

ARTICLES

Dispersion de la pollution atmosphérique par la brise de mer dans le Nord-Pas-de-Calais Analyse des données de surface et télédétection par lidar

Atmospheric pollution dispersion under sea breeze circulation in the Nord-Pas-de-Calais region Surface data analysis and remote sensing with a lidar system

Sylvain BIGOT*, Hervé DELBARRE**, Patrick AUGUSTIN**, Patrick FRÉVILLE**

Résumé

La prévision du comportement de la pollution de l'air au cours d'événements de brise nécessite la prévision des caractéristiques propres de la brise : son extension horizontale à l'intérieur des terres mais également en mer, son extension verticale dans la couche limite (en particulier la hauteur du courant de brise) et sa dynamique temporelle (l'évolution du front de brise et de la stratification verticale). À l'aide d'un exemple dans la région dunkerquoise, nous montrons comment une approche multi-échelle mettant simultanément en œuvre des techniques de télédétection active (un lidar UV) et passive (l'observation satellitaire), ainsi que des mesures au sol de polluants par les réseaux de la qualité de l'air et des données météorologiques, documentent le comportement spatio-temporel de la pollution dans une cellule de brise, cela dans une perspective de prédiction par modélisation.

Abstract

Air pollution behaviour forecast during sea-breeze events needs a forecast of the following sea breeze characteristics : its horizontal extension inland but over the sea too, its vertical extension in the boundary layer (particularly the breeze flow height) and its temporal dynamics (the breeze front and vertical stratification evolution). With the help of an example in the Dunkerque region, we show how a multiscale approach, using active (lidar) and passive (satellite) remote sensing, ground air pollutants measurements and meteorological measurements illustrate the spatial and temporal behaviour of pollution in the sea breeze cell and will help prediction using simulation.

* Laboratoire de Géographie des Milieux Anthropisés (CNRS UMR 8141). Université des Sciences et Technologies de Lille, avenue Paul Langevin, F59655 Villeneuve-d'Ascq Cedex (sylvain.bigot@univ-lille1.fr).

** Laboratoire de Physico-Chimie de l'Atmosphère (CNRS UMR 8101). Université du Littoral-Côte d'Opale, 145, avenue Maurice Schumann, 59140 Dunkerque (herve.delbarre@univ-littoral.fr).

Introduction

Le développement de grands sites industriels au cours de la seconde moitié du xx^e siècle a engendré la naissance et la croissance de zones urbaines à proximité immédiate des industries, sources de polluants de nature très variée. Dans ce voisinage, le risque pour la population est double. D'une part, celle-ci est soumise aux rejets industriels continus, au plus près de leur source d'émission. Ainsi, même si la région dunkerquoise a considérablement investi depuis 20 ans pour réduire ses émissions (maîtrise de l'énergie, utilisation de combustibles moins soufrés, emploi de procédés d'épuration, évolution des différents secteurs industriels, incitation liée à la taxe parafiscale sur la pollution atmosphérique depuis 1985 et programmes de dépollution), l'industrie reste extrêmement polluante [1], trois secteurs prédominant particulièrement : la sidérurgie-métallurgie (notamment la désulfuration du minerai), la pétrochimie (notamment la désulfuration du pétrole brut) et le secteur de l'énergie (notamment les centrales au fioul). Par exemple, l'usine SOLLAC, avec une diminution de 30 % de ses émissions de SO₂ entre 1996 et 2000, en rejette tout de même encore plus de 8 000 tonnes par an dans l'atmosphère. D'autre part, certaines activités industrielles présentent un risque propre, la région dunkerquoise concentrant, par exemple, une quinzaine d'industries classées Seveso.

D'un point de vue climatologique, les études régionales montrent qu'en moyenne, le Nord-Pas-de-Calais bénéficie de caractéristiques climatiques favorables à la dispersion des polluants (reliefs faibles, vents d'ouest dominants avec une vitesse élevée, fréquence de jours de pluie importante favorable au lessivage des polluants) et d'un faible nombre d'heures d'ensoleillement qui réduit la formation des polluants secondaires [2]. Il n'en demeure pas moins que les émissions conséquentes de polluants peuvent conduire à des épisodes de pollution sérieux quand des effets météorologiques locaux favorisent le piégeage des polluants à une échelle spatiale proche de celle des grands sites industriels, c'est-à-dire quelques dizaines de kilomètres. La prévision de la dispersion de la pollution atmosphérique à cette échelle passe par la compréhension et la modélisation des effets météorologiques locaux altérant ou favorisant l'évacuation des polluants émis. Ainsi, l'atmosphère, dans un contexte littoral, peut subir localement de profondes modifications en raison du phénomène de brise. En raison, d'une part, de ses caractéristiques thermiques qui limitent le mélange au sein des différentes couches atmosphériques et, d'autre part, d'une circulation cellulaire quasi fermée qui peut être à l'origine de très fortes concentrations de polluants retournant à leur point d'émission quelques heures après leur mise en suspension, le phénomène de brise est un processus essentiel dans une étude du transport de la pollution [3]. Ainsi, le littoral du Nord-Pas-de-Calais n'est pas à

l'abri d'épisodes météorologiques particuliers, surtout en été, défavorables à la dispersion de la pollution atmosphérique, en étroite relation avec les épisodes de brise de mer. La durée des alertes régionales de pollution reflète d'ailleurs assez bien la persistance caractéristique des épisodes de brise de mer, en moyenne entre 10 h et 18 h [4]. Et le déclenchement d'alerte de pollution par la DRIRE repose finalement en grande partie sur la prévision de conditions météorologiques favorables à la pollution, notamment les situations de brise de mer [5].

Mais à cause de sa nature non stationnaire et agéostrophique, une étude exhaustive de la brise de mer (aspects météorologiques, physiques et chimiques) ne peut être menée qu'à des échelles spatio-temporelles relativement fines, de l'ordre de quelques kilomètres et à partir d'un dispositif de mesure permettant une acquisition de données en continu. L'approche reposant uniquement sur les stations de mesures fixes (exemple des stations météorologiques régionales) est alors largement déficiente puisque la forte anisotropie spatiale donne une image déformée et lacunaire des épisodes de brise. En outre, parce qu'elle est située sur l'océan, il reste impossible d'instrumenter la branche subsidente de la cellule atmosphérique composant la brise, alors qu'elle est essentielle dans le transport des polluants. Le recours à la télé-détection satellitaire a amélioré la cartographie de la brise mais reste encore inefficace pour les analyses physico-chimiques des basses couches. Par ailleurs, ni les mesures *in situ* ponctuelles ni les données satellitaires ne permettent une analyse tridimensionnelle continue de l'atmosphère sur une période représentative d'un épisode de brise (au moins un jour de mesures). Il existe pourtant une stratification verticale importante de l'atmosphère en situation de brise, les interactions avec les états de surface sous-jacentes pouvant être considérables (exemple de zones fortement urbanisées).

Le recours à un instrument de mesure tel que le lidar (*Light Detection and Ranging*) est alors une solution adaptée pour combler ces différentes lacunes puisqu'il permet de distinguer efficacement dans un rayon de plusieurs kilomètres, en trois dimensions et en temps réel, la concentration de certains polluants gazeux (ozone, dioxyde d'azote, dioxyde de soufre, composés organiques volatils) et la présence d'aérosols [6, 7]. En matérialisant cette cartographie physico-chimique ainsi que la stratification verticale d'une partie de l'atmosphère, notamment la couche limite dans laquelle les polluants sont piégés, les mesures lidar permettent parallèlement une étude météorologique spatio-temporelle du flux de brise [8]. Mais les lidars mobiles restent encore extrêmement rares en France. Pourtant, dans une volonté de développer de nouvelles méthodes optiques de détection de polluants atmosphériques et aussi d'améliorer l'analyse *in situ* de l'atmosphère et de sa dynamique, le Laboratoire de physico-chimie de l'atmosphère (LPCA-UMR CNRS 8101) de l'université du Littoral-Côte d'Opale s'est doté récemment de ce matériel de télé-détection active à partir du sol.

L'outil de télédétection active par la technique lidar fournit une connaissance du comportement de l'atmosphère dans sa composante verticale. Les outils satellitaires de télédétection passive associés à l'observation terrestre des conditions météorologiques locales aboutissent à une spatialisation des phénomènes en deux dimensions fortement liés au sol. Nous proposons de montrer comment l'alliance de ces outils éclaire l'analyse spatio-temporelle des interactions entre la brise de mer et la pollution atmosphérique. L'objet est, dans une perspective ultérieure de modélisation, de mieux comprendre les épisodes de brise dans une région où les émissions industrielles représentent encore une part importante des rejets du Nord-Pas-de-Calais et où les interactions avec la pollution atmosphérique sont particulièrement complexes [1]. Ce travail repose également sur une approche pluridisciplinaire de géographes et de physiciens afin de favoriser le recoupement de résultats issus de l'analyse statistique de données climatiques et aérologiques et de résultats issus de campagnes de mesures sur le terrain. La première partie rappelle brièvement l'historique de l'étude des interactions entre brise de mer et pollution atmosphérique dans le cadre de l'utilisation de la télédétection, en insistant particulièrement sur les caractéristiques particulières du lidar. Ensuite, un épisode de brise de mer ayant fait l'objet d'une campagne de mesures par lidar dans la région dunkerquoise est analysé, ce qui permet de faire un premier constat sur la complémentarité des données météorologiques et chimiques traitées.

