

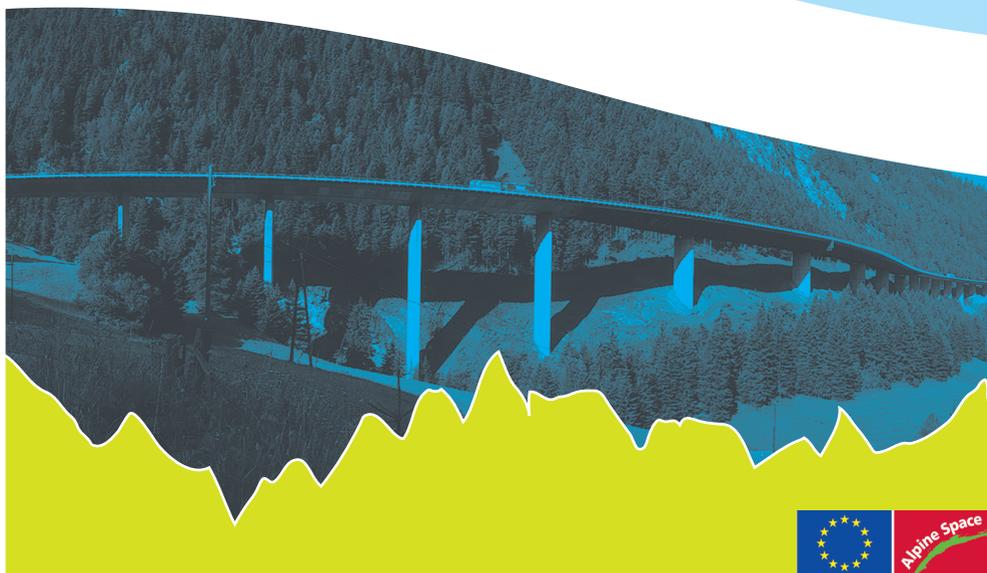


ALPNAP

Vivre à proximité des axes de transit - Pollution atmosphérique, bruit et santé dans les Alpes

ALPNAP

Consortium du projet



Interreg III B

ALPNAP Equipe de pilotage du projet

D. Heimann, M. Clemente, X. Olny, J. Defrance, P. Suppan, S. Trini Castelli, P. Lercher, U. Uhrner, D. Zardi, P. Seibert, F. Obleitner

Equipe editoriale

D. Heimann, M. de Franceschi, S. Emeis, P. Lercher, P. Seibert

La reproduction partielle ou totale du contenu est autorisée sous réserve de citer la source comme suit:

Heimann D., de Franceschi M., Emeis S., Lercher P., Seibert P. (Eds.), 2007: Vivre à proximité des axes de transit – Pollution atmosphérique, bruit et santé dans les Alpes. ALPNAP brochure. Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Trento, l'Italie, 20 pp.

Traduit de l'anglais par X. Olny, J. Defrance, M. Baulac.

La photo utilisée pour la couverture a été reproduite avec l'aimable autorisation de ASFINAG.

Conception de la couverture: Grafikbüro L, design@grafikbuero-L.at

Imprimé en Italie par Grafiche Futura s.r.l.

Università degli Studi di Trento
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Trento, décembre 2007

Avant-propos

Ce document est le fruit du travail mené par le consortium du projet ALPNAP, un groupement de onze partenaires originaires d'Autriche, d'Allemagne, d'Italie et de France. Ce projet, d'une durée de trois ans (2005-2007), a été cofinancé par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER) dans le cadre du Programme Interreg IIIB Espace Alpin. Les objectifs d'ALPNAP étaient de faire l'inventaire et d'explicitier les méthodes scientifiques les plus avancées capables de mesurer et de prévoir la pollution atmosphérique et les nuisances sonores le long des couloirs de transport transalpins, et d'évaluer l'impact de nouvelles infrastructures de transport (routières et ferroviaires) dès leur phase d'avant-projet, ou de définir les mesures administratives ou technologique de réduction des impacts visant à combattre le non-respect des seuils réglementaires de bruit et de pollution de l'air. Les résultats du projet sont publiés dans un rapport détaillé destiné aux experts des administrations en charge des transports et de l'environnement.

Ce guide s'adresse aux habitants des Alpes concernés par les nuisances environnementales dans leur voisinage immédiat. Il décrit comment pollution de l'air et bruit sont générés. Puis il rappelle en détail comment les polluants atmosphériques sont transportés et comment le bruit se propage en fonction de la situation météorologique, c'est-à-dire du temps qu'il fait. Ce document s'arrête notamment sur les spécificités de la topographie alpine et sur les différences par rapport à un terrain plat. Finalement, ce guide récapitule les possibilités offertes par les outils à la pointe de la recherche développés dans les laboratoires d'Universités et les Centres de Recherche et dédiés à la prévision des concentrations de pollution atmosphérique ou des niveaux de bruit, et leurs impacts relatifs à de futurs scénarios de trafic.



Les Alpes : espace de vie, lieu de détente et territoire de transit

Les Alpes constituent l'une des plus importantes réserves naturelles d'Europe. Elles sont aussi un espace de vie pour 13 millions de citoyens, soit environ 2 pourcents de la population européenne. Avec 68 habitants par km², la densité de la population alpine est du même ordre que la densité moyenne de population en Europe. Dans le même temps, l'Arc alpin, long de 950 km et large de 250 km, représente une barrière naturelle qui sépare les principaux centres économiques et grandes agglomérations en Europe (Italie-France, Italie-Allemagne, Slovénie-République Tchèque). Les montagnes sont aussi une barrière entre différentes zones résidentielles à l'intérieur même de l'Arc. De plus, la beauté naturelle des sites et la présence de stations de sports de montagne attirent un grand nombre de touristes.

Le trafic local, le trafic en provenance et à destination des régions touristiques situées à l'intérieur des Alpes ainsi que le trafic de transit à travers l'Arc représentent un flux total considérable de véhicules. Le libre commerce à travers l'Union Européenne est en constante augmentation et suscite une forte demande au niveau du transport de marchandises à travers les Alpes. Ceci entraîne un accroissement du volume de transport de fret le long des axes alpins de transit. Entre 1980 et 2005, le volume total de transport de transit a plus que doublé pour atteindre aujourd'hui le chiffre de 193 millions de tonnes.

Cette augmentation du volume des transports a fait de la pollution atmosphérique et du bruit un problème grandissant dans les Alpes, et des solutions sont nécessaires et de façon ur-



Fig. 1 Une belle vallée est traversée par l'autoroute de transit du Brenner. Le viaduc enjambe une partie du village de Steinach/Tyrol.



Fig. 2 Un long train de fret gravit les voies pentues en direction de la frontière Austro-italienne. Il transporte des containers et des remorques, symbolisant ainsi le transport intermodal moderne.

gente. En comparaison de zones plutôt plates, typiquement des plaines, le poids environnemental dans les régions montagneuses est très important.

Les écosystèmes des régions alpines sont très sensibles, en particulier dans les parties les plus élevées où ils sont exposés, en plus, aux contraintes climatiques. Les forêts alpines ont un important rôle protecteur contre les avalanches et les glissements de terrain. La pollution de l'air a ainsi des conséquences négatives plus sensibles qu'à l'extérieur des zones montagneuses. La pollution atmosphérique, tout autant que les nuisances sonores, vont à l'encontre des attentes des touristes et compromet le développement de lieux de détente.

En outre, la plupart des villes et villages alpins se concentrent le long des vallées, en particulier celles accueillant les principaux axes routiers et ferroviaires. Ainsi, une grande proportion des habitants des Alpes vit dans le proche voisinage des couloirs de transports transalpins, et est donc exposée aux effets environnementaux défavorables du trafic de transit avec des conséquences négatives sur sa santé et son bien-être.

Les politiques de transport durable ont besoin d'un soutien scientifique

Alors que le volume des transports continue d'augmenter, les conflits entre intérêts économiques et intérêts écologiques risquent de s'aggraver. Et bien que des mesures ciblées soient prises, les seuils légaux admissibles de qualité de l'air et de bruit seront de plus en plus fréquemment dépassés et une nouvelle infrastructure de transport pourra causer de nouvelles nuisances environnementales dans des régions exemptes auparavant.

