



## ANNEXE D – APERÇU DE LA MODÉLISATION DE LA DISPERSION POUR LA CONCEPTION DES SYSTÈMES DE VENTILATION

Ce chapitre aborde la façon dont la modélisation mathématique et/ou physique peut être utilisée pour concevoir des systèmes de ventilation tels que têtes ou cheminées.

L'objectif environnemental pour un point d'évacuation d'air d'un tunnel est d'assurer que les normes de qualité de l'air soient respectées. Cela peut signifier qu'un point de dispersion doit être situé loin des récepteurs sensibles ou même que l'affectation du sol peut être limitée à une certaine distance d'un point de dispersion. Dans cette perspective, l'emplacement et la hauteur d'une cheminée d'évacuation sont souvent les propriétés critiques de la conception.

Par le passé, la conception des cheminées se limitait à l'utilisation de simples formules servant à déterminer la hauteur des cheminées en fonction de l'importance des émissions. Depuis l'arrivée des ordinateurs dans les années 70, les calculs ont été informatisés. Ces programmes tiennent compte d'à peu près tous les facteurs déterminants influençant les concentrations au niveau du sol issues des points de dispersion.

Les équations utilisées ici représentent un modèle mathématique du processus physique – et parfois chimique – auquel le panache va être soumis une fois sorti de la cheminée.

Voici les processus importants qui sont simulés par des modèles :

- élévation de panache due à la flottabilité et aux effets momentanés,
- transport suite aux effets du vent,
- dispersion due à la turbulence,
- modifications de la turbulence due aux effets d'obstacles tels que les bâtiments et autres éléments,
- transformation chimique susceptible d'augmenter ou de diminuer la concentration d'un polluant.

Les émissions aux têtes n'offrent pas les mêmes possibilités de disperser les polluants. Si les modèles mathématiques sont appliqués aux émissions aux têtes, le modèle de dispersion doit néanmoins prendre en considération certains paramètres particuliers. Des recherches ont démontré que des processus supplémentaires doivent être simulés par les modèles lorsqu'il s'agit de disperser l'air d'un tunnel par ses têtes :

## APPENDIX D – OVERVIEW OF DISPERSION MODELING IN DESIGNING VENTILATION SYSTEMS

This section discusses the way in which mathematical and/or physical modelling can be used to design ventilation options such as portals or stacks.

The environmental objective of any tunnel air discharge point is to ensure air quality objectives are met. This may mean that the point of emission must be located away from sensitive receptors, or even that land use may be restricted to some distance away from a discharge point. From this perspective often the most important properties of a stack are its location and height.

In the past stacks were designed using simple formulae that determined the height of the stack based on the magnitude of the emission. Since the advent of readily available computers in the 1970's these calculations have become integrated into computer programs. These programs take account of nearly all the important factors that determine the ground-level concentrations of emissions from a release.

Equations used in this way represent a mathematical model of the physical and in some cases chemical process that the plume will be subjected to once it leaves the stack.

The important processes that are simulated by models are:

- plume rise due to buoyancy and momentum effects,
- transport due to the effects of the wind,
- dispersion due to turbulence,
- enhancement of turbulence due to the effects of obstacles such as buildings and other features,
- chemical transformation which may increase or decrease the concentration of a pollutant.

Portal emissions do not provide the same opportunity to disperse pollutants. If mathematical models are applied for portal emissions special requirements have to be set on the dispersion model. Investigations gave evidence of additional relevant processes which have to be simulated by models when considering dispersion from tunnel portals:

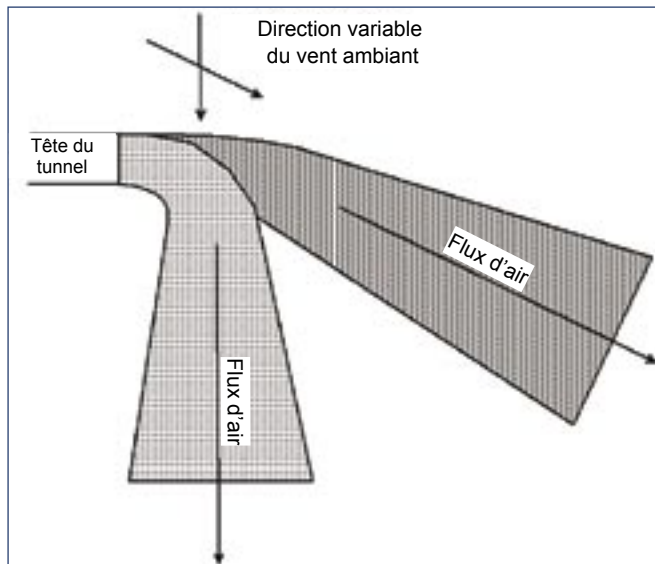


- la vitesse d'évacuation de l'air vicié d'un tunnel et le taux initial de dilution correspondant des polluants qui limitent la concentration maximale présente à proximité des têtes du tunnel,
- l'interaction entre le flux d'air généré par le ventilateur du tunnel et le vent ambiant,
- l'influence des turbulences produites par le trafic sur la dispersion.

Le premier de ces processus est important étant donné que la concentration maximale en polluants dans le tunnel diminue de manière linéaire avec l'augmentation du débit d'air dans le tunnel. Donc, en jouant sur le débit d'air dans le tunnel, les normes de qualité de l'air peuvent être satisfaites au niveau de certains récepteurs à proximité immédiate d'une tête d'un tunnel. De plus, un ventilateur installé dans un tunnel change sa position en fonction de la vitesse de sortie, et peut donc ainsi assurer de temps à autres la protection de certains récepteurs contre l'air pollué évacué du tunnel.

La **figure D19** illustre l'interaction entre le flux d'air généré par le ventilateur et les changements de direction du vent ambiant. Ces changements de direction influent sur l'efficacité de la dispersion réelle de l'air du tunnel perçue par des récepteurs, étant donné que pendant une certaine période de temps (la plupart du temps, une heure), les récepteurs ne sont pas toujours influencés par le flux d'air généré par le ventilateur. Étant donné que la position du flux d'air peut changer à l'échelle du décamètre, comparé aux tournoiments générés sur les bords du flux à une échelle de l'ordre du mètre, on peut conclure qu'il existe un processus de dispersion très efficace, plus important que le procédé « classique » de dispersion d'un panache (p. ex. par une cheminée). Il s'avère très important, dans la modélisation mathématique, d'expliquer ces effets qui n'ont que récemment été identifiés par les scientifiques.

Figure D19. Interaction entre le jet d'air sortant du tunnel et le vent ambiant



- the exit velocity of tunnel exhausts and the corresponding initial dilution of pollutants limiting the maximum concentration occurring in the immediate vicinity of tunnel portals,
- the interaction between the tunnel jet stream and the ambient wind,
- the influence of traffic induced turbulence and flows on the dispersion.

The first of the above mentioned processes is important as the maximum concentration of the tunnel pollutants decreases linearly with an increase in air flow through the tunnel. Hence, by adjusting the air flow through the tunnel air quality standards may still be met at certain receptors in the immediate vicinity of a tunnel portal. In addition, the tunnel jet changes its position according to the exit velocity, and in this way allowing sometimes for a protection of certain receptors from tunnel exhausts.

**Figure D19** shows the interaction between the tunnel jet and ambient wind direction fluctuations. These fluctuations have consequences regarding the effective dispersion of the tunnel exhausts seen by receptors, as within a certain time period (mostly 1-hour) receptors are not always affected by the tunnel jet. As the position of the tunnel jet may change at length scales of the order of decametres, compared to eddies evolving at the edges of the tunnel jet with length scales of a few metres, one may conclude that this is a very effective dispersive process about one order of magnitude stronger compared to the “classical” dispersion of a plume (e.g. from stacks). It is very important for mathematical modelling to account for this effect being identified just recently by scientists.