Brise côtière et aérosols : le recours à la télédétection

Radars, sodars et satellites...

Au cours des dernières décennies, de nombreux auteurs ont montré l'intérêt des radars météorologiques pour l'étude des brises côtières et des circulations atmosphériques associées. Les travaux précurseurs datent des années 1960, avec la discrimination du front de brise par échos radars. Ainsi, Atlas [9] conclut que la hausse de pression de vapeur et la baisse de la température, au passage du front de brise de mer, contribuent à une augmentation de l'indice de réfraction. Brown [10] est l'un des premiers à effectuer une comparaison entre une étude des conditions météorologiques de surface et les échos radars mesurés régionalement. Il confirme les résultats d'Atlas [9] et ajoute que, pour tous les cas observés, les échos radars correspondent à une chute des températures, une augmentation de l'humidité et un changement dans la vitesse et la direction du vent. Afin de mieux distinguer ces caractéristiques, le front de brise de mer est aussi étudié à partir de plusieurs radars opérant simultanément dans les longueurs d'onde 3,2 et 10,7 cm [11]. Finalement, l'ensemble des travaux menés au cours des années 1960 et 1970 permet de

conclure qu'il existe une relation qualitative entre les échos reçus et les structures atmosphériques d'échelle fine. Parallèlement au développement des radars atmosphériques, mais avec un équipement plus simple, l'utilisation de sondeurs acoustiques (appelés couramment sodars) à partir des années 1960 permet également d'étudier la brise de mer. La détection de gradients atmosphériques repose, dans ce cas, sur des changements à échelle très fine de la propagation du son en raison de fluctuations spatiales de la température ou du vent. Plus récemment, les radars Doppler sont non seulement capables de détecter la présence de cibles mais surtout d'évaluer leur vitesse de déplacement. Ils détaillent alors les caractéristiques atmosphériques du corps de la brise, c'est-à-dire la circulation située en arrière du front de brise, discontinuité marquant un contraste thermodynamique, avec la pénétration continentale de l'air marin plus dense, stable et frais qui soulève l'air continental plus chaud et instable. L'utilisation de sodars Doppler tristatiques (avec trois récepteurs) permet même d'analyser la vitesse de déplacement au sein de la brise [12, 13].

Pourtant, un grand nombre de ces conclusions climatologiques ne peuvent, faute de mesures, s'appuyer sur des observations au sol. En outre, il existe une grande variété de cibles détectées par le radar, de nature abiotique (sable, poussières, eau) ou biotique (insectes ou oiseaux), et le résultat final de l'écho reflète la combinaison instantanée de ces divers aérosols présents dans l'atmosphère. Ces échos, qu'on appelle poétiquement « échos d'ange », sont provoqués par des fluctuations de l'indice de réfraction liées aux différents gradients d'intensité au sein de l'atmosphère. L'observation de traceurs naturels tels que les nuages d'insectes qui suivent les courants aériens des basses couches a ainsi permis de déterminer les vents dominants et la structure cellulaire de la brise [14]. Mais à cause de leurs différentes origines, les « échos d'ange » rendent en fait très difficile leur identification et remettent en question l'utilisation de certaines mesures radars.

L'apport des données satellitaires représentent alors un complément très intéressant dans la gamme des outils d'observation de la brise côtière et de ses interactions avec les aérosols. Cette technologie a connu un essor exceptionnel au cours des deux dernières décennies, avec des instruments tels que NOAA-AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), TOMS (*Total Ozone Mapping Spectrometer*) ou encore Météosat, qui analysent l'épaisseur optique en aérosols, c'est-à-dire l'atténuation optique totale induite par les aérosols à une longueur d'onde donnée. Ces capteurs permettent, la plupart du temps, d'aboutir à des indices semi-quantitatifs du contenu en poussières minérales à différentes altitudes. Cependant, à cause des nombreuses sources de contamination en aérosols, surtout dans les basses couches, l'observation au-dessus des continents reste plus complexe que celle qui a lieu au-dessus des régions océaniques, et la qualité des résultats varie largement en fonction de la taille et de l'altitude

des particules. L'utilisation de la télédétection pour la caractérisation de la brise de mer est par ailleurs restrictive puisqu'elle part d'un *a priori* majeur : seules les situations de brise de mer associées à un front nuageux peuvent être observées. La convergence des vents provoque une ascendance qui déclenche la formation de nuages de type cumuliforme, ces derniers empruntant souvent certaines formes d'organisation spatiale associées à des caractéristiques météorologiques particulières [15]. Cette transition se caractérise donc par un changement de la direction et de la vitesse du vent, mais aussi par une baisse de la température et une hausse de l'humidité [16]. À partir de l'imagerie satellitaire, le front de brise de mer apparaît souvent comme une ligne de nuages très visible à l'intérieur du continent. Mais cette condition n'est pas absolue et il existe des situations de vent thermique provenant de l'océan où le front nuageux est soit inexistant, soit illisible à partir de l'analyse des conditions radiométriques obtenues par satellite (par exemple lorsque le contenu en humidité est trop faible). Les fronts de brise de mer les plus actifs se développent en association avec de faibles vents synoptiques venant en sens opposé. Lorsque les vents synoptiques sont intenses, la circulation de brise de mer ne peut pas se mettre en place, surtout s'il y a une advection d'air frais maritime sur le continent, réduisant fortement la température et le gradient de pression. Le suivi par satellite aide à localiser la position et la morphologie de la discontinuité formée par le front de brise, c'est-à-dire indirectement à mesurer son intensité et son caractère persistant.

Au-delà des caractéristiques moyennes de la brise de mer, le suivi par télédétection permet surtout

de révéler la grande diversité des situations réellement observées. Ainsi, à l'échelle du Nord-Pas-de-Calais, en fonction des conditions météorologiques et de leurs interactions avec le trait de côte, il est possible de distinguer plusieurs types de situations (Figure 1). Les deux premiers exemples correspondent à des situations à hautes pressions de surface centrées sur les îles Britanniques. Le flux dominant de nord-ouest en surface et en altitude favorise la pénétration de la brise de la mer du Nord, de même direction que le flux synoptique, mais impose parallèlement sur le nord de la France de basses températures peu favorables au développement de circulations de brises puissantes. Des différences notables apparaissent pourtant entre les deux situations. À cause du faible gradient thermique, la brise de mer observée le 25 juin 2000 est limitée à une bande littorale de quelques kilomètres (Figure 1a). En revanche, dans l'après-midi du 17 juillet 2000, l'air maritime pénètre par le nord jusqu'à plus de 60 km à l'intérieur du continent (Figure 1b). La situation du 29 juillet 2000 est encore différente puisque les hautes pressions de surface se situent sur le proche Atlantique, avec des conditions thermiques et un flux dominant d'ouest favorables au développement de circulations de brises venant des deux mers (Figure 1c). La rencontre des flux originaires de part et d'autre du Pas de Calais favorise, par convergence, l'augmentation de la convection sur le continent, avec le développement de deux fronts nuageux bien identifiés.

Mais l'étude des brises par l'imagerie satellitaire est souvent compromise à cause de la présence de nuages liés à la circulation générale atmosphérique.

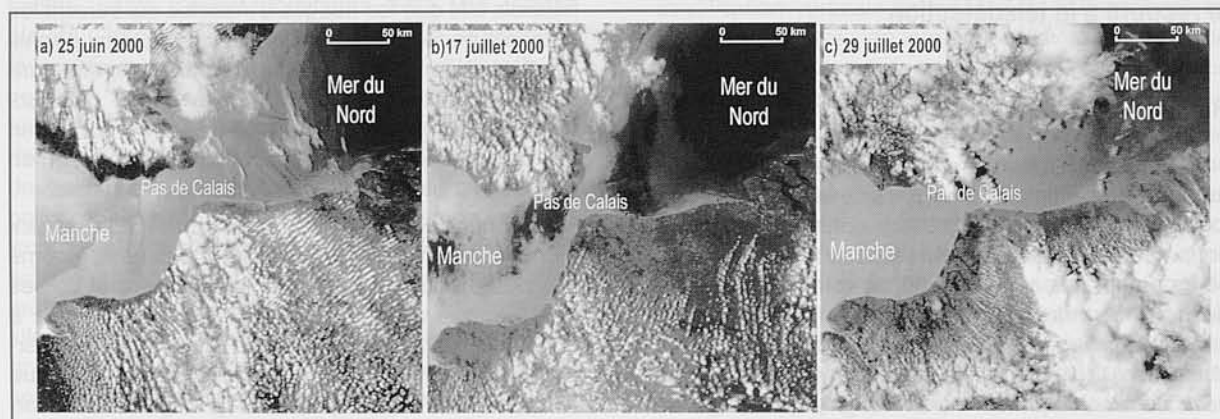


Figure 1.