Le soutien d'experts spécialistes de la pollution de l'air, du bruit et des effets sanitaires associés, ainsi que l'utilisation d'outils scientifiques, sont indispensables à la fourniture d'une base de connaissances solide pour des décisions administratives et politiques en faveur d'un équilibre durable entre mobilité, économie, conservation de la nature, protection de l'environnement, santé publique et qualité de vie.

De nouvelles infrastructures entraîneront un changement dans les émissions et modifieront ainsi l'impact environnemental. Des effets significatifs sont attendus des nouveaux tunnels ferroviaires en construction, ou planifiés. Il en est de même de mesures administratives (comme par exemple l'interdiction des poids-lourds la nuit) et d'incitations au changement modal ou à la co-modalité du transport de fret. L'extension des routes à péage et l'introduction d'un système commercial de droits de transit transalpin sont d'autres instruments qui sont en cours de discussion. De tels moyens peuvent entraîner une amélioration de la situation, mais peuvent tout aussi bien produire des effets contradictoires, ou créer de nouvelles sources de bruit alors que la pollution atmosphérique est de son côté réduite.

Une avancée vers un dialogue entre chercheurs et administrations

Auparavant, il n'y avait pas de coopération systématique et large au travers des Alpes entre experts, et le dialogue entre chercheurs et administrations n'était pas très développé. Le projet ALPNAP (« Contrôle et minimisation de la pollution atmosphérique et des nuisances sonores engendrées par le trafic routier et ferroviaire le long des principaux axes de transport dans les Alpes »), dont les partenaires sont issus d'Universités et de Centres de Recherche, a été élaboré de façon à pallier cette insuffisance.

ALPNAP avait pour objectif de décrire les processus spécifiques aux Alpes qui déterminent la qualité de l'air et le bruit dans les vallées, et de rassembler les outils scientifiques avancés et méthodes d'évaluation capables de mesurer et de prévoir la pollution atmosphérique et le bruit, ainsi que leur impact sur la santé. Ces outils et méthodes ont été appliqués à des régions et des situations précises dans le but de démontrer leur capacité et leur pertinence à appréhender la complexité des processus en œuvre dans les Alpes. Finalement, une série de

recommandations à l'attention des autorités et des consultants a été élaborée dans le but d'expliciter comment au mieux évaluer l'impact environnementale de mesures administratives, d'incitations et de nouvelles infrastructures, et ceci en considérant correctement la complexité des processus naturels dans les Alpes.

La valeur ajoutée d'ALPNAP a été accrue par une coopération coordonnée avec le projet MONITRAF (« Contrôle des effets dus au trafic routier et mesures communes »), un réseau d'administrations régionales en charge du transport et de l'environnement dans les Alpes. Les objectifs de MONITRAF étaient de développer des mesures complètes visant à réduire les effets négatifs du trafic routier, tout en augmentant la qualité de vie à l'intérieur de l'espace alpin.

Emissions de polluants et émissions sonores

Le terme *émission* s'applique à l'expulsion de polluants atmosphériques gazeux ou particuliers ainsi qu'au bruit, et ce pour diverses sources. La plupart des polluants atmosphériques sont émis par des processus de combustion tel que le chauffage domestique, les unités de production industrielle depuis l'entreprise de petite taille jusqu'à la centrale électrique de grande envergure, et la mise en service de tous types de véhicule motorisé de transport, à l'exception de trains électriques. Les particules ultrafines peuvent aussi être émises par processus d'abrasion et de frottement, par exemple lors du freinage, ou sont soulevées de la surface de la route (comme des poussières) lors du passage des véhicules. Le bruit est émis par les moteurs et les pots d'échappement (bruit de propulsion des véhicules routiers motorisés, de motrices ferroviaire diesel, d'avions), ainsi que par l'interaction entre les roues / les pneus et les rails / la route (bruit de roulement) ou le bruit de frottement de l'air pour les moyens de transport très rapides (bruit aérodynamique des trains à grande vitesse et des avions). Le bruit peut aussi être émis par les industries, les activités liées à la construction ou les activités agricoles. En outre, certaines activités humaines telles que la tonte de pelouse, l'artisanat, le sport ou les événements musicaux produisent des nuisances sonores. Enfin, les animaux domestiques, d'élevage ou sauvages sont aussi à l'origine de bruits.



Fig. 3 Une caravane sans fin de poids-lourds traverse l'Europabrücke autrichien en fin d'après-midi automnal. Le viaduc fait partie du couloir du Brenner, reliant le sud de l'Allemagne au nord de l'Italie

Le trafic routier produit des émissions à la fois atmosphériques et sonores. En région montagneuse, l'émission est déterminée par des facteurs supplémentaires par rapport au cas du terrain plat. Les routes en pente jouent un rôle important. Conduire en montée avec des camions chargés au maximum entraîne des émissions supérieures à celles de routes sans pente. Ainsi, l'émission d'oxydes d'azote (NO_x) le long d'un segment de route incliné à 5 pourcents est double par rapport au cas de la route non inclinée. L'émission sonore des poids lourds n'est pas augmentée uniquement dans les pentes ascendantes, mais aussi en descente en régime de frein-moteur. Le bruit de roulement quant à lui dépend fortement de

l'état de surface du revêtement routier : irrégulières ou mouillées, les routes sont davantage bruyantes qu'homogènes ou couvertes de neige. Pour ce qui est du train, le bruit de roulement dépend essentiellement des conditions de surface des roues et de la partie supérieure des rails. Les vieux wagons de fret avec frein à patin favorisent la rugosité des surfaces en contact et émettent ainsi plus de bruit.

Les viaducs (Fig. 3) et les tunnels sont des éléments typiques des routes de montagne. Ils présentent un effet positif net dû au fait qu'ils réduisent les distances de conduite entre destinations et aident à éviter l'utilisation de routes à fortes pentes. Les émissions qui proviennent de ponts en hauteur sont davantage dispersées avant d'atteindre les zones habitées par rapport au cas de routes très proches sans élévation. D'un autre côté, on doit considérer le fait que les échappements émis dans un tunnel doivent en être extraits par les bouches d'entrée et/ou par des tuyères d'extraction appropriées. En tous les cas, les émissions aériennes d'un tunnel se répandent dans l'atmosphère en un point précis avec une forte concentration associée.



Fig. 4 Trois locomotives électriques, deux en traction et une en propulsion, sont nécessaires pour mettre en branle les wagons de ce train de fret engagé dans une forte pente ascendante en direction du passage Brenner aux environs du village de St. Jodok/Tyrol.

Les voies ferrées dans les Alpes sont presque toutes électrifiées si bien qu'il y a peu d'impact en termes de polluants atmosphériques dû à ces axes. Cependant, les trains restent une source de bruit notable, et notamment dans les régions montagneuses où leur émission sonore peut être amplifiée (Fig. 4).

La distribution spatiale des sources émettrices est en outre influencée par la topographie des Alpes. Les principales voies routières et ferroviaires se trouvent dans les vallées, là où la grande majorité des habitations se situent. Ainsi, la distance entre les sources de polluants et de bruit, et les zones de logement est bien plus petite dans l'environnement alpin que dans des régions non montagneuses.

Météorologie alpine

Les montagnes telles que les Alpes constituent un des traits spécifiques de la surface terrestre. Ils culminent dans l'atmosphère et forment ainsi une barrière qui exerce une résistance sur la circulation à grande échelle des vents, et qui sont le résultat de systèmes de basses et hautes pressions. De tels courants aériens sont contraints soit de s'élever, soit de dévier à l'approche d'une montagne. Dans les vallées, l'air est souvent guidé et les vents suivent généralement l'axe de la vallée. Le frottement au sol entraîne des turbulences qui conduisent à un mélange des masses d'air et ainsi à un échange entre l'air proche du sol et l'air au-dessus. Le transport horizontal dû au vent moyen et à la turbulence constitue un mécanisme météorologique important d'évacuation des polluants de la région source et de limitation de leur concentration.

