

Topoclimatologie et pollution de l'air dans les Alpes-Maritimes : mécanismes et conséquences en images

Nicolas Michelot and Pierre Carrega

**Electronic version**

URL: <http://journals.openedition.org/echogeo/13951>

DOI: 10.4000/echogeo.13951

ISSN: 1963-1197

Publisher

Pôle de recherche pour l'organisation et la diffusion de l'information géographique (CNRS UMR 8586)

Electronic reference

Nicolas Michelot and Pierre Carrega, « Topoclimatologie et pollution de l'air dans les Alpes-Maritimes : mécanismes et conséquences en images », *EchoGéo* [Online], 29 | 2014, Online since 15 October 2014, connection on 01 May 2019. URL : <http://journals.openedition.org/echogeo/13951> ; DOI : 10.4000/echogeo.13951

This text was automatically generated on 1 May 2019.



EchoGéo est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International

Topoclimatologie et pollution de l'air dans les Alpes-Maritimes : mécanismes et conséquences en images

Nicolas Michelot and Pierre Carrega

Introduction

- 1 Cet article vise à présenter la problématique de la pollution de l'air sous l'influence de phénomènes météorologiques d'échelle locale à l'aide de photographies et schémas. Autrement dit, le but consiste à vulgariser et prouver l'organisation de mécanismes complexes grâce à des images pédagogiques, dont des photographies de grand angle offrant des panoramas de ces manifestations de pollution atmosphérique. Ces illustrations prennent place au sein d'un espace littoral montagneux : les Alpes-Maritimes, département situé dans l'extrême sud-est de la France. Des phénomènes atmosphériques s'y produisent à l'échelle topoclimatique et ont un impact quotidien sur la vie humaine, comme celui de la pollution atmosphérique (Carrega, 2005).
- 2 Les exemples qui suivent sont tirés de cas concrets se déroulant dans un environnement plutôt connu au travers de son « image d'Épinal » célébrant ses montagnes, son ciel bleu, son soleil et sa baignade, et non pour des problèmes environnementaux. Pourtant, si ces atouts font la renommée de la Côte d'Azur, ils occasionnent aussi une problématique de pollution de l'air en fonction, entre autres, des conditions météorologiques.
- 3 La plus grande partie de l'année (environ 80 %), la situation météorologique à l'échelle synoptique engendre sur le département un temps calme, un vent faible et offre un ciel clair. Les rares pluies tombent généralement sous forme d'orages forts, essentiellement au printemps et à l'automne. Ainsi, les effets du rayonnement solaire et du rayonnement terrestre jouent pleinement entre les différents substrats géographiques et entraînent

des disparités thermiques précurseurs de phénomènes topoclimatiques, comme les brises et inversions thermiques.

- 4 En relief contrasté, les brises et inversions thermiques sont très fréquentes. Ces phénomènes météorologiques locaux sont fortement influencés par la topographie, c'est à dire par les caractéristiques du relief (altitude, pente, exposition...) et par les formes du terrain (cuvette, vallon...). Ils se définissent ainsi comme des topoclimats, concernent l'échelle locale et intéressent les basses couches de la troposphère en contact avec la surface terrestre. Les topoclimats étant combinés au comportement quotidien des paramètres thermiques et dynamiques de la couche limite atmosphérique, ils déterminent, ou non, la dispersion, l'advection, la recirculation et l'accumulation des polluants.
- 5 C'est avec un relief omniprésent, dont l'influence est écrasante dans ce département, qu'il faut composer pour comprendre le développement des lacs d'air froid nocturnes (1), des différents écoulements d'air d'origine thermique (2), et leurs conséquences sur la pollution de l'air.