Situations de brise de mer sur les côtes du Pas de Calais observées grâce au capteur NOAA14-AVHRR (canal visible, aux environs de 15 h TU) : a) le 25 juin 2000 ; b) le 17 juillet 2000 ; c) le 29 juillet 2000.

Les auteurs remercient le *Distributed Active Archive Center* (Code 902.2) du *Goddard Space Flight Center* (Greenbelt, MD, 20771) pour la production et la distribution des données satellitaires. Les données originales ont été produites à partir du programme NOAA/NASA *Pathfinder* dirigé par Mme Mary James du *Goddard Global Change Data Center*, et l'algorithme a été établi par le *AVHRR Land Science Working Group* dirigé par le Dr John Townshend de l'Université du Maryland. La contribution du *Goddard Space Flight Center* a été financée par le programme de la *NASA Mission to Planet Earth*.

Examples of sea breeze conditions near the Pas de Calais coasts (visible channel of NOAA14-AVHRR, at 15:00 UT): a) June 25, 2000; b) July 17, 2000; c) July 29, 2000. The authors wish to thank the *Distributed Active Archive Center* (Code 902.2) at the *Goddard Space Flight Center*, Greenbelt, MD, 20771, for producing the data in their present form and distributing them. The original data products were produced under the NOAA/NASA *Pathfinder* program, by a processing team headed by Ms. Mary James of the *Goddard Global Change Data Center*; and the science algorithms were established by the *AVHRR Land Science Working Group*, chaired by Dr. John Townshend of the University of Maryland. Goddard's contributions to these activities were sponsored by NASA's *Mission to Planet Earth* program.

Elle reste par ailleurs la plupart du temps bidimensionnelle, la structuration verticale de l'atmosphère au sein de la circulation de brise restant très difficile à estimer à partir du capteur du satellite. En outre, la résolution spatiale des images n'est pas toujours suffisante pour étudier les interactions physico-chimiques entre la brise et les aérosols, surtout lorsqu'on se trouve en milieu urbain où les échelles d'observation sont de l'ordre de quelques kilomètres. Ainsi, l'imageur AVHRR embarqué à bord des satellites héliosynchrones NOAA est un radiomètre à balayage continu travaillant dans cinq canaux du spectre, mais avec seulement une résolution spatiale de 1,1 km à la verticale du satellite.

L'apport du lidar pour le suivi tridimensionnel de la physico-chimie de l'atmosphère

Les mesures effectuées grâce à un lidar permettent de réaliser des mesures des grandeurs d'intérêt (concentration des polluants, vitesse du vent...) dans une direction quelconque de l'espace, avec une excellente résolution spatiale, et, par conséquent, d'obtenir des informations sur le profil vertical de l'atmosphère. Alors que la première utilisation de ces « radars lasers » pour l'étude de la distribution atmosphérique des aérosols remonte à 1963, il faut encore attendre quelques années avant une première utilisation à Chicago pour l'étude des interactions entre brise de mer et pollution [17]. Le lidar a depuis considérablement amélioré l'étude des systèmes atmosphériques frontaux [18]. Ensuite, plusieurs recherches l'ont utilisé pour mieux définir la structure verticale du front de brise [12, 19]. Par la diversité de ses mesures et ses qualités de résolution spatiale, le lidar est en effet devenu un outil précieux pour l'analyse de la pollution atmosphérique et de sa dynamique, tant à l'échelle locale qu'à l'échelle régionale [20]. Les progrès considérables au cours des 20 dernières années, dans le domaine des lasers (par exemple, l'émergence des lasers à cristaux titane-saphir) et de l'optique non linéaire ont permis de réaliser des lidars de taille suffisamment réduite pour être embarqués dans un véhicule (Figure 2). L'utilisation de ces instruments est suffisamment souple pour mettre en œuvre des campagnes de mesures dans pratiquement tous les types d'espaces, aussi bien ruraux qu'urbains [21].

Le lidar est actuellement le seul instrument de terrain capable de délivrer en continu une mesure de la concentration en altitude des polluants gazeux et une information sur la charge en aérosols. Mais, comme son domaine d'action reste limité à une portée de quelques kilomètres, il ne peut pas véritablement remplacer la panoplie des instruments de mesure au sol. Il la complète en revanche avantageusement en apportant de nombreuses données originales. Dans un but prévisionnel, le lidar fournit par exemple des données d'entrée aux modèles numériques. Toujours dans le cadre des entrées nécessaires à la modélisation, il permet également de mesurer la hauteur et l'évolution d'une couche limite



Figure 2.

Lidar mobile de type lidar 510M (société Elight) appartenant à l'université du Littoral-Côte d'Opale : photo prise le 18 février 2002 lors d'une campagne de mesures dans la région de Dunkerque.

Mobile lidar system ELIGHT-510M belonging to ULCO (Université du Littoral-Côte d'Opale, Dunkerque, France) : this photo was taken in the Dunkerque area during the February 18, 2002 measurements.

(Photo : LPCA)

simple. Si les mesures de concentration sont associées à des mesures de vent en altitude, le lidar peut devenir un instrument de mesure de flux de polluants dans l'atmosphère. Dans cette voie, peu explorée jusqu'à présent, il peut jouer un rôle pertinent dans la validation d'un cadastre d'émission au voisinage des points névralgiques d'émission [22, 23]. Au-delà des lidars au sol, les lidars aéroportés demeurent actuellement les outils les mieux adaptés à l'étude des écoulements stratifiés à petite et moyenne échelles, en relation avec les concentrations de polluants. Mais leur rareté, pour des raisons techniques et financières évidentes, limitent pour l'instant considérablement l'utilisation des lidars aéroportés aux campagnes de mesures à l'échelle nationale.

Principaux concepts physiques et lecture des mesures lidar

Le principe du lidar est proche de celui d'autres instruments utilisés en télédétection. Appelé aussi « radar optique », le lidar permet de relever la position et la vitesse des corps rétrodiffusant la lumière qu'il émet dans une direction de tir prédéfinie via un périscope. La puissance lumineuse rétrodiffusée est collectée par un télescope, puis mesurée au cours du temps à l'aide d'un photomultiplicateur après filtrage dans un monochromateur. D'un point de vue analytique, la puissance rétrodiffusée est généralement considérée comme une fonction continue et décroissante du temps. Si une impulsion est émise à un instant initial dans l'atmosphère, la puissance mesurée à un instant ultérieur t correspond à une lumière ayant parcouru un aller-retour dans l'atmosphère sur une distance $2r = ct$ (donc rétrodiffusée à la distance r), où c est la vitesse de la lumière. La puissance de la lumière rétrodiffusée dépend de la puissance initiale P_0 de l'impulsion lumineuse émise à une longueur d'onde λ , du coefficient de rétrodiffusion local de

l'atmosphère $\beta(r)$ à cette longueur d'onde et de l'angle solide (A_0/r^2) du télescope d'aire A_0 vu par une source située à la distance r du télescope :

$$P(r) = \frac{ct}{2} \lambda \approx P_0(\lambda) \left(\frac{A_0}{r^2} \right) \beta(r) \exp(-2\tau(r, \lambda))$$

Cette puissance décroît exponentiellement avec l'épaisseur optique τ de l'atmosphère traversée. D'autres détails sont par ailleurs fournis dans Delbarre *et al.* [20].

La lumière rétrodiffusée représente un signal brut dont l'information pertinente est ensuite extraite au cours d'une phase dite « d'inversion du signal ». Chaque impulsion se propage sur plusieurs kilomètres et interagit avec les molécules et les aérosols qu'elle rencontre sur son trajet, en gardant la mémoire de l'interaction, caractéristique qui permet de différencier les milieux physico-chimiques parcourus par le faisceau. La concentration des composés gazeux dans l'air est mesurée le long du trajet optique par une technique d'absorption moléculaire différentielle, dite technique DIAL (*Differential Absorption Lidar*) [24]. Chaque mesure est en fait réalisée avec deux impulsions de longueurs d'onde proches tirées consécutivement. La connaissance du spectre d'absorption de la molécule visée permet de déterminer deux longueurs d'onde pour lesquelles les molécules absorbent ou n'absorbent pas le rayonnement. L'impulsion non absorbée sert alors de référence. Par ailleurs, les deux longueurs d'onde sont choisies suffisamment proches pour réagir de la même manière aux aérosols et aux autres molécules. La comparaison des signaux rétrodiffusés par ces deux impulsions permet alors d'extraire la distribution unidimensionnelle de la concentration du polluant visé. Les signaux rétrodiffusés contiennent également des informations sur les aérosols rencontrés. Cependant, la détermination spatialement résolue de la distribution de taille nécessite l'utilisation de plusieurs longueurs d'onde du domaine ultraviolet au domaine infrarouge.