Sous certaines conditions, et du côté *sous le vent* des crêtes montagneuses, des vents descendants se développent. De tels phénomènes aérodynamiques sont connus sous le nom de « foehn » (Fig. 5). Ils peuvent être très turbulents avec de fortes bourrasques. Dans le cas de vents faibles tels qu'il s'en développe à proximité de zones de haute pression, un échange horizontal de l'air par le vent moyen et un mélange dû à la rugosité induite par la turbulence, n'est plus possible. Lors d'une journée peu nuageuse, le soleil chauffe par radiation le sol qui, à son tour, chauffe l'air adjacent. L'air réchauffé a alors tendance à s'élever en bulles (aussi appelés « thermiques ») et induit un mouvement compensatoire descendant. En outre, ce mécanisme conduit à un mélange et un échange vertical des masses d'air et de ses polluants en suspension.



Fig. 5 Les Alpes sont à l'origine de phénomènes météorologiques spécifiques tels que les ondes montagneuses observables via des nuages caractéristiques : les *altocumulus lenticularis*.

Un autre effet propre à la montagne concerne le bilan de radiation et le transfert de chaleur entre l'atmosphère et le sol, qui sont influencés par l'inclinaison de la pente et l'élévation des surfaces du terrain. Quand le ciel est dégagé et que le flux à grande échelle est faible, on observe des différentiels de réchauffement et refroidissement entre les couches d'air proches de la pente et l'air à la même altitude au-dessus des parties du sol de plus faible altitude. Le réchauffement et refroidissement différentiels sont les moteurs des systèmes de vent thermique qui change de direction deux fois par jour. L'air qui est refroidi sur les pentes latérales d'une vallée est plus dense (plus lourd) que l'air non refroidi au centre de la vallée. De même, l'air qui est chauffé au niveau des pentes latérales de la vallée est moins dense (plus léger) que l'air adjacent non chauffé. La différence de densité fait que l'air refroidi s'écoule le long de la pente alors que l'air chauffé s'élève le long de la pente. Cet effet n'apparaît pas uniquement entre les régions chauffées et refroidies d'un côté de la vallée, mais aussi, à une plus grande échelle, entre les montagnes et leurs contreforts.

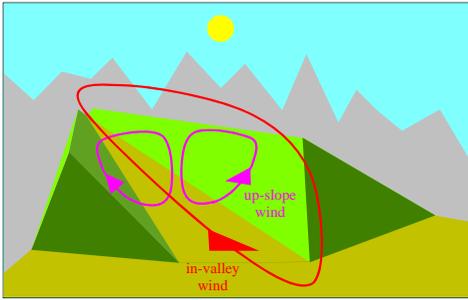


Fig. 6a Au début d'un après-midi ensoleillé, vent de pente ascendants (magenta) et courants de vallée (rouge) se développent bien.

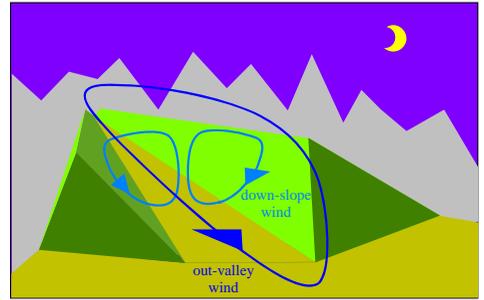


Fig. 6b Dans les dernières heures d'une nuit étoilée, des vents de pente descendants (bleu clair) s'installent en même temps qu'un flux sortant de la vallée (bleu foncé).

Ainsi, les vents thermiques dans les Alpes (Fig. 6) sont constitués de deux systèmes circulatoires, souvent superposés, et plus précisément les vents de pente et les vents montagne-plaine : (1) La circulation du vent de pente fait apparaître un vent ascendant pendant la journée et descendant durant la nuit. (2) La circulation de type montagne-plaine est décalée de quelques heures de telle sorte que le flux entrant dans la vallée s'établit en fin de matinée et persiste jusqu'en fin d'après-midi, alors que le flux sortant de la vallée démarre en fin de nuit et continue en matinée.

Si un vent faible se combine avec les effets d'une radiation solaire faible ou nulle, les échanges d'air restent limités, voire supprimés. C'est le cas à l'intérieur et à proximité de zones de haute pression pendant la nuit, ou quand le ciel est couvert. En particulier dans les cuvettes, l'air proche du sol est emprisonné entre les chaînes montagneuses environnantes. Il stagne alors et son échange horizontal reste limité. Cette situation peut s'aggraver durant la moitié de l'année hivernale quand l'air présent dans ces cuvettes, mais aussi dans de larges vallées, se refroidit dans ses basses couches alors que les couches supérieures se réchauffent. La conséquence est la formation d'une couche d'inversion caractéristique d'une température qui augmente avec l'altitude. Si l'air est suffisamment humide, un brouillard persistant ou des stratus peu élevés (Fig. 7) se forment, ce qui empêche le soleil de briller. De telles inversions agissent virtuellement comme un couvercle posé au-dessus des couches de l'atmosphère proches du sol, supprimant ainsi tout échange vertical de l'air. Les polluants ne peuvent plus être diffusés loin de leur source d'émission et leur concentration augmente.



Fig. 7 Une couche de stratus de basse altitude ou un brouillard élevé s'est développé dans la vallée, indiquant la présence d'une inversion de température. Au-dessus des stratus, de fines couches supplémentaires de brume sont visibles et montrent la complexité de l'atmosphère dans une vallée.

Les effets de canalisation, les flux de type foehn, la stagnation, les situations fréquentes d'inversion et les circulations diurnes de vents thermiques caractérisent le climat local des régions situées à l'intérieur ou à la périphérie de zones montagneuses. Ces particularités

atmosphériques réelles sont propres aux espaces montagneux et ne sont pas observables dans les régions de plaine.

Transport des polluants atmosphériques en environnement alpin

En termes de pollution atmosphérique, le point le plus important concerne les polluants nocifs. Il s'agit de gaz tels que le dioxyde de soufre (SO_2), le monoxyde de carbone (CO), le monoxyde d'azote (NO), le dioxyde d'azote (NO_2), l'ozone (O_3), etc., ainsi que des particules en suspension (poussières, métaux lourds tels que le plomb, ou particules provenant de l'usure des freins, de l'embrayage ou des pneus). Les particules ultrafines et celles issues des aérosols sont classées selon leur diamètre maximal mesuré en micromètres (μm) ; par exemple PM10 pour des particules dont le diamètre est inférieur à $10 \mu\text{m}$. La concentration est définie par la quantité de masse d'un polluant dans un certain volume d'air ; elle est mesurée en milligrammes ou en microgrammes par mètre cube (mg/m^3 or $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

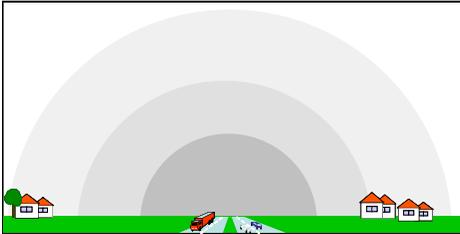


Fig. 8a En présence d'un terrain plat, la pollution de l'air se disperse dans un demi-espace délimité par le sol. Les tons gris sur le schéma représentent les concentrations moyennes pour une distribution uniforme des directions de vent.

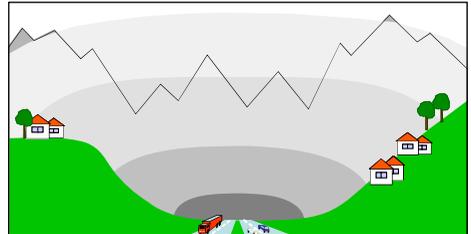


Fig. 8b Dans une vallée, le volume d'air est réduit par les pentes. Les tons gris sur le schéma représentent les concentrations moyennes pour une distribution uniforme des directions de vent. On observe une augmentation des concentrations.

Les concentrations locales de certains types de polluants dépendent du rapport entre l'émission, c'est-à-dire quelle masse de polluant est libérée dans un certain volume d'air, et la transmission, c'est-à-dire quelle masse de polluant est transportée par un vent moyen (advection) et par des turbulences (diffusion turbulente). Le processus de diffusion mène à une dilution constante et donc à une diminution de la concentration car une certaine quantité de polluants contamine un volume d'air qui grossit continuellement. Si l'émission et la transmission sont à l'équilibre alors la concentration est constante. Pour un taux d'émission donné, le niveau de concentration à l'équilibre est faible si la vitesse de vent est modérée ou importante et/ou l'échange turbulent est efficace (moitié de l'année estivale, journées ensoleillées, vents forts, foehn). Le niveau de concentration à l'équilibre est élevé pour des faibles vitesses de vent et des faibles échanges turbulents (moitié de l'année hivernale, inversions, nuits claires).