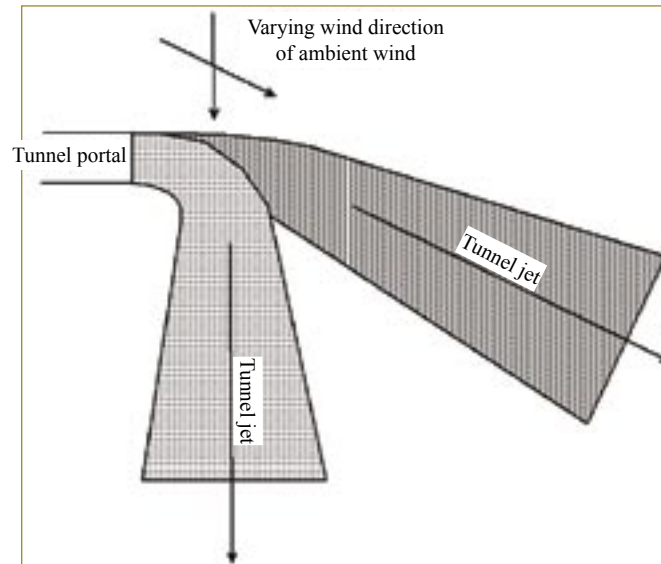


Figure D19. Interaction between the tunnel jet stream and the ambient wind



## ► D.1. MODELISATION PHYSIQUE

Il arrive fréquemment que les cheminées de ventilation d'un tunnel soient implantées dans un environnement urbain, à proximité de bâtiments de différentes hauteurs et configurations. Ces bâtiments sont susceptibles d'affecter les courants d'air en raison de leur proximité immédiate. D'autre part, ces cheminées peuvent être implantées dans des zones de terrain complexes.

L'emplacement du tunnel est un facteur décisif pour l'implantation des cheminées ou des têtes. Les sites d'implantation des tunnels se situent généralement dans des zones complexes ou urbanisées.

Alors que la plupart des modèles informatiques avancés de dispersion tiennent compte des effets des bâtiments et du terrain, de nombreuses incertitudes persistent au niveau de la dispersion. La simulation à l'aide de tunnels éoliens fournit une évaluation plus réaliste des effets des bâtiments sur la dispersion du panache.

La limitation la plus importante de la modélisation physique est cependant qu'il ne permet pas l'estimation à long terme des moyennes de concentrations en polluants, notamment au niveau des situations de vent faible ou des différentes stabilités atmosphériques. Par exemple, un éventail limité de scénarios incluant diverses vitesses et directions du vent peut être combiné pour déterminer les impacts du projet à court terme. Des prévisions météorologiques à long terme (en principe, un an) sont requises pour calculer des moyennes à long terme. Si un ensemble de réactions chimiques sont à prendre en compte (comme pour le NO<sub>2</sub>), il convient également de formuler des suppositions quant aux taux de conversion.

Un modèle à l'échelle de la zone dans laquelle le projet va être implanté est réalisé et des mesures sont effectuées à l'aide d'un gaz traceur, en vue de déterminer le degré de dispersion à partir de la source. L'échelle du modèle dépend des spécificités du projet ; en général, pour des mesures réalisées à proximité d'une cheminée, l'échelle 1/400<sup>e</sup> est utilisée.

La concentration, à une heure donnée, pour le modèle grandeur nature, avoisine une valeur correspondant à +/- 50 % de la valeur calculée par le modèle informatisé du tunnel. Ce résultat est comparable à la précision obtenue avec les modèles informatiques de dispersion.

## ► D.2. MODÈLES MATHÉMATIQUES

Nombreux sont les modèles mathématiques mis au point pour prédire l'évolution

## ► D.1. PHYSICAL MODELLING

It is common for tunnel ventilation stacks to be located in city environments which feature nearby buildings of various sizes and configurations. These buildings may affect the flow of air in their immediate vicinity. Alternatively the stacks may be located in areas of complex terrain.

It is the location of the tunnel which is decisive for the location of the stacks and the portals. These locations are most probably in complex terrain or built up areas.

While most advanced computer dispersion models incorporate building wake and terrain effects on the dispersion, uncertainties remain. Wind tunnel modelling may provide a more realistic assessment of the effect of buildings on plume dispersion.