Les domaines spectraux pertinents pour l'observation des gaz par une technique d'absorption molé-

culaire sont les gammes ultraviolette et infrarouge, le domaine visible ne présentant que peu d'intérêt. Cependant, l'intensité des signaux rétrodiffusés (déterminée par les propriétés de diffusion de la lumière dans l'atmosphère) et la nécessité d'une source optique puissante et accordable avec une finesse spectrale suffisante, rendent le domaine ultraviolet plus attractif pour la technique lidar. Comme le laser accordable dans la gamme ultraviolette n'existe pas, la technique consiste à générer un rayonnement infrarouge et à le convertir dans l'ultraviolet en utilisant les propriétés optiques non linéaires de certains cristaux (laser à état solide de type titane-saphir fonctionnant dans le domaine infrarouge proche). Il est alors possible d'accéder à la gamme spectrale correspondant au proche ultraviolet (380-435 nm), bande pertinente pour la détection du dioxyde d'azote. Une technique similaire permet d'étudier une gamme d'ultraviolets, dans des longueurs d'onde plus courtes (253-290 nm), facilitant ainsi l'étude de polluants tels que l'ozone et le dioxyde de soufre mais aussi certains composés organiques volatils tels que le benzène, le toluène et les xylènes. L'analyse du signal rétrodiffusé permet également de déduire du coefficient d'extinction des informations relatives à la charge en aérosols dans l'atmosphère, sans oublier qu'une part de l'extinction peut aussi être attribuée à l'absorption par les gaz et à la diffusion.

C'est en fonction du temps et/ou de l'espace que l'on décide finalement de visualiser les résultats des mesures obtenues par lidar. Deux types de représentation sont couramment utilisés :

- la représentation spatiale sur une courte période (souvent moins d'une heure), avec une coupe horizontale ou verticale de l'atmosphère par une succession de faisceaux. L'interpolation d'un grand nombre de faisceaux permet véritablement d'obtenir une cartographie de la concentration du polluant étudié, particulièrement pour l'étude de la couche limite (Figure 3a) ;

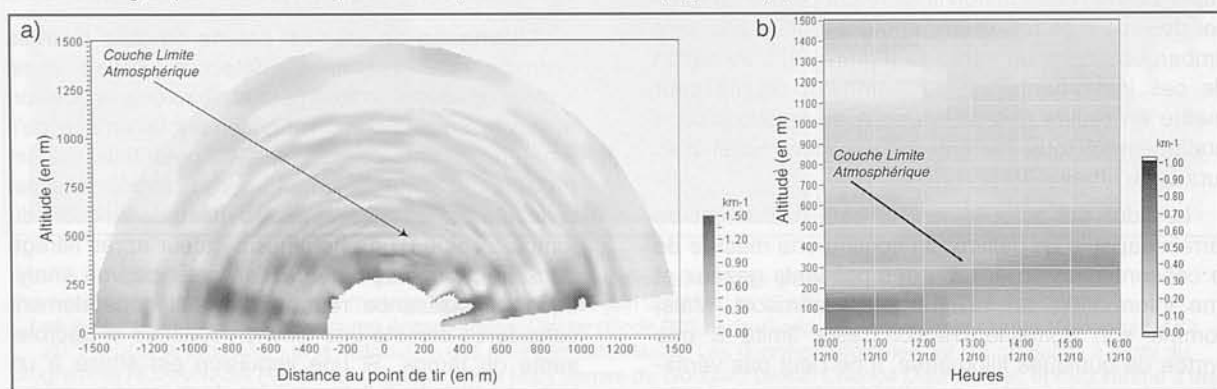


Figure 3.

Exemples de représentations spatio-temporelles issues d'un tir lidar effectué à Dunkerque le 12 octobre 2001 sur le site de la MREID : a) profil angulaire vertical du coefficient d'extinction moyen calculé sur la période 10 h 43 – 11 h 40 (les zones en noir correspondent à la charge en aérosols la plus élevée) ; b) diagramme de Hovmöller temps-altitude représentant l'évolution du coefficient d'extinction entre 10 h et 16 h.

Example of spatio-temporal diagrams obtained from lidar measurements at Dunkerque (October 12, 2001) near MREID area : a) vertical cross section of the extinction coefficient measured on the 10:43 – 11:40 UT period (the dark zones show the highest aerosol load) ; b) time-height Hovmöller diagram showed the lidar extinction coefficient between 10:00 and 16:00 UT.

(Source : LPCA – LGMA)

• **un diagramme spatio-temporel de Hovmöeller** qui consiste à projeter, pour une direction de l'espace (par exemple la direction verticale) l'ensemble des faisceaux mesurés sur tout le temps de la mesure. On aboutit alors à la cartographie de la concentration du polluant ou de son coefficient d'extinction en fonction de l'altitude et du temps (Figure 3b).

Exemple d'une campagne de mesures au cours d'un épisode de brise de mer dans la région dunkerquoise (13 juin 2001)

Étude de la situation météorologique

Parallèlement à une campagne de tirs lidar effectuée pendant la journée du 13 juin 2001 à Dunkerque, un ensemble de données météorologiques provenant du réseau régional de Météo-France est rassemblé (moyennes trihoraires pour la pression, la température, la force et la direction du vent mesurées à 10 m). Cette base de données permet, d'une part, d'effectuer une comparaison avec les mesures obtenues par les instruments météorologiques à proximité du lidar et surtout, d'autre part, de donner une dimension cartographique régionale aux variations météorologiques. À partir de l'outil d'extraction automatique COLCHIQUE de Météo-France, les mesures de 22 stations sont rassemblées, réparties sur les départements du Nord, du Pas-de-Calais et de la Somme (Figure 4). Malgré la faible densité de ce réseau et son anisotropie spatiale, il demeure satisfaisant pour

une étude de climatologie régionale, notamment pour l'étude des distinctions entre espaces côtiers et espaces intérieurs.

Après examen, aucune image NOAA-AVHRR ou Météosat ne peut être retenue afin de caractériser cette situation de brise de mer, les images étant fortement parasitées par des masses nuageuses passagères liées à la situation météorologique synoptique. En effet, avec un champ de pression peu marqué en surface (entre 1014 et 1017 hPa), la journée du 13 juin se caractérise par une forte instabilité, avec le passage d'orages accompagnés de faibles pluies et de nuages cumuliformes en périphérie du Pas-de-Calais [25]. Cependant, en moyenne, le gradient de pression d'échelle synoptique reste relativement faible (< 1 hPa) dans toute la région littorale, accompagné d'un ciel relativement clair qui permet une insolation importante du sol ainsi que son réchauffement rapide, donc un forçage thermique local prédominant dans la dynamique d'échelle synoptique.

L'étude des séries thermiques journalières est un des moyens de discrimination de l'apparition de la brise de mer. En effet, fortement corrélée à l'irradiation solaire, la brise de mer commence généralement dans la matinée, quelques heures après le lever du soleil, alors que les basses couches atmosphériques continentales commencent à se réchauffer. L'écart de température entre les couches continentale et maritime peut alors devenir suffisamment important pour générer une circulation d'air de la mer vers la terre. La mise en place de cette circulation s'accompagne d'une diminution de la température de la couche continentale.

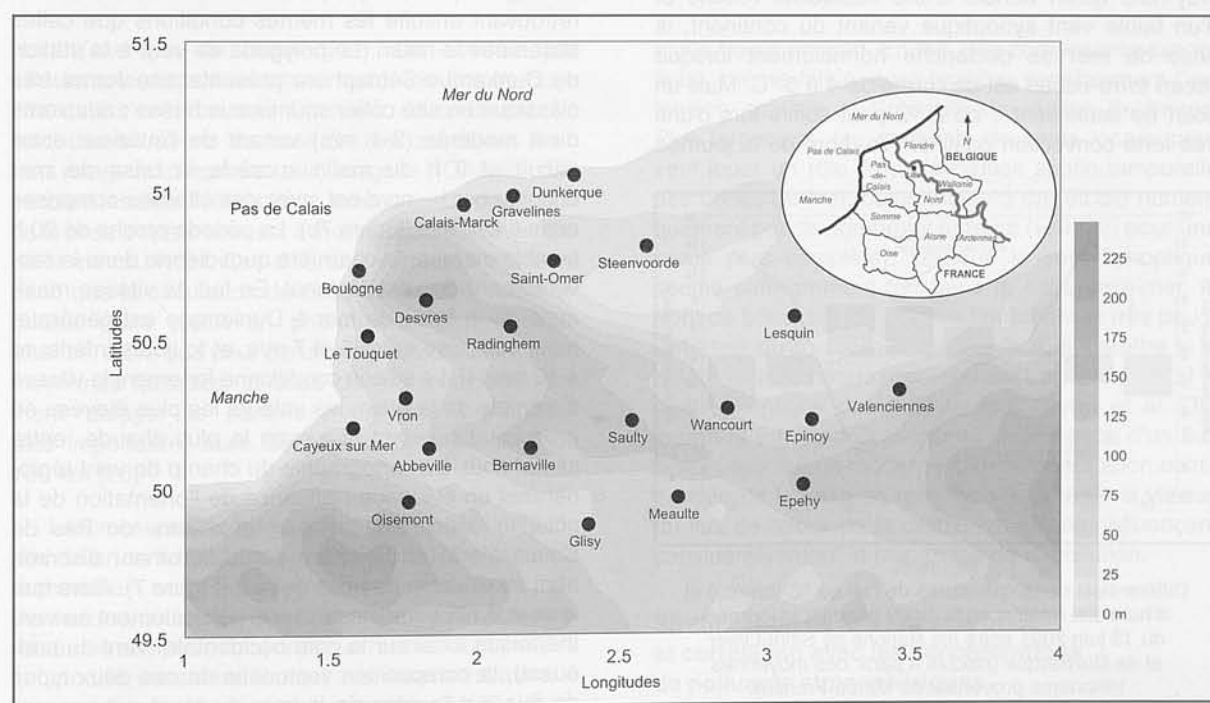


Figure 4.

