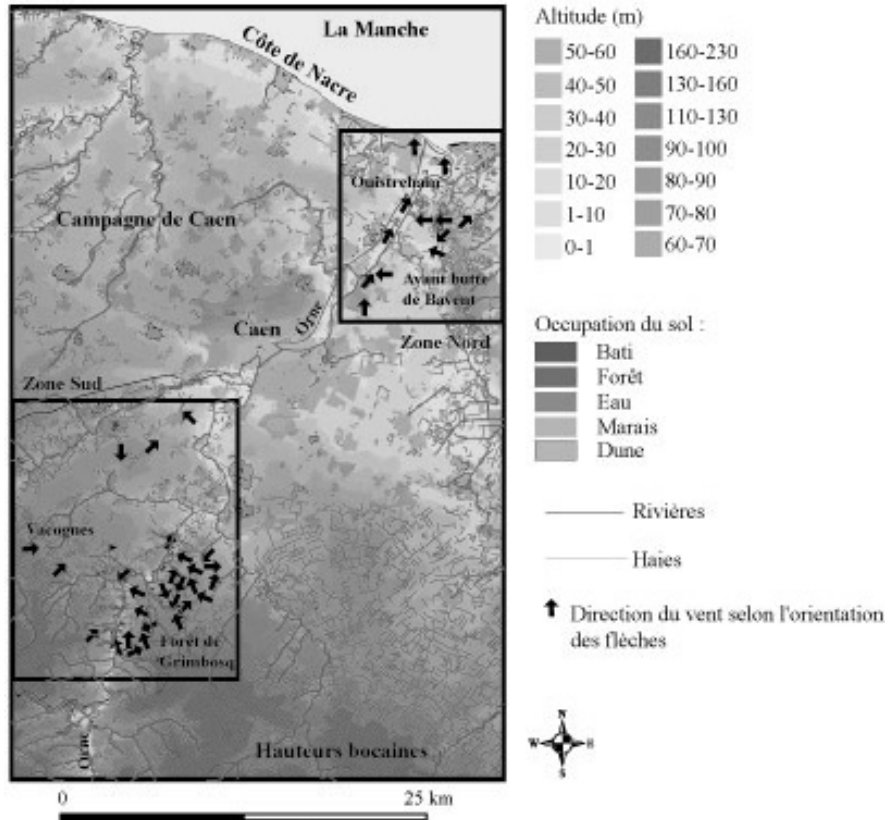
Les situations synoptiques générales en surface du 29 et du 30 août 2005 étaient caractérisées par des hautes pressions sur l'Europe Moyenne. Il en est résulté un flux théorique de Nord-Est sur la région caennaise, très lent du fait de la faiblesse du gradient de la pression atmosphérique, qui s'organisait en marais barométrique sur la Normandie avec 1020 hPa à Caen. Les conditions atmosphériques stables avec un ciel clair et un vent synoptique inférieur à 2 m/s sont favorables à l'installation d'écoulements de pentes nocturnes (écoulements catabatiques). L'air plus froid que l'air ambiant, issu des déperditions énergétiques de la surface, s'écoule par gravité au niveau du sol suivant les lignes de pente (Carrega, 1994; Beltrando *et al.*, 1998; Quénot, 2002). Ces écoulements très localisés, s'imbriquent avec d'autres types d'écoulements d'échelles plus vastes (ex: brise de terre, brise de vallée) et complexifient l'aérodynamisme local.

Le Sud de la région caennaise

Entre 22h00 et 01h10 T.U., période durant laquelle les mesures itinérantes ont été réalisées dans la zone Sud de la région caennaise, la vitesse du vent enregistrée au site de Vacognes, à la station fixe, était nulle; la direction du vent n'a donc pas été mesurée. Or, les mesures itinérantes effectuées avec une girouette ultra légère ont mis en évidence l'existence d'un flux très léger variable en direction et en force selon la topographie du site (Figure 2). Ces enregistrements ont, en effet, montré que le Sud de la région caennaise était sous l'influence d'un système de brises de pente et d'un système de canalisation des écoulements par la vallée de l'Orne.