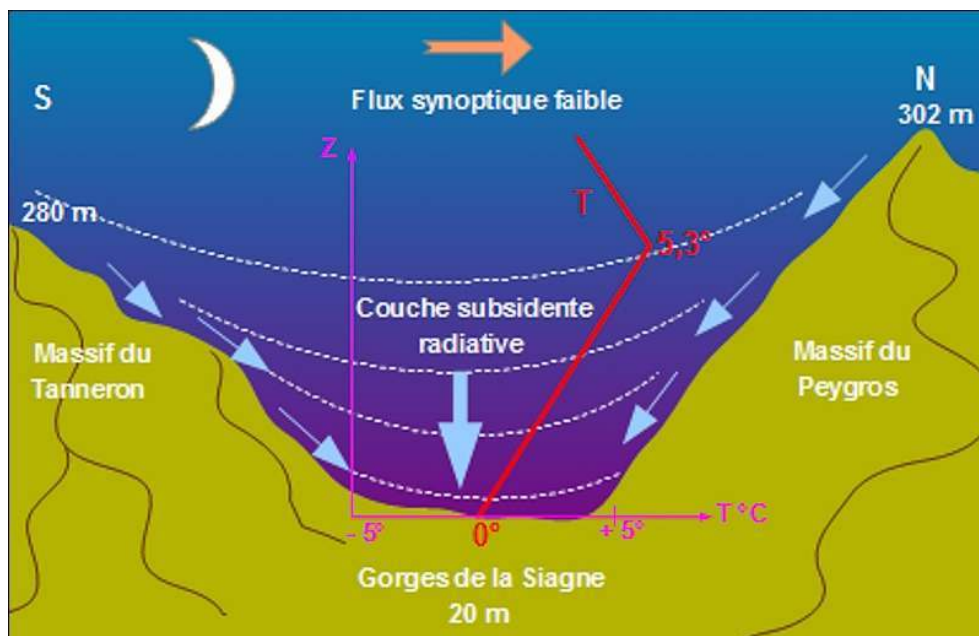
Les inversions de température

- 6 Une inversion de température correspond au contraire de la décroissance de la température avec l'altitude.

Les mécanismes d'une inversion de rayonnement

- 7 La nuit, le sol perd de son énergie par rayonnement infrarouge et l'air sus-jacent se refroidit par conduction. Le refroidissement gagne progressivement la couche d'air près du sol. Il s'agit du mécanisme d'inversion thermique de rayonnement. La température de l'air augmente donc avec l'altitude. La topographie renforce ce phénomène météorologique. En effet, l'air froid situé près du sol, qui est plus dense et donc plus lourd, s'écoule par gravité le long des pentes et s'accumule dans les talwegs et autres points bas (cuvettes, ravins, vallées). En conséquence, l'air chaud, plus léger, se retrouve au-dessus d'une nappe d'air froid (illustration 1). Ces inversions thermiques sont la règle la nuit, dès que le ciel est clair et que le vent est calme. Elles mettent plus de temps à se dissiper l'hiver, voire se maintiennent, car les jours sont courts et le soleil est bas à l'horizon.

Illustration 1 - Coupe d'une masse d'air nocturne qui se stratifie par densité et constitution d'une inversion thermique, par temps radiatif en relief encaissé, à Auribeau-sur-Siagne (arrière-pays cannois)



Températures mesurées le 02/02/2011 à 07h30 : 5,3°C au sommet de l'inversion et 0°C à la base, l'inversion a une épaisseur de 145 m. de hauteur. L'air refroidi au contact du sol descend les pentes par gravité (petites flèches bleues).

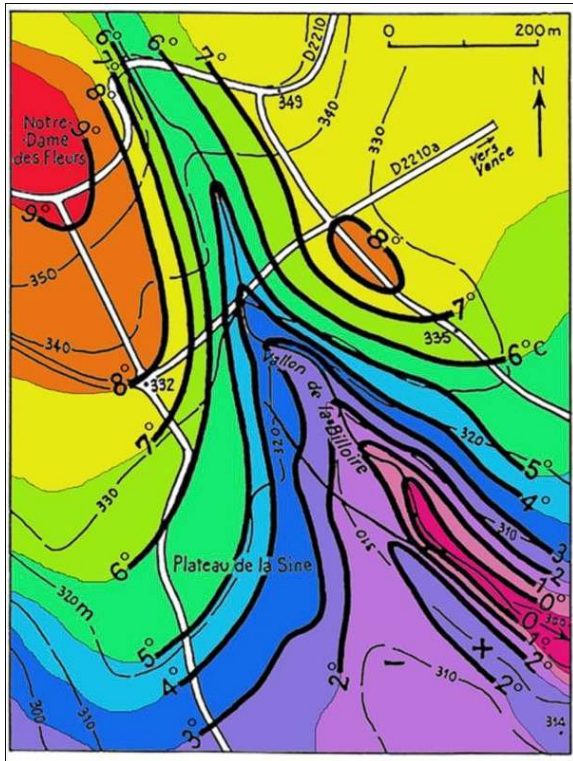
Auteur : N. Michelot.

- 8 Toutefois, par ciel couvert, l'effet de serre diminue sensiblement ce refroidissement, et l'inversion ne se crée pas, ou mal. De même, si le vent souffle, il exerce un brassage de l'air qui homogénéise les températures et empêche toute stratification thermique par densité, empêchant ainsi l'inversion de se créer.

Quelles sont les conséquences sur la pollution de l'air de la constitution de lacs d'air froid piégés par les inversions thermiques ?