Le réseau météorologique régional utilisé et le relief issu du Modèle numérique de terrain ETOPO 5 (résolution spatiale de $5' \times 5'$) ; figure créée par le LGMA.

The regional meteorological network and the gridded elevation data ETOPO5 ($5' \times 5'$ of spatial resolution) ; figure created by LGMA.

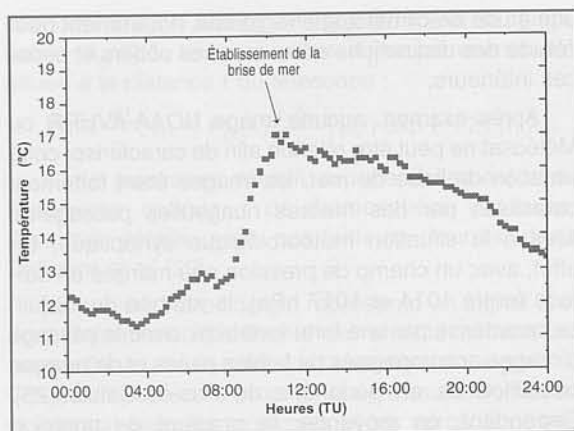


Figure 5.

Température quart-heure mesurée entre 0 h et 24 h TU le 13 juin 2001 à la station météorologique d'Opal'Air à Saint-Pol-sur-Mer, au voisinage du site de mesure du lidar.

Surface temperature measured between 00:00 and 24:00 UT (June 13, 2001 ; 4 measurements per hour) at the Saint-Pol-sur-Mer meteorological station of Opal'Air network, near lidar area.

(Données : Opal'Air)

La figure 5 montre l'évolution de la température mesurée au voisinage de la côte, à la station météorologique d'Opal'Air de Saint-Pol-sur-Mer. Cette chronique permet de situer l'établissement de la brise de mer dans la région de Dunkerque entre 11 h et 12 h TU. L'intensité du gradient horizontal de température traduit l'amplitude du forçage thermique de surface et donc l'importance de la circulation de brise, une relation de proportionnalité existant d'ailleurs souvent entre les deux paramètres [26]. Mayençon [15] note qu'en dehors d'une nébulosité réduite et d'un faible vent synoptique venant du continent, la brise de mer se déclenche normalement lorsque l'écart terre-océan est de l'ordre de 4 à 5 °C. Mais un écart de seulement 1 ou 2 °C peut suffire lors d'une très forte convection continentale. Lors de la journée

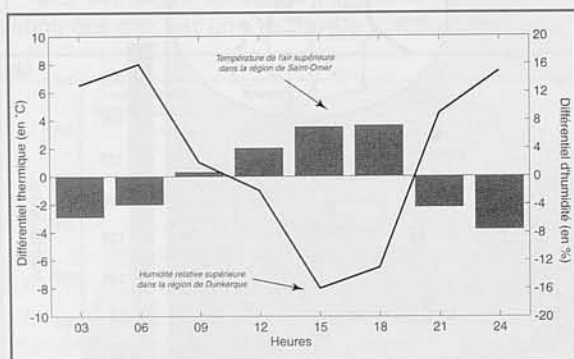


Figure 6.

Différentiels de températures de l'air en °C (barres) et d'humidité relative en % (trait) pendant la journée du 13 juin 2001 entre les stations de Saint-Omer et de Dunkerque (calculs à partir des moyennes trihoraires provenant de Météo-France).

Temperature in °C (bars) and relative humidity in % (line) differentials computed between Saint-Omer and Dunkerque from the tri-hourly Météo-France averages (June 13, 2001).

(Source : LGMA)

d'étude du 13 juin 2001, le différentiel thermique entre Dunkerque et Saint-Omer (station située à environ 30 km de la côte de la mer du Nord) atteint 2 °C vers 12 h et dépasse 3,5 °C entre 15 et 18 h (Figure 6). Dans un même temps, en fonction de l'inversion du flux de brise au cours de la matinée, les gradients régionaux d'humidité relative évoluent également, les valeurs atteintes à Dunkerque dans l'après-midi dépassant d'environ 15 % celles enregistrées plus à l'intérieur. Cependant, ces différentiels météorologiques, surtout lorsqu'ils sont analysés avec une faible résolution temporelle, restent de mauvais prédictors statistiques de l'intensité effective de la brise de mer qui se traduit en fait souvent par des pulsations du flux accompagnées de modulations du front de brise [14]. En outre, l'influence des conditions météorologiques d'échelle synoptique reste prépondérante, la présence d'un anticyclone d'altitude pouvant par exemple limiter l'instabilité verticale (et donc l'intensité de la brise) même si les écarts thermique et hygrométrique continent-océan sont très importants.

La mesure du vent dans les basses couches est finalement déterminante pour obtenir un suivi opérationnel des épisodes de brise. La figure 7a décrit l'évolution temporelle de l'intensité et la direction du vent, au voisinage de la côte à la station météorologique d'Opal'Air de Saint-Pol-sur-Mer. Ces mesures permettent de déterminer sans ambiguïté le déclenchement de l'épisode de brise ainsi que sa fin. En matinée, le vent est de secteur est, avec une force de 3-4 m/s. Vers 11 h TU, l'établissement de la brise entraîne un changement brusque de sa direction vers le secteur nord – nord-est, avec une force de 6-8 m/s. Ce régime persiste jusqu'à environ 20 h TU, le vent retrouvant ensuite les mêmes conditions que celles observées le matin. Le polygone de vent à la station de Dunkerque-Sémaphore présente une forme très classique en site côtier soumis aux brises : aux vents d'est modérés (3-4 m/s) venant de l'intérieur entre minuit et 9 h du matin succède la brise de mer orientée nord – nord-est, avec des vitesses comprises entre 6 et 8 m/s (Figure 7b). La période proche de 20 h semble marquer la charnière quotidienne dans le renversement du vent régional. En fait, la vitesse maximale de la brise de mer à Dunkerque est généralement comprise entre 5 et 7 m/s, et toujours inférieure à 10 m/s [4]. La saison conditionne fortement la vitesse maximale de la brise, les valeurs les plus élevées se produisant pendant la saison la plus chaude, entre juin et août. La cartographie du champ de vent régional met en évidence l'influence de l'orientation de la côte, le découpage de part et d'autre du Pas de Calais étant un caractère particulièrement discriminant en situation de brise de mer (Figure 7). Alors que le vent synoptique s'additionne généralement au vent thermique local sur la côte occidentale (vent du sud-ouest), la composition vectorielle de ces deux types de flux sur la côte de la mer du Nord est souvent basée sur l'opposition entre le vent thermique et le vent synoptique [27]. En outre, la force du vent est moins intense et variable sur la côte de la Manche (exemple de Boulogne) qu'à proximité de la mer du