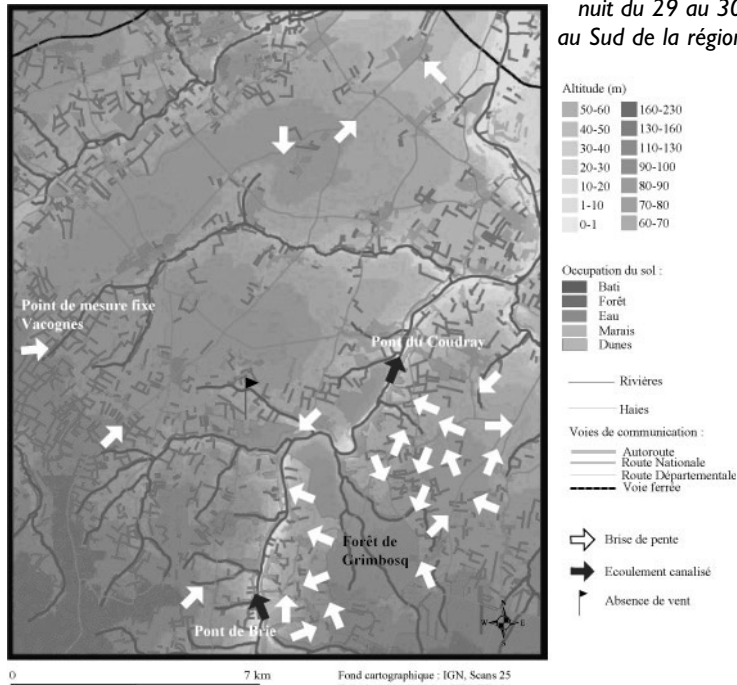
Les deux points de mesures réalisés au pont du Coudray et au pont de Brie ont en effet montré, qu'à ces sites, les écoulements étaient canalisés par la vallée de l'Orne. À 22h45 T.U., un flux assez turbulent est orienté à 210° au Pont du Coudray, l'Orne étant orientée 20°/200° à cet endroit. À 00h40, le flux enregistré est plus régulier au Pont de Brie. La direction relevée est 160°, l'Orne étant orientée 350°/170° à ce point de mesure. Les autres points de mesures ont mis en évidence l'existence d'écoulements gravitaires nocturnes. Des brises de pente plus ou moins fortes selon la topographie des sites ont en effet été mesurées et confirment les observations faites à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT). Les écoulements observés suivent les lignes de pente du relief. D'autre part, il est difficile d'affirmer l'influence de la forêt de Grimbosq sur les écoulements nocturnes à l'Ouest

Figure 1 : Mesures itinérantes réalisées au Sud et au Nord de la région caennaise.



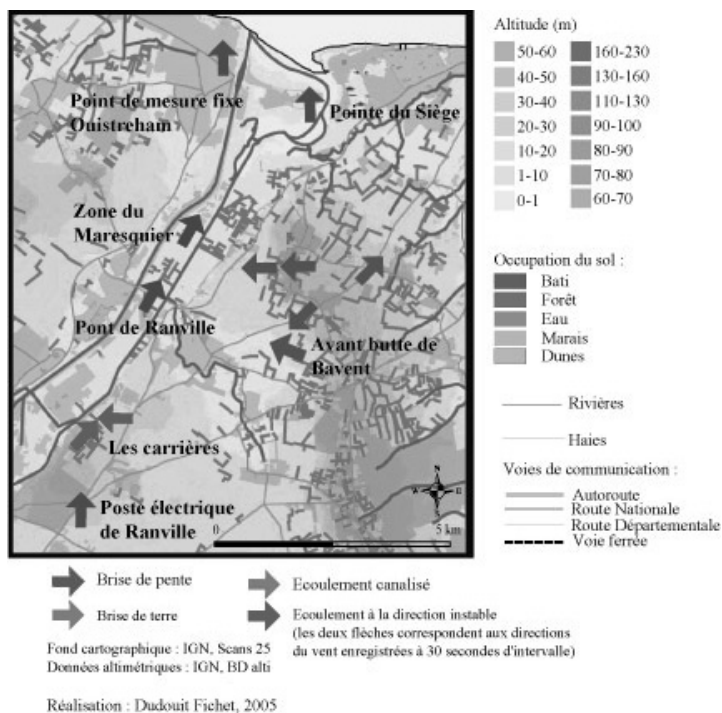
Fond cartographique : IGN, Scans 25
Données altimétriques : IGN, BD alti

Figures 2 : Directions du vent enregistrées durant la nuit du 29 au 30 août 2005 au Sud de la région caennaise.



Fond cartographique : IGN, Scans 25
Données altimétriques : IGN, BD alti
Réalisation : Dudouit Fichet, 2005

Figures 3 : Directions du vent enregistrées durant la nuit du 29 au 30 août 2005 au Nord de la région caennaise.



de la forêt, les lignes de pente du relief étant orientées dans le même sens que des éventuels flux thermiques. En raison de la différence de température entre le milieu forestier et les alentours, nous pourrions en effet penser que des flux thermiques, orientés de la forêt vers l'extérieur, existent (Escourrou, 1982). Au point de mesure fixe, à Vacognes une direction du vent de 240° était alors mesurée.