Dans les Alpes, zone montagneuse, on observe également d'autres effets. Le volume d'air d'une région étant réduit par la



Fig. 9 De l'air froid s'est accumulé au-dessus de la neige recouvrant le fond de la vallée. Il y a donc une inversion de température qui piège la pollution comme on le voit avec cette coloration brunâtre. L'air est trop sec pour permettre la formation de brouillard durant la journée.

présence des montagnes, la même masse de polluants est distribuée dans un volume plus faible que si le terrain était plat (Fig. 8). Cela a pour conséquence que pour un certain niveau d'émission, les concentrations en zones montagneuses seront plus élevées qu'en terrain plat.

Les situations combinant une inversion (augmentation de la température avec l'altitude) et un vent faible sont critiques : la probabilité d'avoir une forte pollution de l'air est importante (Figs. 9 et 10). Dans les Alpes, de telles situations sont particulièrement fréquentes dans les cuvettes et dans les vallées encaissées. Dans les deux cas, la propagation horizontale de l'air est fortement entravée par les montagnes environnantes ce qui induit des faibles vitesses moyennes de vent ; les polluants sont alors difficilement déplacés tandis que l'inversion supprime le transport vertical par turbulence. Ces situations pouvant persister sur plusieurs jours, les polluants peuvent s'accumuler dans une couche proche du sol faisant régulièrement augmenter les concentrations.



Fig. 10 Des nappes d'air pollué sont visibles dans le fond de la vallée tandis que la présence de nuages de type *altocumulus lenticularis* indique un flux d'air important à haute altitude et à l'échelle globale des Alpes.

Les vents thermiques ont également une influence significative sur la pollution de l'air en zone montagneuse. Les vents dirigés vers le haut des montagnes (Fig.11a) apportent les polluants du bas de la vallée (lieu de la plupart des émissions) vers le haut des pentes ainsi que vers la zone au-dessus du centre de la vallée. De plus, des thermiques (bulles d'air chaud ascendantes) qui proviennent des irrégularités (rochers, bordures de forêts) des pentes mènent finalement à une atmosphère homogène dans la vallée. En conséquence, la concentration moyenne dans la vallée est assez faible. Ces situations sont favorables pour les villages dans le fond de la vallée mais les habitations situées sur la pente ou sur des plateaux élevés sont exposées aux polluants transportés depuis le fond de la vallée et le long de la pente.

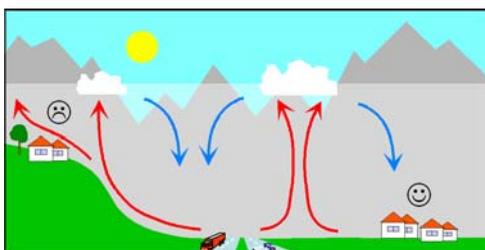


Fig. 11a Les vents dirigés vers le haut des pentes la journée (en rouge et à gauche) induisent une couche de circulation assez épaisse. Cela réduit les concentrations de polluants dans les fonds de vallée mais engendre le transport des polluants vers le haut des pentes. Des circulations d'air vers le bas compensent cet effet comme montré en bleu.



Fig. 11b Durant les nuits claires, les gaz d'échappement sont pris au piège dans la couche d'inversion proche du fond de la vallée. Les zones proches du pied des pentes profitent des vents dirigés vers le bas (en bleu). Les plateaux élevés sont souvent au-dessus de la couche d'inversion polluée et ne subissent que la pollution résiduelle de la veille.

Dans le cas de vents nocturnes vers le bas des pentes (Fig. 11b), de l'air frais circule vers le bas de la vallée. Une fois dans le bas de la vallée l'air continue de circuler tant qu'il n'est pas perturbé par un obstacle. Bien sûr, cet air frais peut localement remplacer l'air pollué, mais il est pour cela nécessaire de ne pas avoir d'obstacles (bâtiments par exemple) le long de la circulation de l'air. Cependant, la plupart des grandes vallées alpines ne bénéficient pas de cette circulation d'air frais descendant le long des pentes. Les circulations verticales étant réduites pendant la nuit et la couche de circulation étant fine, les concentrations de polluants dans le fond des vallées sont élevées. Les villages situés en hauteur sont alors favorisés puisque les émissions sont principalement situées dans le fond des vallées et les polluants ne sont pas transportés vers le haut ; toutefois, la qualité de l'air de ces villages peut être altérée par les polluants ayant été transportés vers le haut des pentes pendant la période de jour.

Une accumulation de polluants dans l'air peut survenir lorsque des conditions météorologiques avec vents thermiques se poursuivent sur plusieurs jours. La circulation de l'air longitudinalement dans la vallée et transversalement le long des pentes fait que les polluants se répandent partout tandis que des émissions supplémentaires polluent l'air dans la vallée. Une circulation d'air à grande échelle n'est pas possible, et la profondeur de la couche de circulation est souvent limitée par une couche d'inversion élevée. En conséquence, l'indicateur de concentration augmente globalement de jour en jour bien qu'il puisse varier entre les périodes de jour et de nuit.

Propagation du bruit dans les Alpes

Un bruit est généré par une source puis il se propage dans l'air de manière invisible sous la forme d'une onde sonore. D'un point de vue physique, l'intensité d'un son est définie par l'amplitude des oscillations de pression associées au passage de l'onde sonore ; elle peut être mesurée par un microphone. Pour exprimer l'intensité on parle généralement de niveau de bruit et on utilise une échelle logarithmique : le décibel (dB). D'un point de vue fréquentiel, le bruit est souvent composé d'un spectre large bande, cependant, l'oreille humaine ne perçoit pas toutes les fréquences d'une manière identique même lorsqu'elles ont la même amplitude. Pour prendre en compte ceci, on introduit un filtre ; le plus courant est le filtre de pondération A, qui amène alors à la notation dB(A).

Dans la pratique, on définit des niveaux de bruit court-terme et long-terme. Pour des événements ponctuels (passage d'un train), c'est le niveau de bruit maximum pondéré A qui est intéressant. Pour l'évaluation du bruit de trafic en général, on utilise plutôt des indicateurs long-terme (moyennes annuelles par exemple). La Directive Européenne sur le Bruit préconise l'utilisation de l'indicateur L_{den} . C'est un niveau de bruit moyenné sur une journée de 24 heures en pondérant différemment les périodes jour, soir et nuit : les contributions du soir et de la nuit sont augmentées de 5 et 10 dB pour prendre en compte la sensibilité des être humains.

La propagation en champ libre induit une décroissance du niveau de bruit en fonction de la distance. Typiquement, pour une source ponctuelle (par exemple une voiture), le niveau de bruit décroît de 6 dB(A) par doublement de distance, et pour une ligne source (par exemple une route avec un trafic continu et dense), le niveau de bruit décroît de 3 dB(A) par doublement de distance. Cependant, dans la réalité, d'autres facteurs ont une influence sur le niveau de bruit.

Lors de la propagation des ondes sonores, une partie de l'énergie acoustique est absorbée par l'atmosphère et ce principalement aux hautes fréquences. Par conséquent, les basses

fréquences d'un concert en plein air peuvent être entendues à de longues distances tandis que les hautes fréquences ont été fortement amorties. L'absorption atmosphérique dépend de la température et de l'humidité relative de l'air.

Les bruits qui se propagent d'une source proche du sol (par exemple une route) vers un récepteur proche du sol (par exemple un être humain) sont aussi atténués par l'interaction des ondes sonores avec le sol. Ces effets de sol dépendent de ses caractéristiques physiques : l'atténuation est forte pour des sols acoustiquement absorbants (neige, herbe) mais est quasi inexistante pour des sols acoustiquement réfléchissants (béton, surfaces d'eau).

Les conditions météorologiques ont une influence sur la propagation acoustique notamment lorsqu'elles induisent une réfraction des ondes sonores. Cela explique le fait bien connu qu'une source sonore lointaine (une autoroute ou une voie ferrée) peut être parfois entendue très distinctement et d'autre fois pas du tout.