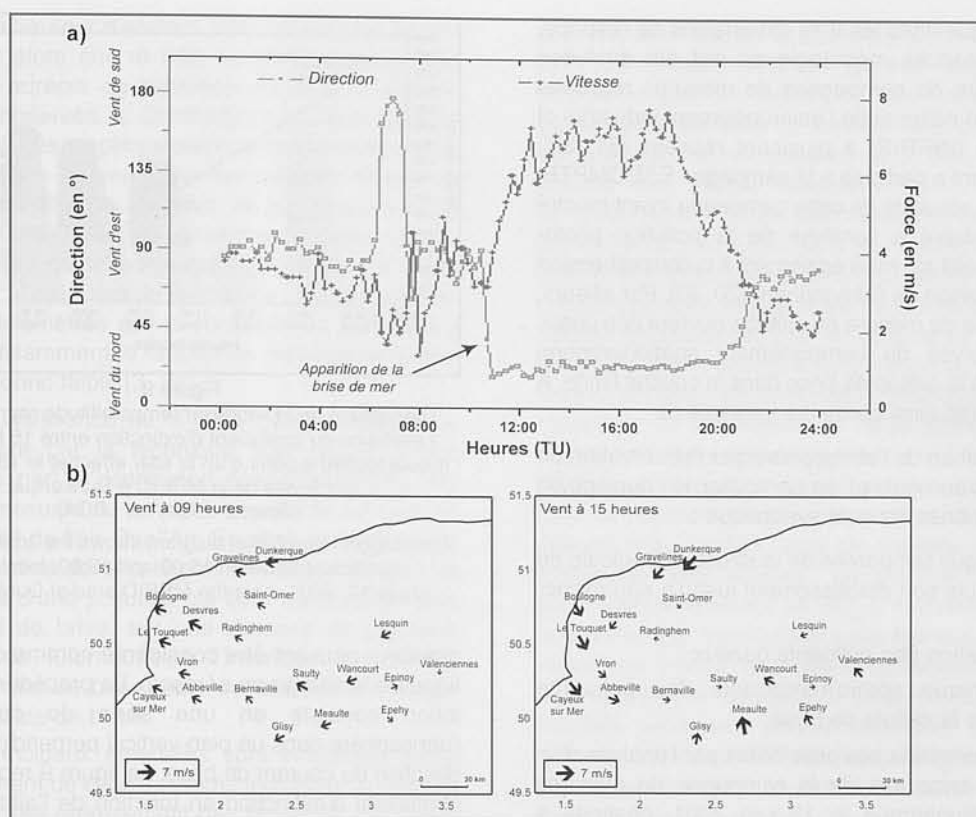


Figure 7.

a) Vitesse et orientation du vent quart-heure, mesurées le 13 juin 2001 à la station météorologique d'Opal'Air à Saint-Pol-sur-Mer, au voisinage du site de mesure du lidar (Données : Opal'air) ; b) champ de vent vectoriel à 9 h TU (graphique de gauche) et 15 h TU (graphique de droite) pour 20 stations météorologiques régionales (Données : Météo-France).

a) Wind speed and wind orientation (4 measurements per hour) measured on June 13, 2001 at the Saint-Pol-sur-Mer meteorological station of Opal'Air network, near lidar area (Data : Opal'Air network); b) scalar wind field at 09:00 UT (left) and 15:00 UT (right) from 20 regional meteorological stations (Data : Météo-France).

Nord (exemple de Dunkerque). On observe par ailleurs une disparition assez rapide du flux de brise dès qu'il s'enfonce vers l'intérieur du continent. Le suivi des situations de brise de mer associées à un front nuageux et repérées par l'imagerie NOAA-AVHRR pendant les étés 2000 et 2001 indique que la disparition de la brise s'opère souvent à moins de 30 km de la côte de la mer du Nord. Ces différents éléments indiquent donc que la circulation de brise de la région dunkerquoise reste plutôt un phénomène géographique localisé, alors que pour certaines plaines côtières des moyennes latitudes, la brise de mer peut fréquemment balayer le continent sur une profondeur plus importante, mais dépassant rarement plus de 100 km [28].

Les mesures horaires effectuées à proximité du site de tir du lidar (Dunkerque-MREID, Maison de la recherche sur l'environnement industriel de Dunkerque) indiquent que le vent local peut être soumis à une composante synoptique relativement instable qui modifie considérablement ses caractéristiques, à l'exemple de la situation observée vers 7 h TU, avec un renversement du vent qui passe brutalement d'une composante est à une composante sud (Figure 7a). Ce renversement peut être lié à l'établissement d'un régime de brise de terre pendant une durée très courte

d'une heure environ. En fait, une composante synoptique, même faible, peut modifier sensiblement l'extension spatiale et l'intensité du régime de brises. Plus largement, les gradients de vents locaux peuvent jouer un rôle dans l'évolution spatio-temporelle des brises de mer, comme cela a été étudié numériquement par de nombreux auteurs (voir [29] pour une revue plus complète). Lorsque le vent synoptique souffle suffisamment fort dans le sens terre-mer, le front de brise de mer pénètre lentement et très peu à l'intérieur du continent. Il peut même disparaître si le différentiel thermique mer-terre est trop faible, ou si le vent synoptique devient trop fort. Camp *et al.* [30] montrent par modélisation que la présence d'un flux synoptique même modéré inhibe la pénétration continentale de la brise de mer mais augmente la vitesse du flux de retour de la cellule en altitude, influençant considérablement la dispersion de la pollution.

Stratification de la cellule de brise et corrélation avec les concentrations de polluants atmosphériques

Le lidar de l'ULCO est un instrument mobile de type lidar 510M de la société allemande Elight. C'est actuellement l'instrument mobile le plus performant pour l'analyse *in situ* et en temps réel de la pollution

atmosphérique dans les trois dimensions de l'espace. Ses performances météorologiques ont été évaluées dans le cadre de campagnes de mesures réalisées avec l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) à plusieurs reprises [31, 32]. Cet instrument a participé à la campagne ESCOMPTE, les premiers résultats de cette campagne ayant montré qu'il était adapté à l'analyse de la pollution photochimique en altitude mais également à la compréhension de la stratification de l'atmosphère [20, 33]. Par ailleurs, ses capacités de mesure en altitude ouvrent des possibilités d'analyse du comportement spatio-temporel complexe de la cellule de brise dans la couche limite. À terme, il devrait ainsi permettre l'analyse de :

- la stratification de l'atmosphère par l'observation de la charge en aérosols et, en particulier, le couplage de la cellule de brise au vent synoptique ;
- la dynamique temporelle de la structure verticale de la brise depuis son établissement jusqu'à son extinction ;
- la stratification des polluants gazeux ;
- la dynamique spatio-temporelle des polluants gazeux dans la cellule de brise.

Nous illustrerons ces possibilités par l'analyse d'un épisode de brise lors de la campagne de mesures réalisée à Dunkerque le 13 juin 2001, destinée à déterminer la hauteur du courant de brise et son évolution au cours d'un épisode, en corrélation avec les mesures de concentrations de polluants gazeux au sol.

Les mesures lidar réalisées sur le site de la MREID de l'université du Littoral (Figure 8) ont débuté alors que la brise était déjà établie. Elles ont permis d'observer sa stratification et sa dynamique jusqu'à environ 19 h (heure locale). La structuration de l'atmosphère est déterminée à partir de la mesure du coefficient d'extinction à une longueur d'onde de 286,3 nm, cette

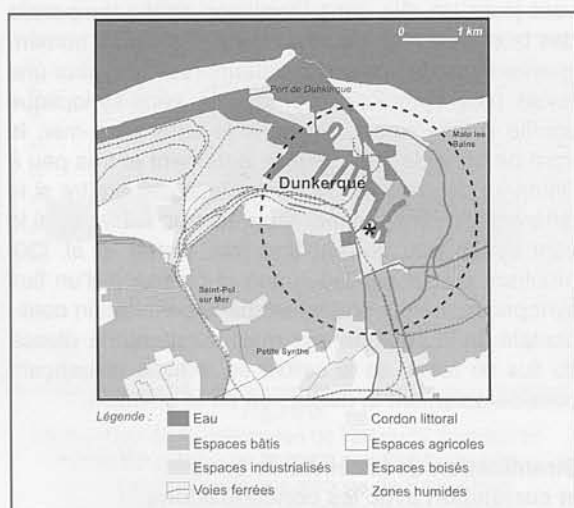


Figure 8.

Repérage du site de mesure du lidar et de son auréole de détection (rayon de 2 km).

(Carte : LGMA)

Localization of the lidar and the associated study area (within 2 km radius).

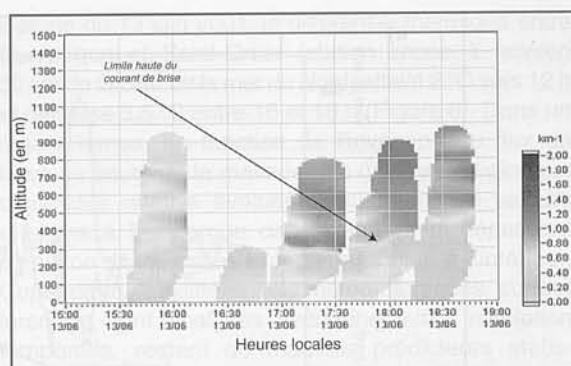


Figure 9.

Diagramme de Hovmöeller temps-altitude représentant l'évolution du coefficient d'extinction entre 15 h et 19 h (heure locale) à partir d'un tir lidar effectué le 13 juin 2001 sur le site de la MREID à Dunkerque.