The most significant limitation of physical modelling is that it is not suitable for estimating long-term averages of pollutants, for calm wind situations and for different atmospheric stabilities. Typically a limited range of wind speed and direction scenarios will be modelled to determine the short-term impacts of the project. Real long-term meteorological data (typically one year) is required for predictions of long-term averages. If chemical reactions have to be considered (as for NO<sub>2</sub>) assumptions about the conversion rate have to be made.

A scale model of the project area is constructed and measurements made with a tracer gas to determine the degree of dispersion from the source. The scale of the model will depend on the specifics of the project but a 1/400 scale model in the vicinity of the stacks is common.

Concentration for any particular hour in full scale is likely to be within ± 50% of the values predicted by the wind tunnel model. This is comparable to the quoted accuracy of computer dispersion models.

## ► D.2. MATHEMATICAL MODELS

There are many mathematical models designed to predict the behaviour of



des polluants en provenance d'un tunnel. Parmi ces modèles, on trouve des modèles de base comme des modèles informatiques complexes de la dynamique des fluides (CFD).

Le modèle le plus approprié dépend de toute une série de circonstances. Lorsqu'une information indicative est requise, un simple modèle se révèle plus que suffisant, alors que, plus tard dans le projet, il convient de recourir à un modèle analytique beaucoup plus complexe. Le jugement technique constitue l'approche la plus appropriée pour réaliser un modèle applicable à une situation particulière.

La plupart des modèles de type gaussien de dispersion d'un panache sont plus abordables du point de vue du coût et de la facilité d'utilisation. Mais les restrictions de tels modèles sont bien connues pour l'utilisation dans des zones urbaines, sur des terrains complexes ou dans des environnements caractérisés par des vents faibles.

La plupart des travaux réalisés dans divers pays ont mené à la mise au point de différents modèles spécialement conçus pour prédire la dispersion des polluants par les têtes des tunnels routiers. [3, 4]

Les modèles CFD prédisent la dynamique des fluides autour des objets au moyen d'une grille informatique assez précise pour analyser les plus petits obstacles. La grille peut être de forme régulière ou irrégulière, et son élaboration est capitale pour cartographier le plus précisément possible la dynamique du fluide autour de toutes les zones de l'objet. Une fois la grille construite, l'ordinateur est capable de cartographier de manière précise la pression et la vitesse du fluide sur la surface d'un objet ainsi que tout autour.

Une attention toute particulière doit être portée à la modélisation de la turbulence atmosphérique. Étant donné que les codes CFD les plus courants ont été conçus pour des applications techniques, ils ne sont pas capables de réaliser des calculs fiables sans l'adoption du modèle de turbulence. Si la dispersion au droit des têtes est envisagée, des processus de dispersion tels que ceux illustrés à la **figure D19** doivent être pris en considération.

Le modèle de particules de Lagrange constitue un autre type de modèle. Certaines évolutions de ce modèle calculent le cheminement de chaque particule sur la base d'hypothèses concernant le procédé de dispersion pour émissions aux têtes et par cheminées. Il convient également de ne pas laisser pour compte les problématiques de la flottabilité, de l'interaction de l'air généré par le ventilateur du tunnel avec le vent ambiant, du courant d'air généré par le trafic et de la vitesse de sortie elle-même. [5, 6, 7, 8]

contaminants emitted from tunnels. These models range from simple models to complex computational fluid dynamic models (CFD).

The most appropriate model to use depends on a vast range of circumstances. Where indicative information is required the use of a simple model may be more than adequate, whereas later in the project more complex modelling analysis may be required. The most appropriate approach to modelling in particular circumstances is a question of engineering judgement.

Most of the Gaussian plume-based packages are more approachable in terms of cost as well as ease of use. But the restrictions of such models are well known as they are very restricted in the usage within built-up areas, in complex terrain or under calm wind situations.

Major efforts in different countries have led to the development of different models specifically designed to predict the pollutant dispersion from road tunnel portals. [3, 4]

CFD models predict fluid flow around objects, using a finely spaced computational grid in order to resolve the smallest important obstacles. The grid may be regular or irregular in shape and its construction is very important in order to accurately map the fluid flow over all areas of the object. After grid construction the computer is able to accurately map the pressure and velocity of the fluid flow on the object surface as well as surrounding areas.