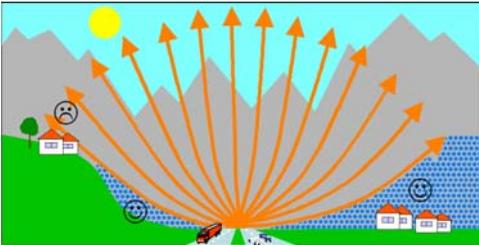


Fig. 12a Directions de propagation du son (rayons sonores) durant la journée lorsque la température diminue avec l'altitude et que les ondes sonores sont réfractées vers le haut. Dans les zones avec les points bleus dans le bas de la vallée (« zones d'ombre acoustique »), le bruit est diminué de manière significative car les rayons sonores réfractés ne peuvent atteindre ces zones.

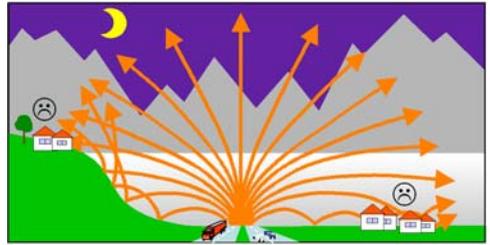


Fig. 12b Directions de propagation (rayons sonores) durant la nuit lorsque la température augmente avec l'altitude dans une couche d'inversion (en gris) et que les ondes sonores sont réfractées vers le bas. Il n'existe alors pas de zones d'ombre acoustique, au contraire, les rayons sont réfléchis sur le sol.

La réfraction apparaît en présence de gradients verticaux (valeurs différentes en fonction de l'altitude) de température ou de vent. La réfraction vers le haut (Fig. 12a) apparaît souvent la journée lorsque l'air proche du sol est réchauffé. Cela conduit à une courbure vers le haut des trajectoires suivies par les ondes sonores. Par conséquent, les niveaux de bruit proches du sol diminuent plus rapidement avec la distance qu'en présence d'une atmosphère sans stratification de la température. Les autoroutes et voies ferrées sont alors entendues jusqu'à une centaine de mètres environ. Au contraire, la réfraction vers le bas (Fig. 12b) apparaît durant la nuit lorsqu'il y a une inversion de température. Les rayons sonores émis horizontalement sont alors courbés vers le sol où ils sont réfléchis, puis à nouveau courbés, etc. : le son est piégé dans une couche proche du sol. Dans cette configuration, le bruit peut être entendu jusqu'à des distances assez grandes. Le phénomène de réfraction peut également apparaître en présence de vent. La réfraction vers le haut (défavorable à la propagation, il y a moins de bruit) apparaît lorsque le son se propage dans le sens contraire au vent. La réfraction vers le bas (favorable à la propagation, il y a plus de bruit) apparaît lorsque le son se propage dans la même direction que le vent. Généralement, la réfraction due à la stratification en température de l'atmosphère est plus importante que celle due au vent. Les deux effets peuvent s'additionner (par exemple propagation dans la même direction que le vent avec une couche d'inversion de température) ou se compenser.

Dans les zones montagneuses, il est important de prendre en compte certaines spécificités. Par exemple, lorsque le son se propage depuis des sources dans le bas de la vallée vers des habitations assez hautes sur la pente ou sur un plateau, la propagation s'effectue en espace dégagé en hauteur et non immédiatement au-dessus du sol. Par conséquent, les ondes sonores ne sont pas atténuées par l'effet de sol. Cela mène à des situations où les niveaux de bruit sont relativement importants dans des zones élevées de la vallée. Le bruit de trafic peut être très bien entendu depuis le haut des montagnes même si la distance directe est de plusieurs kilomètres. Dans certains cas, les bords des vallées ont la forme arrondie d'un théâtre (Fig. 13), les habitants ont alors tout loisir de « profiter » de l'effet d'amphithéâtre qui leur permet d'entendre les bruits provenant des sources dans le bas de la vallée.



Fig. 13 Le microphone sous forme de tête artificielle enregistre l'effet d'amphithéâtre « aux premières loges » sur la partie est de la vallée de Wipp avec l'autoroute de Brenner en viaduc en arrière plan (proche de Steinach en Autriche)

Les effets sur la santé de la pollution de l'air et des nuisances sonores dans les Alpes

La pollution de l'air et le bruit constituent des nuisances environnementales notables, qui affectent non seulement la santé mais plus généralement la qualité de vie, et le bien-être des populations. L'appréciation de ce dernier ne peut se faire uniquement à partir de mesures physiques, mais doit intégrer des « facteurs mous » comme les attentes liées à un environnement donné, par exemple un quartier résidentiel de qualité ou un site naturel d'exception.

Les polluants atmosphériques sont, soit directement responsables, soit des facteurs aggravants de maladies telles que l'asthme, la bronchite, l'emphysème, certaines maladies cardiaques et pulmonaires, et allergies respiratoires. Cependant, la conscience d'un air pollué et la façon que chacun a de l'apprécier, peuvent également avoir des conséquences dites *indirectes* sur la santé. On estime ainsi que 90 % des effets de la pollution sont d'origine biophysique, et 10 % sont liés aux effets indirects. Pour le bruit, le problème est très différent. Celui-ci est directement responsable de troubles cardiovasculaires, mais cette conséquence directe ne représente que 25 % des effets du bruit sur la santé. Les 75 % restants sont considérés comme indirects, et dus aux troubles du sommeil, à la gêne, et au stress, qui favorisent le déclenchement de certaines maladies.

Pour rendre compte de la complexité des relations entre pollution de l'air et nuisances acoustiques d'une part, et de leurs impacts sur la santé et le bien-être d'autre part, il apparaît nécessaire d'introduire des métriques simples qui pourront faciliter la prise de décisions politiques ou techniques. Ces métriques sont appelées indicateurs ou indices. Les indices de pollution de l'air (IPA) combinent les classes de concentrations de différents polluants en fonction de leur gravité. Dans certains cas, un système de pondération est utilisé pour tenir compte de l'effet de chaque composé chimique. Il est également possible de définir des indices de la pollution sonore (IPS), combinant les effets de sources de nature différente (route, ferroviaire). Il n'est cependant pas aisé de trouver un indice universel, certains effets du bruit étant liés à une exposition de long-terme, alors que d'autres dépendent davantage des niveaux sonores maximums atteints ou d'un nombre d'émergences relatives à un certain seuil

de bruit. Le sujet fait toujours actuellement l'objet de recherches. Il est finalement possible de définir un indice d'exposition global, combinant indices de pollution de l'air et sonore, pour décrire une situation environnementale, en cumulant les deux nuisances.

Il est également pratique d'utiliser des indices de santé, croisant indicateurs et facteurs de risque. Ces derniers sont obtenus à partir de données démographiques, comme le nombre de personnes exposées, la distribution par genre ou par classe d'âge, etc. La *fonction exposition-réponse* est un indice qui traduit l'impact

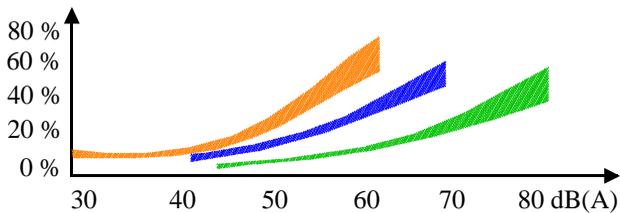


Fig. 14 Exemple d'une fonction exposition-réponse montrant les populations "fortement gênées" en fonction du niveau de bruit long-terme d'une route principale (en rouge), d'une autoroute (en bleu) et d'une voie ferrée (en vert).

sur la santé (réponse) à partir du produit de l'exposition ou dose reçue de polluant, et/ou de bruit, et du risque relatif (Fig. 14). Ce dernier est basé sur une analyse territoriale précise du domaine d'étude. Les doses calculées sont intégrées sur la durée d'exposition, en intégrant la durée de vie moyenne et le temps d'exposition dans l'aire d'étude. A partir des fonctions exposition-réponse, il est possible d'estimer le nombre supplémentaire d'admissions à l'hôpital liées à une augmentation de la pollution atmosphérique. Le nombre d'années de vie perdues est également un paramètre couramment déduit d'une fonction exposition-réponse. Il décrit la diminution de l'espérance de vie liée à l'augmentation de la pollution.