Plusieurs phénomènes nocturnes intéressants ont donc été observés au Sud de la région caennaise :

- L'existence des brises de pente à proximité des reliefs importants ;
- La canalisation du flux par la vallée de l'Orne ;
- Le possible rôle de la forêt de Grimbosq sur l'orientation des écoulements nocturnes.

Le Nord de la région caennaise

Entre 02h05 et 02h40 T.U., période durant laquelle les mesures itinérantes ont été réalisées dans la zone Nord de la région caennaise, la vitesse du vent enregistré au site de Ouistreham, à la station fixe DAVIS, était nulle et aucune direction du vent a été mesurée. Or, comme

précédemment, les mesures itinérantes ont montré qu'un flux, certes très léger, existait. Ces enregistrements ont ainsi mis en évidence que le Nord de la région caennaise était sous l'influence d'un système de brises de pente et de brise de terre. De plus, la vallée de l'Orne aurait tendance à canaliser les flux comme au Sud. Enfin, entre l'agglomération caennaise et le littoral, des flux dont la direction était peu stable ont également été observés (figure 3).

Les mesures réalisées au niveau du pont de Ranville et de la zone du Maresquier ont en effet montré l'effet de canalisation des écoulements par la Vallée de l'Orne. Un vent d'environ 200° a en effet été observé aux deux sites, la vallée étant orientée $210^\circ/30^\circ$ à ces endroits. De plus, au niveau de l'Avant butte de Bavent, relief accidenté de cette zone, les mesures ont mis en évidence l'existence de brises de pente plus ou moins fortes (vitesse < 2 m/s) selon les secteurs. De même que pour la zone Sud de la région caennaise, les directions du vent observées ont confirmé les observations faites à partir du MNT et la carte des écoulements gravitaires théoriques: elles suivent les lignes de pente du relief. Il semblerait qu'au point de mesure le plus au Sud de ce relief, la brise de pente soit plus forte. Une brise de terre a également pu être remarquée aux sites du Poste électrique de Ranville, de la Pointe du Siège et de Ouistreham où le point de mesure fixe était installé. Un flux bien établi de 180° a été mesuré, direction pouvant être celle de la brise de terre. En effet, bien que ces sites soient caractérisés par une altitude proche du niveau de la mer, un vent assez fort a été observé. Or, au Sud de la région caennaise, un point de mesure effectué également à un site au relief plat avait montré une absence de vent. Nous pouvons donc supposer que, si nous avons mesuré un vent établi au Sud à des endroits sans relief, c'est la brise de terre qui soufflait. Enfin, au niveau des carrières, un flux dont la direction était très instable a été observé. Deux principales directions du vent ont été mesurées, à quelques secondes d'intervalle: 90° et 240° , la direction 240° étant celle de la pente. Nous avons émis l'hypothèse, qu'à ce site, il pouvait y avoir un "conflit" entre plusieurs écoulements de nature différente. À ce même site, une cheminée d'environ 30 mètres de haut pouvait suggérer que le vent soufflait en direction de la ville, soit d'une direction d'environ 40° .

Plusieurs phénomènes nocturnes intéressants ont donc également été observés au Nord de la région caennaise:

- L'existence de la brise de terre;
- La canalisation des écoulements par la vallée de l'Orne;
- L'existence de brises de pente aux alentours du relief le plus important.

Ces différentes techniques de mesure de terrain ont en définitive permis de pallier le manque de données à chaque fois que nous voulions passer à une échelle d'analyse plus fine. En effet, même si le réseau de mesures officiel de Météo France est indispensable pour étudier un phénomène sur le long

terme, il devient insuffisant lorsque nous voulons prendre en compte l'influence des facteurs locaux. Les données enregistrées grâce à la mise en place du réseau de mesures fixes local ont alors permis de définir les différentes caractéristiques spatio-temporelles de la brise de mer (Dudouit, 2004). Mais, il s'est avéré que ce réseau de mesures était peu adapté à l'étude de la brise de terre et des autres écoulements nocturnes microlocaux. Les mesures itinérantes réalisées avec un matériel adapté ont donc permis de les détecter. Même si de nombreuses incertitudes de mesures existent lorsque nous acquérons nos propres données, une validité du matériel avant son utilisation et une critique des données après enregistrements permettent de relativiser les résultats obtenus et limitent les erreurs d'interprétation.