Special attention should be taken for the modelling of the atmospheric turbulence. As most of the commonly available CFD codes are designed for technical applications, they are not capable to perform reliable calculations without any adoption of the turbulence model. If portal emissions are concerned dispersion processes like those illustrated in **Figure D19** have to be considered.

A further type of model is known as the Lagrangian particle model. Special developments of this model calculate the pathways of each particle on the basis of assumptions concerning the dispersion process for portal or stack emissions. Special regard is taken of buoyancy, interaction of the tunnel jet with the ambient wind, traffic induced flow, and the exit velocity itself. [5, 6, 7, 8]



L'utilisation inadéquate de modèles et le fait de ne pas vérifier les performances réelles de ventilation constituent deux des erreurs les plus fréquentes lors de la réalisation d'un modèle de calcul des performances de ventilation. Même si l'on utilise le modèle adéquat, il convient d'avoir à disposition les données requises. Le fait d'essayer d'utiliser des modèles sans détenir les données critiques (p. ex. les données météorologiques adéquates) constitue une erreur fréquente.

L'utilisation de n'importe quel modèle requiert une expérience de spécialiste. Sans une telle expérience, les résultats de la modélisation n'ont que peu de valeur. La plupart des erreurs commises proviennent de l'utilisation inadéquate d'un modèle plutôt que d'erreurs dans les modèles eux-mêmes. L'utilisation de modèles très sophistiqués n'est pas indispensable pour collecter des résultats fiables.

Il est essentiel, lors de la réalisation d'une modélisation, de choisir un modèle adéquat, de le valider pour cette étude, de le faire utiliser par un spécialiste, et de vérifier les résultats.

### ► D.3. EXPÉRIENCES AVEC DES TRACEURS

Alors que les observations de la qualité de l'air fournissent des concentrations en polluants à long terme (p. ex. des moyennes annuelles) pour un seul site, les expériences avec traceurs fournissent des informations sur les concentrations en polluants pour de nombreux sites mais pour quelques heures seulement. Les deux méthodes ont en commun des coûts relativement élevés liés aux observations, les rendant dans de nombreux cas dissuasifs pour des études environnementales.

De telles observations ne peuvent servir qu'à fournir des informations pour des tunnels déjà construits et ne constituent donc que des outils d'analyse et non des outils prédictifs. Par contre, les expériences avec traceurs constituent des sources précieuses pour la mise au point et la validation de modèles.

Le tableau page suivante décrit et tire les conclusions de quatre expériences avec traceurs, dont trois ont été menées au Japon et une en Autriche.

Comme le montrent les résultats du **tableau D13, page suivante**, les expériences aux traceurs menées au Japon sont les plus détaillées disponibles à ce jour. Les trois tunnels construits au Japon sont tous implantés sur des terrains plutôt complexes, alors que le tunnel Ehrentalerberg se présente sous la forme d'une section en tranchée dans un paysage relativement plat. De plus, les expériences couvrent presque toutes les stabilités météorologiques et un grand éventail de vitesses et de directions du vent par rapport à l'orientation du flux d'air du tunnel.

The inappropriate use of models and a failure to verify actual ventilation performance are two of the most common errors when using models to manage ventilation performance. Even with an appropriate model it is essential that the requisite data for the model is available. A common mistake is that attempts are made to use models in the absence of critical data (e.g. appropriate meteorological data).

The use of any model demands specialist expertise. Without such expertise modelling results are of little value. Most errors arise from the inappropriate use of models not errors in the models themselves. The use of highly sophisticated models does not necessarily lead to reliable results.

It is essential that where modelling is undertaken an appropriate model is chosen, validated for the purpose, is used by a competent modeller and that the results be verified.

### ► D.3. TRACER EXPERIMENTS

While air quality observations provide long-term pollutant concentrations (e.g. annual means) at only one site, tracer experiments provide pollutant concentrations at many sites but only for a few hours. Both methods have in common the relatively high costs associated with the observations making them in many cases unaffordable for environmental assessment studies.

Clearly, such observations can only be provided for already existing tunnels and hence, are not a predictive but an analysing tool. However, tracer experiments are a highly valuable source for model development and validation.