Au travers du mot-clef *monétarisation*, une autre description des impacts est utilisée. La monétarisation permet de convertir les conséquences sanitaires en termes financiers. C'est un pré-requis au calcul des "coûts externes" environnementaux, consécutifs à l'activité humaine, non payés par le responsable principal mais reportés sur la société, et souvent sur les générations futures.

Evaluation des mesures de réduction et de planification

Les travaux de recherches menés au cours des dernières décennies ont permis d'améliorer les techniques de mesures et de modélisation de la pollution de l'air et du bruit, ainsi que les méthodologies des études d'impact environnementales, sur la santé et la qualité de vie.

Les nouvelles technologies de capteurs et l'augmentation substantielle et rapide des performances des ordinateurs ont ouvert de nouvelles possibilités dans les champs de la métrologie et de la prévision. Il est ainsi désormais possible de décrire les mouvements d'air complexes en milieux montagneux avec une grande précision. Cette étape est indispensable pour pouvoir proposer des prévisions fiables des concentrations en polluants et des niveaux sonores. Ceux-ci sont en effet fortement influencés par les conditions atmosphériques. Ces prévisions nécessitent également une bonne connaissance de la répartition spatiale et temporelle des émissions de polluants et du bruit liés aux infrastructures de transport. Ces émissions dépendent notamment des volumes de trafics, de la composition des flottes de véhicules et de l'état des routes et des voies ferrées.

Grâce à ces avancées, une étude complète des effets de la pollution de l'air et du bruit sur la santé et la gêne a pu être menée.

Méthodes d'observation et de surveillance

Les mesures in-situ de la pollution de l'air et du bruit sont réalisées de deux manières :

1. Des observations en continue (monitoring) sont utilisées pour la surveillance annuelle de l'environnement, à des emplacements fixes. Ces mesures fournissent des données statistiques, journalières ou annuelles moyennes, les valeurs extrêmes ou le nombre de dépassements des limites admises.
2. Des observations temporaires peuvent être effectuées dans le cadre de campagnes de mesures spécifiquement programmées ou en réponse à des demandes ponctuelles particulières. Leur durée varie alors de quelques jours à quelques semaines. Il est possible d'avoir recours à des plates-formes de mesure mobiles (voitures, camionnettes, et même des avions) de façon à multiplier les points de prélèvements, investiguer des domaines plus étendus, et recueillir davantage d'informations. Ces mesures temporaires permettent des observations plus détaillées (mesures synchronisées d'un grand nombre de polluants différents par exemple) en bénéficiant d'un grand nombre d'instruments de mesure ou en combinant des mesures de différentes natures (météorologie, polluants atmosphériques, bruit).

Le suivi du trafic routier (nombre de véhicules par heure) et sa composition (véhicules légers et lourds), sont communément réalisés sur de nombreuses sections des routes principales et autoroutes alpines. Ces comptages ne sont pas motivés par des raisons environnementales, mais servent plus généralement à la gestion du trafic. En outre, des opérations de comptages temporaires peuvent être menées sur un réseau plus étendu. Elles sont parfois accompagnées d'enquêtes de déplacements réalisées auprès des usagers.

Mesures météorologiques

Les paramètres météorologiques de base (pression atmosphérique, température et humidité, vitesse et direction du vent) sont communément mesurés chaque heure à partir de stations manuelles ou automatiques. La distance moyenne entre ces stations est d'environ 50 km, ce qui est trop important pour pouvoir rendre compte de la complexité des phénomènes météorologiques en topographie alpine. La plupart de ces stations sont situées en fond de vallée (aéroports par exemple), et très peu d'entre-elles au sommet des montagnes. Les profils verticaux de température, humidité, et pression sont classiquement mesurés à l'aide de ballons-sondes ou radiosondes. On ne dénombre que dix stations de radiosondes autour des Alpes, et une seule est située au cœur du massif (Innsbruck/Autriche). Les sondages ne sont par ailleurs généralement effectués qu'une à deux fois par jour.

Le manque d'informations exhaustives, en ce qui concerne les données météorologiques, et qui permettraient de prendre en compte la complexité tridimensionnelle des systèmes de vents dans les Alpes, conduit de temps en temps à réaliser des campagnes de mesures coordonnées spécifiques. Dans ce cadre, des systèmes de mesure très sophistiqués peuvent être employés. On distingue deux types d'instrumentation :

1. les mesures « in-situ »
2. la « télédétection »

Les systèmes in-situ mesurent l'état de l'atmosphère au niveau des capteurs utilisés. Ils sont généralement destinés à enregistrer les paramètres météorologiques au niveau du sol (Fig. 15a).



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 15 (a) Station météorologique automatique avec mât de 2 m pour la mesure de température (au centre), de vent (à droite) et de rayonnement (à gauche) (b) Station météorologique automatique avec mât de 10 m; (c) Ballon captif avec sonde météorologique juste avant le lâché; (d) Sodar Doppler.

Ils peuvent être installés sur un mât pour la mesure de profils verticaux (Fig. 15b), ces mâts n'excédant généralement pas 10 m pour des mesures temporaires. En attachant les capteurs à un ballon captif, il est possible d'obtenir des données à plus haute altitude, le ballon pouvant être déplacé verticalement sur une centaine de mètres (Fig. 15c). Les mesures in-situ peuvent également être réalisées à partir d'avions spécialement équipés. Bien que très coûteuse, cette méthode offre de la flexibilité pour l'obtention de données suivant les trois dimensions. Une méthode moins onéreuse consiste à mesurer les profils "verticaux" à l'aide de voitures équipées de capteurs, et parcourant les routes sur les flancs de vallées, permettant ainsi d'obtenir des données à différentes altitudes.

Bien que placés au sol, les systèmes de télédétection sont capables de mesurer des profils verticaux. Ils utilisent des technologies de type Radar, Lidar ou Sodar (Fig. 15d), basés sur des ondes électromagnétiques, optiques (laser) ou acoustiques, et reçoivent une information, en continue, relative la colonne d'air située au-dessus du capteur.

Mesures de la pollution atmosphérique

Le suivi de long-terme de la pollution de l'air est aujourd'hui une pratique bien établie dans les pays de l'Europe. Des stations fixes mesurent la qualité de l'air dans les villes et en milieu rural, en bordure d'autoroutes supportant de forts trafics ou à proximité de sites industriels fortement émetteurs. Ces stations s'intéressent avant tout aux polluants réglementés, c'est-à-dire ceux pour lesquels des valeurs limites d'exposition à long et court termes, ou encore le nombre de dépassements des seuils sur une période donnée, ont été fixées. Les composés généralement suivis (pas forcément tous sur toutes les stations) sont les suivants : monoxyde de carbone (CO), dioxyde de soufre (SO₂), dioxyde d'azote (NO₂), ozone (O₃), composés organiques volatiles (COV), et particules de diamètre inférieur à 10 µm (PM10).

En complément du réseau de stations de mesures fixes, des campagnes de mesures temporaires sont fréquemment réalisées (par exemple observations mobiles séquentielles sur une sélection de points), ou pour des occasions particulières (pendant les épisodes de forte pollution ou dans le cadre de projets de recherche).

Comme pour les mesures météorologiques, des techniques « in-situ » ou basées sur la « télédétection » peuvent être utilisées. Les systèmes de mesure in-situ du commerce permettent d'étudier une large gamme de composés chimiques. Ils peuvent être installés dans des caissons, des voitures ou utilitaires mobiles (Fig.16) ou encore à bord d'avions.



Fig. 16 Station mobile de surveillance de la qualité de l'air de l'Agence de Protection de l'Environnement de la Province Autonome de Bolzano

Les systèmes de télédétection sont utilisés pour étudier la concentration en polluants sur des linéaires donnés.

Mesures du bruit

Souvent pratiquée à proximité des aéroports, la surveillance acoustique de long-terme concerne peu les axes de transport terrestres. Des mesures de bruit sont néanmoins réalisées lors de campagnes spécifiques. Elles peuvent prendre la forme d'échantillonnages ponctuels ou d'observations sur des périodes de l'ordre de la semaine ou plus si nécessaire.