- 9 Une inversion thermique de rayonnement est redoutable, localement, tant en ce qui concerne la distribution spatiale des températures (illustration 2), que pour la qualité de l'air notamment le matin en saison froide quand les chauffages et le trafic routier connaissent un pic, surtout dans les vallées encaissées et mal ventilées (Carrega, 2000). En effet, un lac d'air froid maintient les polluants atmosphériques (entre autres : PM, NOx, CO, HAP, COV¹, etc.) près du sol par stratification thermique au sein de la masse d'air, et leur laisse comme seule possibilité la dilution dans un volume d'air limité (Michelot, 2014) comme le montre l'illustration 3.

Illustration 2 - Température de l'air (2 m au-dessus du sol) près de Vence (Alpes-Maritimes), le 29/01/1992 à 2h00 du matin



Ces mesures instantanées montrent une inversion thermique nocturne de 10° C sur moins de 50 m de dénivellation, durant une nuit claire. L'air froid s'est accumulé dans un vallon et sur le plateau de la Sine (en bas) où il peut stagner.

Source : Carrega P., 1994.

Illustration 3 - Inversion thermique par rayonnement, environs de Saint-Paul de Vence, vue vers l'ouest, le 10/11/2004 à 09h15



L'air chaud situé au-dessus bloque la diffusion des fumées. Ces dernières stagnent et s'étalent horizontalement dans le lac d'air froid immobile.

Auteur : P. Carrega.

- 10 Les inversions thermiques ont donc des conséquences importantes sur la qualité de l'air car elles stabilisent l'air, éliminent les mouvements ascensionnels, et annihilent toute turbulence, le vent horizontal étant pratiquement nul. Il en résulte que les polluants stagnent et s'accumulent au lieu d'émission (De Moor, 2006) car ils ne peuvent pas se disperser, voire sont recyclés tant que le temps est radiatif et calme. Ce phénomène augmente la pollution de l'air (même lorsque les émissions demeurent limitées) et peut concerner de large étendues (illustration 4), et en particulier les vallées alpines (illustration 5).

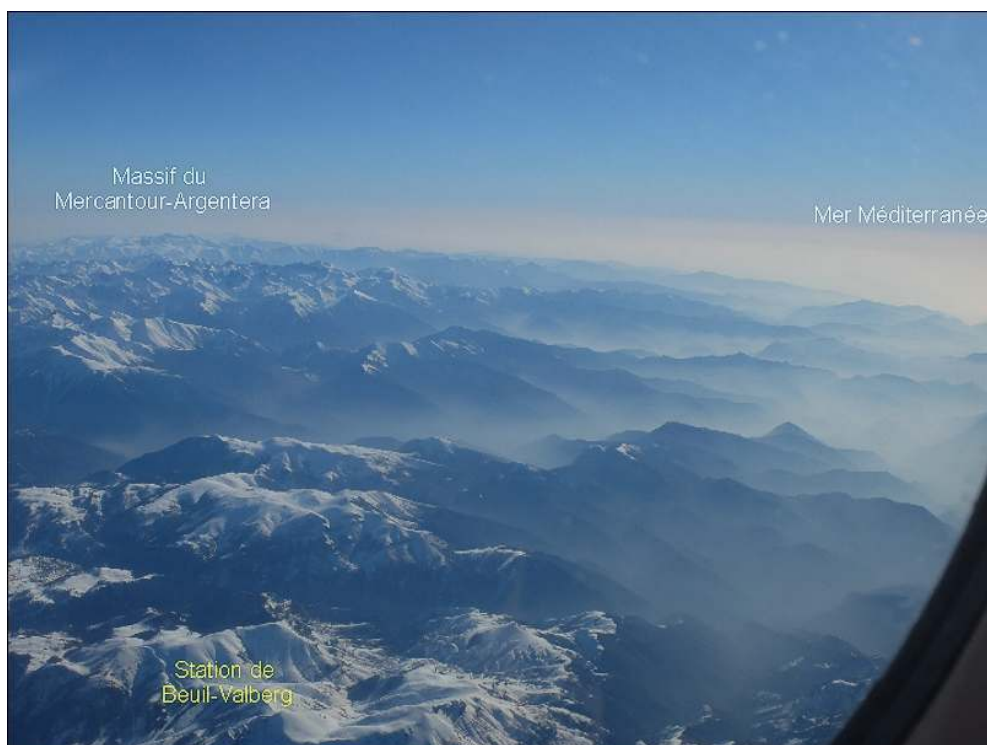
Illustration 4 - Inversions thermiques par rayonnement sur le sud-ouest des Alpes-Maritimes



Le plafonnement des fumées de brûlages atteste des niveaux d'inversions situés à environ 200-300 m. d'altitude selon l'endroit, au-dessus des plans provençaux. Cliché pris vers le nord-ouest en fin d'après-midi du 06/12/2012.