(Source : LGMA et LPCA)

Time-height Hovmöeller diagram shows the lidar extinction coefficient between 15:00 and 19:00, local time (June 13, 2001, near the MREID area at Dunkerque).

grandeur pouvant être considérée comme caractéristique de la charge en aérosols. La procédure d'acquisition consiste en une série de coupes de l'atmosphère dans un plan vertical perpendiculaire à la direction du courant de brise. La figure 9 représente le coefficient d'extinction en fonction de l'altitude et du temps obtenu à partir de cinq coupes consécutives de l'atmosphère. Dans le cas présent, l'extinction contient une part liée à l'absorption par l'ozone. Cependant, les mesures par lidar de la concentration d'ozone réalisées au cours de la brise n'ont pas révélé de stratification particulière, mais au contraire une répartition quasi homogène de l'ozone en fonction de l'altitude. Il en résulte que la distribution spatiale de l'extinction (c'est-à-dire le contraste de l'extinction) est principalement liée à la charge en aérosols. La représentation temporelle du coefficient d'extinction montre que la distribution spatiale des aérosols se divise en deux couches principales. La couche située à basse altitude (< 250 m environ) contient une charge en aérosols nettement inférieure à la couche supérieure. Elle correspond au courant de brise, c'est-à-dire à un air frais venant de la mer, peu chargé en particules. La couche supérieure, attribuable au contre-courant de la circulation atmosphérique, se charge progressivement en aérosols au cours de l'épisode. Cette situation est typique de la mise en évidence du flux de retour de la circulation cellulaire de brise (appelé aussi contre-brise ou anti-brise), en relation avec la branche ascendante positionnée sur le continent, au niveau du front nuageux. La représentation du coefficient d'extinction permet donc de déterminer la hauteur du courant de brise dans lequel est émise la majeure partie des polluants. La hauteur du courant de brise est relativement stable jusqu'à 17 h (heure locale) environ, positionnée en moyenne vers 250 m d'altitude. Elle s'élève ensuite en fin d'après-midi pour gagner une situation plus proche de 400 m. À titre de comparaison, en l'absence du phénomène de brise et en situation anticyclonique, la couche de piégeage de polluants émis est la couche limite s'élève

vant à une hauteur d'environ 1 km. D'un point de vue spatial, et alors que le lidar ne permet qu'un suivi dans une auréole de détection d'environ 2 km, les résultats observés à Dunkerque peuvent pourtant être considérés empiriquement comme représentatifs de la situation observée sur les premiers kilomètres de la bande littorale. En effet, de nombreux travaux ont déjà montré que les variations des taux de polluants au sein de cette zone sont généralement assez faibles car le parcours de la brise de mer pendant ses premiers kilomètres sur le continent ne suffit pas à élever suffisamment le rapport de mélange et la dilution reste donc faible [3, 34].

La connaissance de la stratification verticale de l'atmosphère par la technique lidar gagne à être complétée par la distribution spatio-temporelle des polluants mesurée au sol par le réseau de surveillance de la qualité de l'air Opal'Air. En effet, les concentrations mesurées dans la région dunkerquoise sont les indicateurs d'une pollution qui sera transportée dans le courant de brise, sur une distance de plusieurs dizaines de kilomètres à l'intérieur des terres, jusqu'au front de brise, puis éventuellement piégée dans la cellule de brise.

Les principaux émetteurs sont industriels, aussi est-il pertinent de choisir comme indicateur le dioxyde de soufre très représentatif des procédés industriels

que l'on peut trouver à Dunkerque. À l'échelle d'un jour, ce polluant peut en général être considéré comme un gaz non réactif [30]. Les changements de sa concentration dans les basses couches, à l'échelle de quelques heures peuvent donc être considérés comme une simple résultante de la dynamique atmosphérique. L'étude des variations de la concentration de SO_2 au cours de la journée du 13 juin 2001 permet de mieux cerner la relation entre les facteurs météorologiques locaux et les variations des concentrations quotidiennes. Les 10 stations de mesure ont été choisies de manière à documenter la pollution sur un secteur couvrant une bande côtière longue d'une quinzaine de kilomètres et large d'environ 5 km (Figure 10). La confrontation entre les mesures des stations et la direction du vent montre clairement une forte corrélation entre le phénomène de brise et la concentration de SO_2 pour les stations en aval des industries. Par ailleurs, on constate une forte sensibilité de la teneur en SO_2 à la direction du vent, caractéristique d'émissions sous forme de panaches industriels. Il est à noter que cette sensibilité rend difficile la prévision des pics de pollution. La station de Mardyck représente un cas particulier. En effet, on observe une exposition élevée au SO_2 en dehors de la brise et une chute brutale de la concentration jusqu'à un niveau quasi nul dès que la brise s'installe.

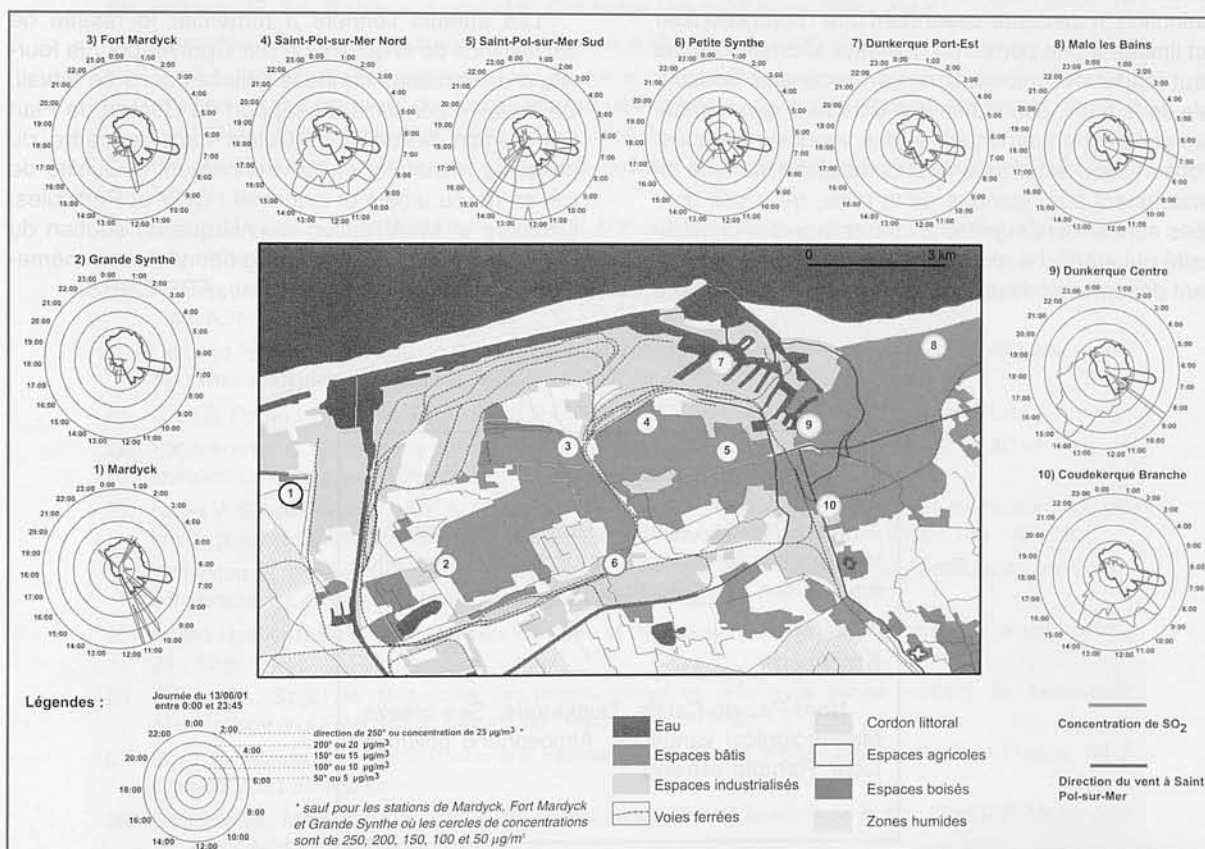


Figure 10.

Relations entre la direction du vent mesurée à la station météorologique d'Opal'Air à Saint-Pol-sur-Mer et les mesures de concentration de SO_2 réalisées pour 10 stations d'Opal'Air réparties dans la région de Dunkerque (Création : S. Bigot)

Correlations between wind direction measured at the Saint-Pol-sur-Mer station (Opal'Air network) and SO_2 concentrations measured in the Dunkerque area.

Par le biais d'un flux d'est, cette localité est soumise aux émissions de la totalité de la zone industrielle dunkerquoise. Par contre, par un flux de nord – nord-est correspondant au régime de brise, il n'y a plus d'émetteurs importants en amont de la localité.