Les instruments standards mesurent le niveau de pression acoustique pondéré-A, avec un pas de 1 seconde. Les instruments plus sophistiqués sont équipés d'analyseurs fournissant la distribution spectrale du bruit, par bandes d'octave ou de tiers d'octave, sur l'ensemble du spectre audible (20 Hz – 16 kHz). Les sonomètres utilisent des microphones possédant une grande sensibilité et sont munis de système de protection contre le vent. Selon les normes en vigueur, les niveaux de bruit sont évalués à 1.5 m ou 4 m au-dessus du sol.

Les systèmes de mesure de type « têtes artificielles », permettent de réaliser des enregistrements binauraux (stéréos). Une paire de microphones est intégrée dans les oreilles d'un mannequin en plastique (Fig.17). Ces enregistrements permettent en particulier d'étudier la provenance du bruit. L'intérêt des mesures binaurales est de se rapprocher du bruit tel qu'il est perçu par le système auditif humain.

Simulations et prévisions

Les impacts environnementaux de nouvelles infrastructures de transports, routières ou ferroviaires, les mesures administratives (réduction des vitesses, interdiction de la circulation des poids lourds la nuit), le report modal (de la route vers le rail), et les futurs scénarios de trafic (liés par exemple à l'ouverture de nouveaux tunnels de base, à la croissance économique, aux évolutions des pratiques touristiques), ne peuvent être évalués simplement sur la base du monitoring ou d'observations ponctuelles. L'utilisation d'outils de modélisation et de méthodes de prévision est nécessaire.

Dans l'ensemble, la majorité des phénomènes qui gouvernent les vents orographiques et la stratification des températures, le transport, la dispersion, les réactions chimiques et le dépôt des polluants, la propagation, absorption, réflexion, réfraction et diffraction des ondes sonores, sont bien connus et décrits par des équations mathématiques, physiques ou chimiques.

Les solutions de ces équations permettent de décrire l'évolution temporelle et/ou spatiale des concentrations en polluants et les niveaux de bruit pour des conditions aux limites données. Au préalable, on aura eu recours à des modèles d'émission pour traduire les données de trafic en émissions de polluants ou de bruit.

L'estimation des impacts est ensuite basée sur l'utilisation de relations exposition-effet rendant compte des impacts de la pollution atmosphérique et du bruit sur la santé.



Fig. 17 Tête artificielle binaurale (à gauche) et microphone monaural (à droite) "écoutant" le bruit de trafic dans une zone de promenade de la vallée de la Maurienne (France). De la mousse protège du vent les deux capteurs.

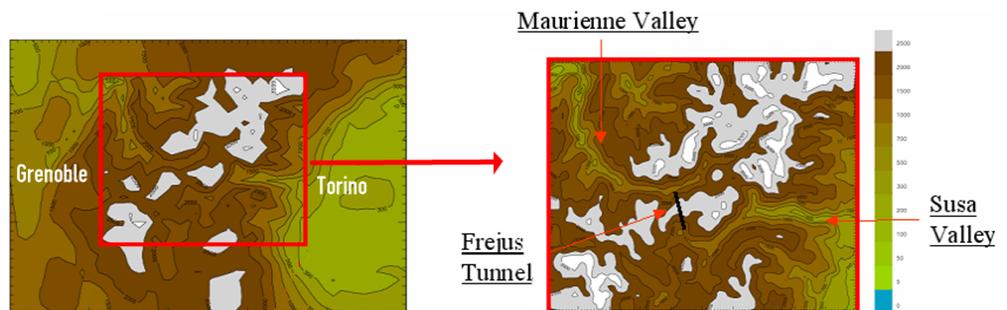


Fig. 18 Influence de la résolution spatiale: élévation du terrain des Alpes occidentales avec une maille de 4 km (à gauche). Dans le sous-domaine (carré rouge), la maille est réduite à 1 km pour une meilleure représentation de la topographie (à droite).

De nombreux processus d'origine humaine, responsables de désordres environnementaux dus au trafic, peuvent être simulés à l'aide de « modèles » ou « systèmes de modèles ». Il faut cependant garder à l'esprit que ces modèles ne représentent qu'une simplification de la réalité. Les processus naturels dépendent d'une myriade d'interactions entre de simples molécules, qui ne peuvent être modélisées par le plus puissant des ordinateurs. De plus pour des questions de volume de calcul, il est nécessaire d'agréger et de simplifier les processus en jeu. Ces opérations et hypothèses sont sources d'incertitudes. La plupart des modèles numériques travaillent avec une résolution spatiale donnée, c'est-à-dire définie par la taille du plus petit élément de terrain pouvant être représenté et étudié (Fig. 18).

Au cours des dernières décennies, des modèles numériques puissants ont été développés dans les Universités et Centre de Recherche. Ils ont été validés en comparant leurs résultats à des données issues de campagnes de mesures ou aux données des réseaux de surveillance. Dans la mesure où un modèle est capable de simuler une situation réelle connue avec un niveau de précision suffisant, on estime qu'il est fiable et qu'il pourra servir d'outil de prévision et permettre l'évaluation des impacts de scénarios fictifs.

La précision des résultats issus de la modélisation dépend de la puissance des moyens et techniques de calculs mis en œuvre. Pour des besoins « courants », des modèles simplifiés ont été proposés. A destination des bureaux d'études ou des services techniques, ils permettent de répondre aux attentes réglementaires, par exemple pour la réalisation des volets air et bruit des études d'impact accompagnant les projets d'infrastructures. L'inconvénient de ces modèles, conçus généralement pour des terrains plats, est qu'ils ne permettent pas de décrire, la complexité des phénomènes associés aux reliefs montagneux, et en particulier les interactions entre la topographie et la météorologie. Ces simplifications sont à l'origine d'erreurs importantes.

Les modèles dits « avancés », disponibles aujourd'hui, ne peuvent se substituer aux modèles standards dans l'immédiat. Ils constituent en revanche des outils complémentaires pour :

- les études de situations complexes pour lesquels les méthodes standards atteignent leurs limites,
- l'évaluation des situations les plus défavorables, c'est-à-dire les situations de pollution extrême nécessitant l'adoption de mesures adaptées,
- l'optimisation de mesures de protection dans des contextes géographiques très spécifiques,
- l'étude de scénarios de trafic futurs.

En pratique, l'emploi de modèles avancés est cependant limité par :

- le manque de disponibilité ou de qualité des données d'entrée détaillées, soit parce qu'elles ne sont pas recueillies, soit parce que leur propriétaire ne les met pas à disposition.
- des raisons économiques nécessitant de trouver un compromis entre puissance de calcul et précision.

Il reste que l'utilisation de modèles avancés permet d'obtenir des résultats de qualité souvent supérieure à celle fournie par les méthodes d'ingénierie ou simplifiées.

Modèles d'émission

Les modèles d'émission sont utilisés pour calculer les caractéristiques d'émission (quantité de polluant par intervalle de temps, niveaux de puissance acoustique) le long des routes et lignes de chemins de fer. Ces calculs se font à partir des données de trafic : nombre de véhi-

cules/trains, composition du trafic, parc roulant, vitesses, pentes et état des infrastructures. La qualité des données d'émission est ainsi très liée à celle des données de trafic.

Les trafics peuvent être observés, estimés ou prédits. Les émissions liées aux transports et aux sources fixes (chauffage domestique, industries...) sont généralement inventoriées et disponibles auprès des agences de l'environnement.

Modèles météorologiques

Les modèles météorologiques sont utilisés pour déterminer la distribution spatiale de tous les paramètres influençant le transport et la dispersion des polluants, ainsi que la propagation du son, dans les trois dimensions. Les paramètres des champs météorologiques des espaces montagneux sont issus de la simulation de l'ensemble des processus influencés par : les facteurs topographiques (élévation du terrain, occupation des sols, propriétés aérodynamiques et thermodynamique des sols), les facteurs astronomiques (heures de lever et de coucher du soleil, inclinaison), et par les facteurs météorologiques à grande échelle (par exemple vents d'altitude, masses d'air). Les modèles doivent en particulier être capable de reproduire les systèmes de vents liés aux montagnes (effets des pentes, circulation en plaine, effet « canyon », foehn), et la formation des phénomènes d'inversion. Les modèles typiquement utilisés pour les Alpes ont une résolution comprise entre 100 m et 10 km. Les modèles possédant des résolutions plus grossières ne sont pas capables de simuler des systèmes de vents dans les vallées étroites, mais peuvent en revanche couvrir une large portion des Alpes. Des méthodes « d'emboîtements » (entrelacements de modèles utilisant des résolutions croissantes) permettent à la fois de couvrir de larges domaines, et de zoomer sur certaines zones (Fig. 19).