Auteur : P. Carrega.

Illustration 5 - Inversions thermiques dans les premières vallées alpines azuréennes

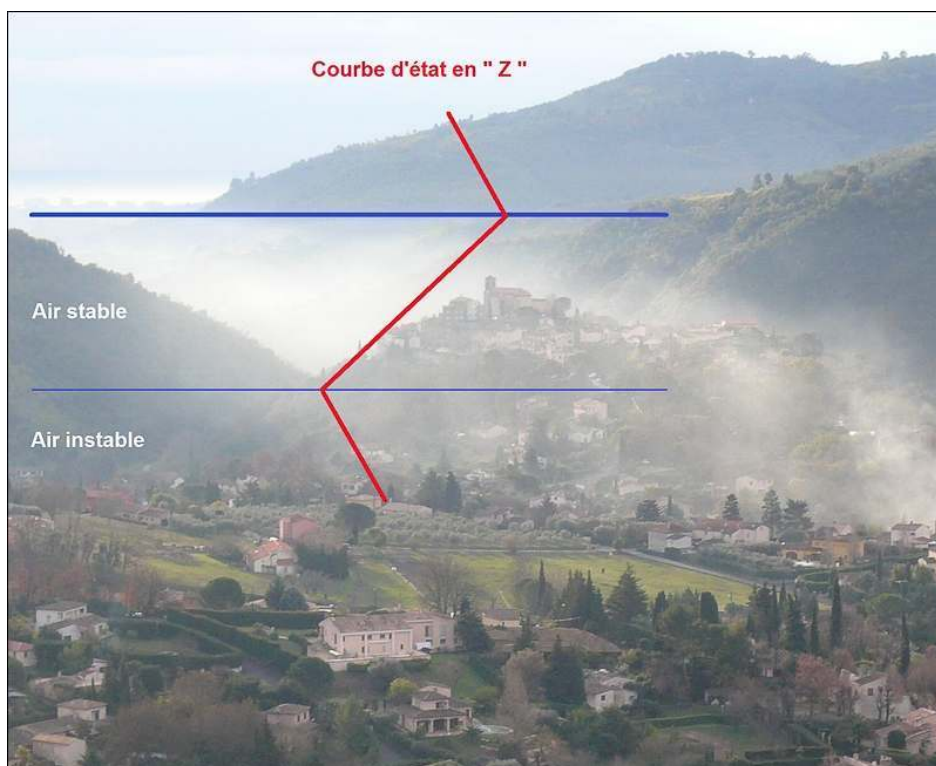


Lors d'un épisode de pollution aux particules d'échelle régionale les polluants sont bloqués dans les basses couches. Vue vers le sud-est à 10h00 le 12/03/2014.

Auteur : P. Carrega.

- 11 Au fur et à mesure de la matinée, le sol se réchauffe sous l'effet de l'irradiation solaire. La convection et les turbulences se mettent peu à peu en place au-dessus du sol, et gagnent les couches sus-jacentes, ce qui provoque un réchauffement de l'air ambiant rompant la stabilité mise en place au cours de la nuit. Cette phase de transition correspond à l'érosion par la base, de la stabilité ou de l'inversion installée la veille, puis au développement de la couche limite atmosphérique (CLA). C'est un moment critique pour la pollution car le brassage de l'air (et des polluants) est intense, puisque l'air près du sol est réchauffé et devient instable sur quelques mètres, puis dizaines de mètres. Mais l'air, réchauffé par la base, qui entreprend son ascension se retrouve vite bloqué par l'air plus chaud rémanent situé à la limite de l'inversion résiduelle, qui se comporte ainsi comme une coiffe chaude empêchant toute velléité d'élévation des particules d'air. Cela donne une structure thermique dite en « z » (illustration 6) qui provoque généralement, du fait de la turbulence thermique au sein de la mince couche réchauffée, une pollution et/ou un enfumage généralisés depuis la surface jusqu'au à la base réhaussée de l'inversion en transformation.

Illustration 6 - Structure thermique en « Z », vue vers le sud-sud-est, le 31/01/2011 à 09h00



Cette structure thermique brasse les polluants dans une couche d'air devenue instable en surface (couche convective). Les villes d'Auribeau-sur-Siagne (au premier plan) et Pégomas (dans le nuage opaque) sont enfumées par des brûlages sous l'effet d'une inversion de température (la discontinuité thermique supérieure se situe vers 100 m. d'altitude). Elle commence à se rompre par la base, où il y a une forte turbulence de l'air par effet de réchauffement du sol qui fait naître des cellules convectives sur les premiers mètres de hauteur.