Conclusion

La prévision du comportement de la pollution de l'air au cours d'événements de brise nécessite la prévision des caractéristiques propres de la brise : son extension horizontale à l'intérieur des terres mais également en mer, son extension verticale dans la couche limite (en particulier la hauteur du courant de brise) et sa dynamique temporelle (l'évolution du front de brise et de la stratification verticale). Nous avons montré comment une approche multi-échelle permet de fournir cet ensemble d'informations. D'une part, la technique lidar permet d'aborder la stratification fine de l'atmosphère dans sa composante verticale, à partir de la différence de charge en aérosols dans le courant de brise et dans le contre-courant, matérialisant ainsi la cellule de brise dans la couche limite. D'autre part, au-delà de l'aspect spatial, cette technique, par ses capacités de mesure quasi continue, permet d'aborder la dynamique temporelle de la cellule de brise depuis sa formation jusqu'à son extinction. Il demeure cependant que l'approche lidar est limitée à une portée de quelques kilomètres et ne peut fournir des informations sur l'extension horizontale de la brise, caractéristique fortement dépendante des conditions thermiques et des vents synoptiques. L'observation satellitaire peut combler ce manque en renseignant sur l'étendue de la brise, mais ces données sont encore sujettes au parasitage par la nébulosité qui empêche alors leur traitement. Il est cependant désormais possible, grâce à l'action conjointe de

l'instrumentation au sol et de la télédétection (lidar et satellite), de documenter, à l'échelle locale, les mécanismes météorologiques liés aux brises. La poursuite des campagnes de mesures dans la région dunkerquoise doit maintenant permettre de renforcer l'étude de la dynamique régionale des polluants en fonction des conditions météorologiques pour pouvoir ensuite valider certains modèles prédictifs de dispersion de polluants dans l'atmosphère.

Cependant, même si les mesures verticales obtenues par lidar sont nécessaires pour compléter les bases de données, le coût et la technicité du matériel d'une part, ainsi que la complexité des campagnes de mesures d'autre part, restent encore un frein important pour une utilisation régulière, dans une perspective d'observation opérationnelle à long terme des concentrations verticales d'aérosols et de polluants gazeux. Aussi est-il important de développer une approche qualitative de la compréhension des phénomènes ainsi qu'une approche de modélisation de ces événements locaux à des fins prédictives. La compréhension de la dynamique spatio-temporelle de ce type d'événements pourra également être prise en considération dans la localisation des stations de surveillance.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le réseau de surveillance de la qualité de l'air Opal'Air pour la fourniture de certaines données utilisées dans ce travail. Ce travail a bénéficié du support du Contrat de Plan État-Région Nord-Pas-de-Calais dans le cadre du projet de recherche en Environnement « Qualité de l'air en milieu urbain et industriel : COV et Particules. Cadastre et Modélisation » ainsi que du soutien du CNRS dans le cadre d'un programme Action thématique et incitative sur programme, ATIP-CNRS.

Mots clés

Nord-Pas-de-Calais. Dunkerque. Brise de mer. Variations météorologiques. Pollution atmosphérique. Lidar. Télédétection.

Keywords

Nord-Pas-de-Calais. Dunkerque. Sea-breeze. Meteorological variations. Atmospheric pollution. Lidar. Remote sensing.

Références

1. DRIRE Nord-Pas-de-Calais. Projet de Plan de Protection de l'Atmosphère de l'agglomération dunkerquoise, 1999 : 98 p.
2. Charabi Y. L'îlot de chaleur urbain de la métropole lilloise : mesures et spatialisation. Thèse de Doctorat, Université Lille I, 2001 : 245 p.
3. Lyons WA. The climatology and prediction of the Chicago Lake-breeze. *J Appli Meteorol* 1972 ; 11 : 1259-70.
4. Leriche P, Kergomard C, Chapelet P. Étude des brises de mer sur le littoral français de la mer du Nord. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie* 1998 ; 11 : 107-14.
5. Roussel I, Kergomard C. Brises de mer et pollution atmosphérique industrielle : l'exemple de l'agglomération de Dunkerque. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie* 1999 ; 12 : 51-62.
6. Kölsch HJ, Rairoux P, Wolf JP, Wöste L. Comparative study of nitric oxide immission in the cities of Lyon, Geneva and Stuttgart using a mobile differential absorption lidar system. *Appl Phys* 1992 ; B 54 : 89-94.
7. Kasparian J, Frejafon E, Rambaldi P, Yu J, Vezin B, Wolf JP, Ritter P, Viscardi P. Characterization of urban aerosols using SEM-microscopy, X-ray analysis and lidar measurements. *Atmos Environ* 1998 ; 32 : 2957-67.
8. Kambezidis HD, Weidauer D, Melas D, Ulbricht M. Air quality in the Athens basin during sea breeze and non sea breeze days using laser remote sensing technique. *Atmos Environ* 1998 ; 32 : 2173-82.
9. Atlas D. Radar detection of the sea breeze. *J Meteorol* 1960 ; 17 : 244-58.
10. Brown HA. Report on radar thin lines. Proceedings of the 8th Weather Radar Conference, AMS, Boston, 1960 : 65-72.
11. Geotis SG. On sea breeze 'Angels'. World Conference on Radio Meteorology, Boulder (Colorado), AMS, 1964 : 1-4.
12. Intieri JM, Bedard AJ, Hardesty RM. Details of colliding thunderstorm outflows as observed by doppler lidar. *J Atmos Sci* 1990 ; 47 : 1081-98.
13. Andersson T, Lindgren B. A sea-breeze front seen by radar. *Meteorol Mag* 1992 ; 121 : 230-41.
14. Simpson JE. Sea Breeze and local wind. Cambridge University Press 1994 : 234 p.
15. Mayençon R. Météorologie marine. Éd. Maritimes & d'Outre-Mer 1992 : 336 p.
16. Janoueix-Yacono D. Rapport entre brise de mer ou de lac, structure de la couche limite planétaire et pollution atmosphérique sur des plaines littorales urbanisées. In : Climat, Pollution atmosphérique, Santé – Hommage à Gisèle Escourrou, Dijon, 1995 : 177-201.
17. Bennett EW, Oded BD. Application of lidar to air pollution measurements. *J Appli Meteorol* 1967 ; 6 : 500-15.
18. Shimizu H, Sasano Y, Nakane H, Sugimoto N, Matsui I, Takeuchi N. Large scale laser radar for measuring aerosol distribution over a wide area. *Appl Opt* 1985 ; 24 : 617-26.
19. Nakane H, Sasano Y. Structure of sea-breeze front revealed by scanning lidar observation. *J Meteorol Soc Jap* 1986 ; 64, 787-92.
20. Delbarre H, Fréville P, Augustin P, Bocquet R. La technique lidar : de la production de lumière à la représentation spatio-temporelle de la pollution de l'air. *Air pur* 2002 ; 62 : 36-40.
21. Cros B, Durand P, Cachier H, et al., 2002 : ESCOMPTE program : an overview. *Atmos Res (In press)*.
22. Schadkowski C. Étude de la pollution à l'échelle régionale par modélisation eulérienne 3D et mesures spectroradiométriques. Thèse de Doctorat, Université de Lille I, 1999.
23. Nollet V, Schadkowski C, HUE S, Flandrin Y, Dechaux JC. Élaboration d'un cadastre d'émissions de polluants primaires dans la région Nord-Pas-de-Calais. *Pollution Atmosphérique* 2000 ; 165 : 109-19.
24. Zanzottera E. Differential absorption lidar techniques in the determination of trace pollutants and physical parameters of the atmosphere. *Analytical Chemistry* : 1990 ; 21 : 279-319.
25. Météo Hedbo. Bulletin hebdomadaire d'études et de renseignements. Météo France, Toulouse, 2001 ; 24 : 16 p.
26. Pielke RA, Segal M. Mesoscale circulations forced by differential terrain heating. In: *Mesoscale Meteorology and Forecasting*, Ray PS Ed., AMS 1986 : 516-48.
27. Bigot S, Planchon O. Identification and carактерization of sea breeze days in North of France. *Int J Climatol* 2003 (*In press*).
28. Simpson JE, Mansfield DA, Milford JR. Inland penetration of sea-breeze fronts. *Quat J R Meteo Soc* 1977 CIII, N0435 : 47-76.
29. Bechtold P, Pinty JP, Mascart P. A numerical investigation of the influence of large-scale winds on sea-breeze and inland-breeze-type circulations. *J Appli Meteorol* : 1991 ; 30 : 1268-79.
30. Camp J, Massons J, Soler MR, Nickerson EC. Pollutant transport in coastal areas with and without background wind. *Ann Geophysicae* 1997 ; 15 : 476-86.

31. Ulbricht M, Rairoux P, Reif J, Weidauer D, Wolf JP. Calibration procedures of lidar systems. SPIE: 1993 ; 2112 : 1994-7.
32. Frejafon E, Godet Y, Thomasson A. 2000. Évaluation du lidar 510M Elight : toluène et benzène. Rapport INERIS – Loi sur l’Air – Convention 18/99 – EFr/YGo n° 535, Verneuil-en-Halatte.
33. Mestayer P, Durand P, Augustin P, *et al.* 2003 : The Urban Boundary Layer field experiment over Marseille UBL/CLU-Escompte : experimental setup and first results, (*Submitted to Boundary - Layer Meteorology*).
34. Lyons WA, Cole LE. Photochemical oxidant transport : mesoscale lake breeze and synoptic-scale aspects. *J Appl Meteorol* 1976 ; 15 : 733-43.