Modèles de pollution atmosphérique

Les modèles de pollution de l'air sont utilisés pour calculer le transport, la dispersion, le dépôt, et les transformations chimiques des polluants pour des émissions et des conditions météorologiques données. Les

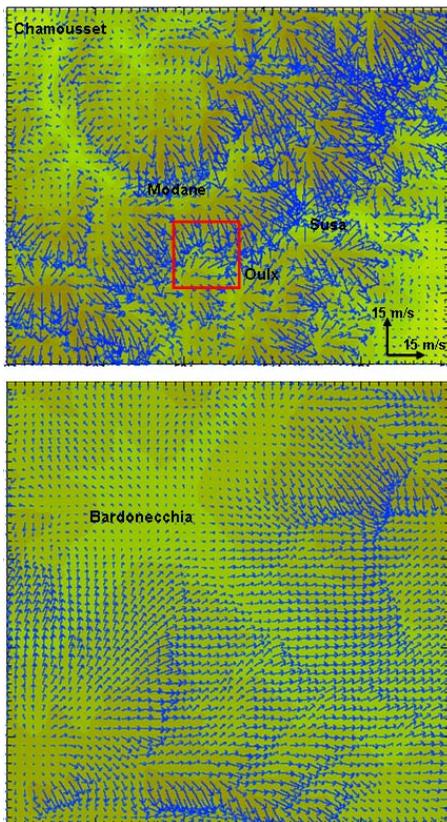


Fig. 19 Exemple de simulations météorologiques présentant le champ de vents avec une résolution de 1 km (en haut) et dans un sous-domaine (carré rouge) de résolution 100 m.

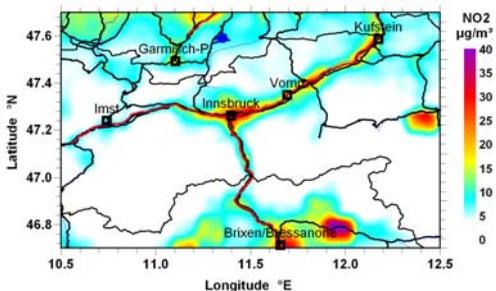


Fig 20 Exemple de simulation de la concentration annuelle moyenne de NO_2 dans une large zone des Alpes de l'est.

informations concernant les émissions et la météorologie sont la plupart du temps issues de calculs préliminaires indépendants. En complément de ces données, il est nécessaire de disposer de la topographie du domaine étudié. Les modèles de pollution de l'air fournissent les distributions spatiales des concentrations de traceurs dans l'air et/ou les quantités de polluants déposés à la surface du sol ou sur la végétation (dépôts secs et humides, sédimentation). La question et les conclusions concernant la résolution spatiale, abordée dans le paragraphe consacré aux modèles météorologiques, s'appliquent également aux modèles de pollution de l'air (Fig. 20).

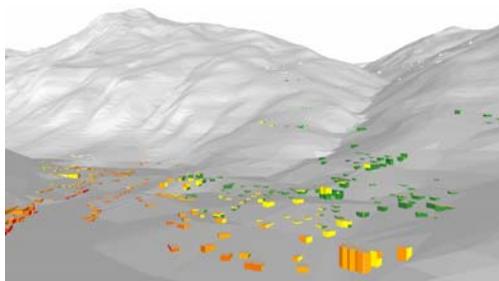


Fig. 21 Exemple de cartographie acoustique. Les couleurs sont fonctions des niveaux de bruit L_{den} calculés en façade des bâtiments dans la vallée de la Maurienne (France). Les niveaux acoustiques augmentent en allant du vert au rouge.

Modèles de prévision du bruit

En fonction de leur niveau de complexité, les modèles de prévision du bruit simulent complètement ou partiellement les effets de la propagation du son entre la source et les récepteurs (bâtiments), pour un niveau d'émission et des conditions météorologiques données. Comme pour les modèles de pollution atmosphérique, les données d'entrée peuvent être issues de calculs préliminaires des émissions ou des conditions météorologiques. Des données supplémentaires sont toutefois nécessaires pour décrire précisément le milieu de propagation (nature du terrain, caractéristiques des sols, description des bâtiments). Les données proposées en sortie des modèles acoustiques sont soit des niveaux de bruit ponctuels en des points précis (Fig. 21), soit des cartes horizontales de bruit.

Modélisation des impacts

A partir des données de pollution de l'air et de bruit, mesurées ou simulées, on évalue les impacts sur la santé, le niveau de gêne, l'augmentation potentielle d'admissions à l'hôpital, la diminution de l'espérance de vie ou encore les coûts externes environnementaux. Cette évaluation se base également sur la connaissance de données démographiques comme les densités de population, les classes d'âges, les durées d'exposition à l'intérieur ou à l'extérieur des bâtiments, etc.

Les Systèmes d'Information Géographiques permettent de combiner, par exemple, des cartes de population avec des cartes de paramètres d'impact sur la santé (Fig. 22).

Photo credits:

J. Defrance (17), M. de Franceschi (16), Alexander Gohm (7, 10, 15b), D. Heimann (1, 2, 3, 4, 5, 19), P. Lercher (13), K. Schäfer (15d, 21), J. Vergeiner (9, 15a,c)

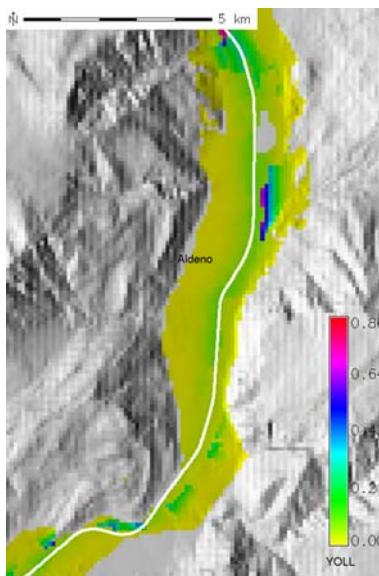


Fig 22 "Années de vie perdues" (augmentant du jaune vers le rouge et dues à la pollution de l'air sur une section de la vallée de l'Adige/Etsch.

ALPNAP Partenaires

- (1) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen, 82234 Weßling, Allemagne (Leader du projet).
<http://www.dlr.de/pa>
- (2) Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Piemonte (ARPA del Piemonte), corso Unione Sovietica, 216, 10134 Torino, Italie.
<http://www.arpa.piemonte.it/>
- (3) Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement de Lyon (CETE de Lyon), 46, rue Saint-Théobald BP 128, 38081 L'Isle d'Abeau Cedex, France.
<http://www.cete-lyon.equipement.gouv.fr>
- (4) Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Département Acoustique et Éclairage, 24, rue Joseph Fourier, 38400 Saint-Martin-d'Hères, France.
<http://www.cstb.fr>
- (5) Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (FZK), Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Bereich Atmosphärische Umweltforschung (IMK-IFU), Kreuzeckbahnstr. 19, 82467 Garmisch-Partenkirchen, Allemagne.
<http://www.fzk.de>
- (6) Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima – CNR (ISAC-CNR), corso, Fiume 4, 10133 Torino, Italie.
<http://www.isac.cnr.it>
- (7) Medizinische Universität Innsbruck (MUI), Department für Hygiene, Mikrobiologie und Sozialmedizin - Sektion für Sozialmedizin, Sonnenburgstr. 16, 6020 Innsbruck, Autriche.
<http://www.i-med.ac.at/sozialmedizin>
- (8) Technische Universität Graz (TU Graz), Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Inffeldgasse 21a, 8010 Graz, Autriche.
<http://fvkma.tu-graz.ac.at>
- (9) Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Gruppo di Fisica dell' Atmosfera, Via Mesiano 77, 38100 Trento, Italie.
<http://apg.ing.unitn.it>
- (10) Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Department Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Institut für Meteorologie, Peter Jordan Str. 82, 1190 Wien, Autriche.
<http://www.wau.boku.ac.at/met.html>
- (11) Universität Innsbruck, Institut für Meteorologie und Geophysik, Innrain 52, 6020 Innsbruck, Autriche.
<http://www2.uibk.ac.at/meteo>