Auteur : N. Michelot.

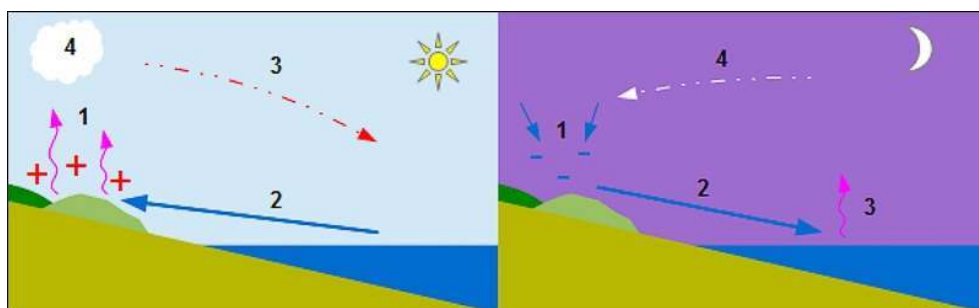
Les brises thermiques

- 12 Le rôle des brises thermiques a été étudié dans les Alpes-Maritimes, notamment dans le cadre de travaux sur la pollution de l'air (Carrega, 1994, 2009 ; Carrega et al., 2010 ; Michelot et Carrega, 2012b ; Michelot, 2014).

Le mécanisme de formation des brises

- 13 Lorsque les températures de surfaces voisines (terre-mer, vallée-montagne, ville-campagne, etc.) sont contrastées (ainsi que celles de l'air à leur contact) à l'échelle intra-quotidienne, le gradient thermique résultant engendre un gradient de pression. L'air au-dessus d'un sol chauffé devient moins dense, s'élève, ce qui fait baisser la pression atmosphérique à cet endroit. Inversement, l'air froid plus lourd se tasse, et sa pression s'accroît. L'écart de pression de l'ordre de quelques hecto-Pascals (hPa) existant au même moment au-dessus de deux substrats thermiquement contrastés provoque un flux compensatoire : la brise, dont le mécanisme est figuré en illustration 7. Elle est définie comme un vent alternant journalier d'origine thermique. Sa vitesse et sa direction changent entre le jour et la nuit.

Illustration 7 - Formation d'une brise de mer/terre



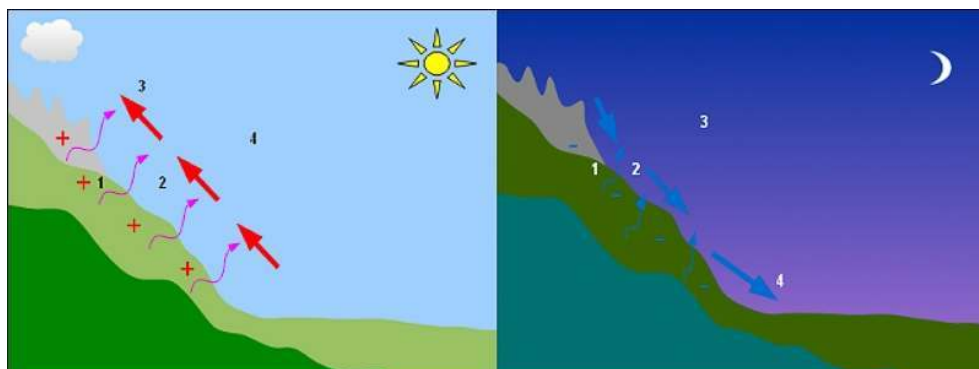
À gauche, la brise de mer : le jour, l'air sur terre chauffe plus vite qu'en mer ; plus léger, il s'élève par convection, ce qui crée une baisse relative de pression au-dessus du sol (1). Un appel d'air frais s'établit de la mer vers la terre afin de combler ce différentiel de pression en surface (2). Parfois, un flux de retour de brise réel d'altitude (rare) ou un flux synoptique² équilibre le système (3). Les plus fortes ascendances font apparaître des cumulus dès la mi-journée (4). À droite, la brise de terre : le schéma s'inverse pendant la nuit, où l'air au-dessus de la terre, qui rayonne dans l'infrarouge, se refroidit plus vite qu'en mer et il se tasse (1). Une brise souffle alors dans le sens contraire (2) pour compenser le différentiel de pression entre les deux surfaces. En effet, la mer relativement plus chaude que son environnement (donc moindre pression) réchauffe l'air à son contact qui s'élève (3). De même qu'en journée, un mouvement d'air peut s'opérer (en théorie) au-dessus du flux thermique nocturne pour conserver la masse (4), mais n'est pas nécessairement présent non plus.