Conclusion

Cette étude a donc permis de lever les incertitudes que nous avons précisées à la suite de nos travaux précédents sur l'existence de la brise de terre et d'éventuels autres écoulements nocturnes microlocaux. Les mesures itinérantes réalisées en période nocturne par temps de brises de mer et de terre, ont en effet permis de mettre en évidence un système de brises imbriquées à différentes échelles (Carrega, 1989; Fallot, 1992; Kastendeuch, 1996; Quénot, 2002):

- Tout d'abord, un premier type d'écoulement a été mesuré au Nord de la région caennaise lorsque le relief était très peu accidenté. Orienté au Sud (180°), il pourrait s'agir de la brise de terre (écoulement principal) d'échelle locale. Mais, les mesures nous laissent penser que la brise de terre n'était pas suffisamment puissante et rapide pour brassier les écoulements gravitaires que nous avons également mis en évidence;

- Des écoulements orientés suivant le sens des lignes de pente des reliefs les plus accentués ont de plus été observés aux hauteurs bocaines au Sud de la région caennaise et au niveau de l'Avant butte de Bavent au Nord de la zone d'étude. Il s'agit d'écoulements catabatiques (écoulements secondaires) d'échelle microclimatique;

- Localement, nous avons aussi remarqué que le vent pouvait être canalisé par la vallée de l'Orne.

En définitive, le protocole de terrain mis en place a permis de mesurer des écoulements nocturnes qui n'avaient pas été enregistrés jusqu'ici par le matériel fixe. Nous avons ainsi montré que le secteur pouvait être drainé par un système de brises nocturnes imbriquées selon des niveaux d'échelle différents dont l'élément principal, au Nord de la région caennaise, est la brise de terre à laquelle se combinent des écoulements secondaires gravitaires en fonction du relief. Et, grâce à ces mesures nous avons pu réaliser une cartographie précise des brises nocturnes dans la région caennaise.

Il apparaît donc que malgré les incertitudes liées à ces différentes méthodes de mesures, les précautions prises au moment du choix des sites et de l'implantation du matériel permettent de limiter d'éventuelles erreurs au moment de l'interprétation des résultats.

L'intérêt de ce travail est double. Il a tout d'abord permis d'améliorer les connaissances sur la brise de terre et montrer qu'elle pouvait s'imbriquer avec d'autres écoulements d'échelle microlocale. De plus, cette campagne de mesures a apporté des informations supplémentaires quant à la recirculation des polluants la nuit par temps de brises de mer et de terre.

Bibliographie

Association Viticole Champenoise, 1991. *Les gelées de printemps*. Le vigneron champenois, n° spécial, 63p.

BELTRANDO G., QUENOL H., BRIDIER S. 1998. *Impact du remblai de la ligne T.G.V. Méditerranée sur les gelées de printemps dans le secteur de Mallemort*. Rapport pour RFF et la CA des Bouches-du-Rhône, 51 p.

CARREGA P., 1989. Vent et échelles de contraintes géographiques: exemples en région niçoise. In *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, vol. 2, pp 309-316.

CARREGA P., 1994. *Topoclimatologie et habitat*. Revue d'Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée, Thèse d'État, 35et36, 408p.

DUDOUIT A., 2003. Essai de prévision locale des conditions aérologiques de surface: exemple de la baie de Sallenelles. In *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, vol. 15, pp. 193-199

DUDOUIT A., 2004. Une étude de brise de mer dans la région caennaise: vers une aide à la prévention de la pollution photochimique en milieu littoral. In *Noroi*, vol. 4, n° 193, pp 31-45.

ENDLICHER W., 1980. L'utilisation de mesures itinérantes et de thermographie comme moyen d'étude du mésoclimat: l'exemple des vignobles du Kaiserstuhl. In *Recherches Géographiques à Strasbourg*, 13-14, pp 127-133.

ESCOUROU G., 1982. Quelques particularités des brises marines. In *Noroi*, vol. 116, pp. 577-583.

FALLOT J-M., 1992. *Étude de la ventilation d'une grande vallée préalpine: la vallée de la Sarine en Gruyère*. Thèse, Université de Fribourg, 475 p.

GUYOT G., 1997. *Climatologie de l'environnement*. Masson, p.

KASTENDEUCH P., 1996. *Analyse à plusieurs échelles et modélisation des régimes de vents d'été dans le fossé Rhénan méridional*. Thèse, Université de Strasbourg, 175 p.

OKE T.R., 1987. *Boundary Layer Climates*. Second edition, London, 372 p.

Organisation Météorologique Mondiale, 1990. *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques*. 5^{ème} édit., Genève OMM, n°8.

QUENOL H., 2002. *Climatologie appliquée aux échelles spatiales fines: influence des haies brise-vent et d'un remblai ferroviaire sur le gel printanier et l'écoulement du mistral*. Édition ANRT, ISBN 2-284-04081-0, 283 p.

YOSHINO M., 1975. *Climate in small area: an introduction to local meteorology*. Univ. of Tokyo Press, 549 p.