Auteur : N. Michelot.

- 14 Pour que les brises puissent s'établir, deux conditions sont nécessaires :
- un ciel clair ou peu nuageux afin que les différences de températures soient exacerbées ;
 - un vent synoptique suffisamment faible pour laisser s'exprimer ces brises³, et ne pas gommer leurs effets (les périodes anticycloniques et les marais barométriques sont donc favorables).
- 15 À plus fine échelle (illustration 8), durant les premières heures du jour, le réchauffement plus marqué des versants, de par leur orientation et inclinaison par rapport au fond de vallée, provoque des mouvements ascendants (brises anabatiques). Ce mouvement

s'inverse durant les premières heures de la nuit. Alors que les versants se refroidissent plus rapidement, de petites saccades liées à l'irrégularité topographique des lieux descendent les pentes (brises catabatiques).

Illustration 8 – Formations de brises sur les versants

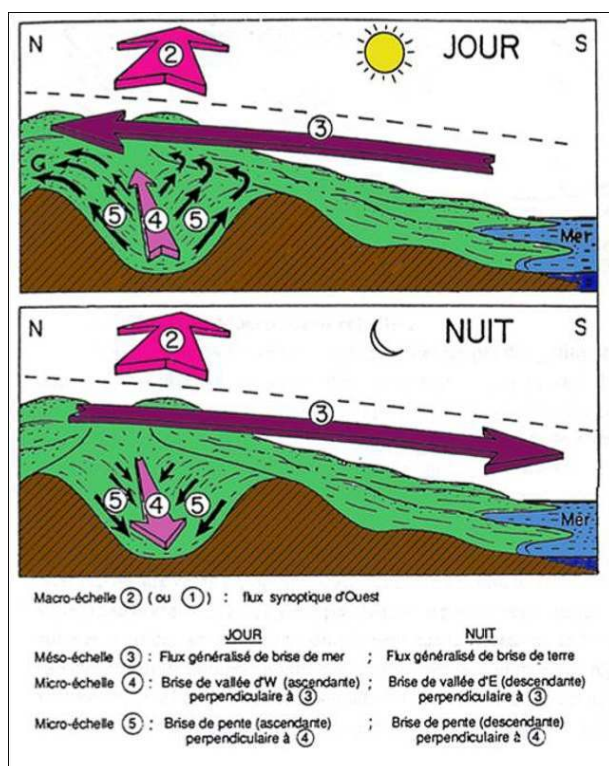


À gauche, brise ascendante : en journée, le soleil chauffe le versant du relief (1) qui réchauffe l'air à son contact (2) à la différence de l'air plus éloigné qui demeure relativement plus frais (4). Ainsi, l'air en contact avec le versant, plus léger, remonte la pente (3). À droite, brise descendante : la nuit le schéma inverse se produit, à savoir que le versant du relief se refroidit par rayonnement infrarouge (1), qui refroidit l'air par conduction (2), contrairement à l'air éloigné qui reste relativement plus chaud (3). Par conséquent, l'air devenu plus froid (et plus lourd) en contact avec le versant dévale la pente (4).

Auteur : N. Michelot.

- 16 Ces écoulements nocturnes et diurnes sont généralement relayés par des écoulements à une échelle plus large : les brises de montagne ou de vallée. L'ensemble de l'organisation de ces brises se résume au travers de l'illustration 9.

Illustration 9 - . Organisation des vents thermiques et synoptiques dans un espace littoral montagneux



Source : Carrega, 1989.

Quelles sont les conséquences des brises thermiques sur la pollution de l'air ?

- 17 Une brise thermique peut être bénéfique comme néfaste pour la qualité de l'air, notamment si l'on se trouve sous le vent d'un émissaire comme l'atteste le cliché ci-après (illustration 10).
- 18 Si les émissions de polluants primaires sont pour partie responsables de la pollution de l'air, ce sont les variations locales des écoulements d'air qui, de manière prépondérante en relief montagneux, par leur épaisseur, leur force et direction, plus ou moins contraints par la topographie (illustration 10), expliquent l'hétérogénéité spatio-temporelle des concentrations de polluants comme l'ont démontré Carrega (2009), et Michelot et Carrega (2012b).

Illustration 10 - Dispersion d'un panache de fumées, Auribeau-Village, le 01/02/2011, à 07h45. Vue vers l'est

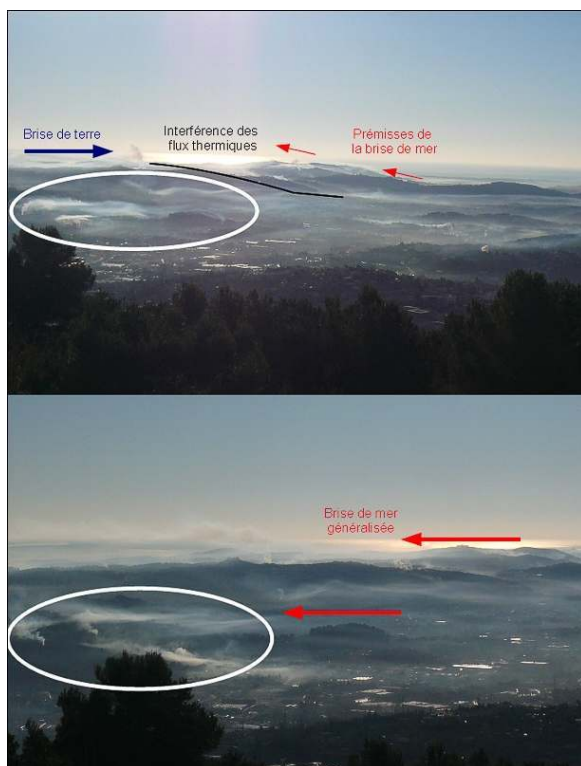


Le panache de fumées se disperse dans le lit de la brise d'amont (terre-montagne) orientée au nord et canalisée par la topographie en sortie des gorges de la Siagne, dans un air stable (le littoral est au sud, à droite).

Auteur : N. Michelot.

- 19 Globalement, l'alternance des brises fait que les polluants sont transportés dans un sens puis dans l'autre, favorisant d'une part le recyclage, et occasionnant d'autre part le survol de populations par des masses d'air polluées exogènes (illustration 11). En effet, aux premières heures du matin sous l'effet de la brise de terre, un transport de polluants émis en amont vient s'ajouter à ceux émis dans la zone urbaine dense du littoral, en particulier au moment du pic matinal quand l'air est stable et que la CLA est encore mince. Cela occasionne une augmentation des concentrations.

Illustration 11 – Alternance des directions des brises et des panaches de fumées de brûlages de déchets verts sur l'agglomération de Grasse le 03/02/2011. Vue vers le sud-est



Ces clichés pris à quelques dizaines de minutes d'intervalle montrent l'alternance des directions des brises et des panaches de fumées de brûlages de déchets verts sur l'agglomération de Grasse le 03/02/2011. Vue vers le sud-est. En haut : vers 10h00, interférence brise de terre-mer. En bas : vers 10h30, brise de mer généralisée. Le transport des polluants s'effectue dans un sens puis dans l'autre selon la direction du flux. Directions des flèches indicatives.

Auteur : N. Michelot.

Conclusion

- 20 Tout d'abord, ces images permettent de retenir que l'air froid par sa densité maintient les polluants à proximité du sol. En d'autres termes, compte-tenu de sa stabilité, l'air froid empêche toute velléité d'ascension des particules d'air et donc toute possibilité de dispersion des polluants en altitude. Par conséquent, les concentrations de polluants augmentent, compte-tenu du faible volume d'air disponible, qui plus est dans les creux topographiques sujets à des inversions de températures généralement marquées.
- 21 Ensuite, les brises thermiques révèlent leur influence sur la distribution spatio-temporelle de la pollution de l'air dans l'espace compris entre le littoral très peuplé et les montagnes. Ces flux d'air alternés transportent dans un sens puis dans l'autre les polluants rencontrés.
- 22 Finalement, l'ensemble de ces images prouve que les topoclimats jouent clairement un rôle sur la variabilité spatiale et temporelle de la pollution atmosphérique. Néanmoins, les brises et inversions thermiques s'affranchissent d'une responsabilité centrale du fait du caractère multi-causal de la pollution de l'air (Michelot et Carrega, 2012a).

BIBLIOGRAPHY

- Carrega P., 1989. Vent et échelles de contraintes géographiques : exemples en région niçoise. *Publications de l'A.I.C.* Vol. 2, p. 83-88.
- Carrega P., 1994. Topoclimatologie et habitat. *Revue d'Analyse Spatiale*, Nice, n° 35 et 36. 408 p. (Thèse d'Etat).
- Carrega P., 2000. Contes (Alpes-Maritimes françaises) : une vallée continentale et mal ventilée bien que proche de la mer. *Publications de l'A.I.C.* Vol. 12, p. 34-42.
- Carrega P., 2005. *La topoclimatologie : pourquoi le climat varie-t-il sur de très courtes distances ?* <http://www.meteosudest.org/Pierre/PCMeteosudest-topoclim.ppt>
- Carrega P., 2008. Le vent : importance, mesures, modélisation et tribulations. *N° spécial Climatologie-Topoclimatologie. Bull. Soc. Géogr. Liège*, n° 51, p. 17-29.
- Carrega P., 2009. *Écoulements d'air à faible altitude au-dessus du bassin du Paillon*. Rapport n° 2, Université de Nice, Equipe GVE, UMR 6012 ESPACE/CNRS, 22 p.
- Carrega P., Martin N., Yohia Ch., 2010. Ozone et flux d'air dans l'arrière-pays niçois : mesures et modélisation à fine échelle spatiale durant un épisode estival (le 10 août 2006). *Pollution atmosphérique*, n° 207, p. 297-313.
- De Moor G., 2006. *Couche limite atmosphérique et turbulence, les bases de la micrométéorologie dynamique*. Cours et manuels n° 16 de Météo-France, ENM, 401 p.
- Michelot N., Carrega P., 2012a. Le rôle des inversions et des brises thermiques sur la variabilité temporelle des particules à Auribeau-sur-Siagne (Alpes-Maritimes) : description et interprétation des mesures fixes. *Actes des Journées de climatologie de Liège (Belgique)*, Commission Climat et Société du CNFG, p. 21-30.
- Michelot N., Carrega P., 2012b. Le rôle des brises thermiques sur la variabilité spatio-temporelle des PM₁₀ en pays vençois (Alpes-Maritimes, France). *Actes du 25^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Grenoble 2012, p. 535-540.
- Michelot N., 2014. *L'influence des topoclimats sur la pollution de l'air aux particules dans le sud-ouest des Alpes-Maritimes*. Thèse de Doctorat, Université de Nice Sophia-Antipolis, 416 p.

NOTES

1. PM (particulate matter) : particules ; NO_x : oxydes d'azote ; CO : monoxyde de carbone ; HAP ; hydrocarbures aromatiques polycycliques ; COV : composés organiques volatils.
2. Carrega (1994) et Michelot (2014) ont montré à l'aide de mesures de ballons à niveau de pression constant (dits CLB pour Constant Level Balloon) et de sondages verticaux, qu'en réalité, et le plus souvent, il existait une imbrication et une superposition des flux thermiques et synoptiques. Ces derniers étant fonction du gradient et de la position isobarique. Toutefois, un flux synoptique, même lent, peut parfaitement contribuer à équilibrer le système en « fournissant » de l'air, même s'il n'est pas exactement en sens inverse du flux d'en dessous. Finalement, Carrega (2008) rappelle grâce à ses travaux de terrain que « les retours de brise [sont]

désespérément absents » et qu'il convient plutôt de « croire que la masse est conservée par des apports latéraux et subsidents issus du flux synoptique ».

3. Le vent synoptique peut également renforcer la brise, se superposer à elle, ou encore s'y opposer.

ABSTRACTS

Considering the calm and radiative weather who usually characterizes the Alpes-Maritimes, this coastal mountainous area is subject to breezes and thermal inversions, wich are the mains forms of topoclimates in this region. Shoreline urban area contributes mostly to air pollutant emissions. Under these conditions, pictures are able to explain the mechanisms and consequences of these topoclimates on the spatio-temporal variability of air pollution.

Compte-tenu du type de temps calme et radiatif qui règne généralement sur les Alpes-Maritimes, cet espace littoral montagneux est soumis au jeu des brises et inversions thermiques, qui sont les principales formes d'expression des topoclimats dans cette région. L'aire urbaine côtière contribue en majorité aux émissions de polluants atmosphériques. Dans ces conditions, la photographie a la faculté d'expliquer concrètement les mécanismes et conséquences de ces topoclimats sur la variabilité spatio-temporelle de la pollution de l'air.

INDEX

Mots-clés: topoclimatologie, brise, inversion, écoulement d'air, pollution atmosphérique

Keywords: topoclimatology, breezes, inversions, air flows, atmospheric pollution

AUTHORS

NICOLAS MICHELOT

Nicolas Michelot, nicolas.michelot@developpement-durable.gouv.fr, Docteur de l'UMR ESPACE CNRS, équipe "Gestion et Valorisation de l'Environnement", est chargé de mission qualité de l'air, au sein du bureau de la qualité, Direction générale de l'énergie et du climat, Ministère de l'écologie.

PIERRE CARREGA

Pierre Carrega, pierre.carrega@unice.fr, est Professeur à l'Université de Nice Sophia-Antipolis, Responsable de l'équipe "Gestion et Valorisation de l'Environnement" - UMR ESPACE CNRS, Directeur du Master "Climat, Risques, Environnement, Santé" (CRES).