In the following, three tracer experiments conducted in Japan and one tracer experiment conducted in Austria are outlined including major conclusions obtained from all these experiments.

As can be seen from **Table D13, following page**, the tracer experiments conducted in Japan are the most comprehensive ones available currently. All three Japanese tunnels are situated in a rather complex terrain, while the Ehrentalerberg tunnel lies in a cut-section in almost flat surroundings. In addition, the experiments cover all atmospheric stabilities and a wide range of wind speeds and wind directions relative to the tunnel jet stream orientations.



**TABLEAU D13 RÉCAPITULATIF DES EXPÉRIENCES AUX TRACEURS  
MENÉES AU JAPON ET EN AUSTRALIE**

Tunnel	Ninomiya	Hitachi	Enrei	Ehrentalerberg
Longueur	445 m	2 439 m	1 800 m	3 550 m
Route	Odawara-Atsugi route	Joban autoroute	Chuo autoroute	A2-Suedautobahn
Volume du trafic	30 000 véh./j	24 000 véh./j	32 000 véh./j	15 000 véh./j
Date de l'expérimentés	20/01/94 to 01/02/94	03/02/95 to 09/02/95	23/11/95 to 29/11/95	17/01/01 and 15/02/01
Nbre de sites expérimentés				
NOx	17	-	36	2
SF <sub>6</sub>	64	85	86	26
Nbre d'exp. aux traceurs	21	18	17	7

De ces expériences découlent plusieurs conclusions d'une importance non négligeable :

- des niveaux de concentration très élevés ont pu être observés dans la proximité immédiate des têtes. Par exemple, à une distance de seulement 10 m, les concentrations en polluants varient du simple au double. En ce qui concerne les modèles mathématiques, un haut niveau de précision dans l'espace est donc requis en vue de prendre en considération ces fortes pentes, et les résultats des modèles doivent toujours être analysés et validés en fonction des découvertes réalisées. Cela signifie que les concentrations obtenues suite aux simulations au moyen des modèles ne doivent pas être considérées comme vérité absolue, mais plutôt être interprétées judicieusement ;
- le trafic peut troubler fortement la dispersion des polluants générés dans un tunnel, principalement en créant un flux d'air, surtout quand le tunnel est unidirectionnel. Néanmoins, cet effet semble être limité à une petite zone autour de la tête et de la route, et influence peu la répartition des concentrations à quelques décimètres de là ;
- le flux généré par le ventilateur du tunnel semble se diriger rapidement dans la direction du vent ambiant. La portée du vent généré par le ventilateur le long de la route dépend donc non seulement de la vitesse de sortie et de la géométrie du tunnel, mais aussi de la vitesse et de la direction du vent ambiant. Cette portée a été estimée à 50 m pour du vent directement opposé à la route (dit « vent debout ») et à 200/300 m pour du vent arrière. L'efficacité des ventilateurs à positionnement variable est confirmée par les résultats affichés par les modèles CFD ;

**TABLE D13 SUMMARY OF THE TRACER EXPERIMENTS IN JAPAN AND AUSTRIA**

Tunnel	Ninomiya	Hitachi	Enrei	Ehrentalerberg
Length	445 m	2439 m	1800 m	3550 m
Highway	Odawara-Atsugi road	Joban expressway	Chuo expressway	A2-Suedautobahn
Traffic volume	30,000 veh./d	24,000 veh./d	32,000 veh./d	15,000 veh./d
Experiment date	20/01/94 to 01/02/94	03/02/95 to 09/02/95	23/11/95 to 29/11/95	17/01/01 and 15/02/01
<b>No. Of sampling sites</b>				
NOx	17	-	36	2
SF <sub>6</sub>	64	85	86	26
No. of tracer experiments	21	18	17	7

Several major conclusions resulted from these experiments:

- very high concentration gradients were found in the immediate vicinity of the portals. E.g. over a distance of only 10 m pollutant concentrations varied up to two orders in magnitude. Thus, as far as mathematical models are concerned, a high resolution in space is required to capture those steep gradients and model results should always be judged in the light of these findings. This means that, modelled concentrations should not be taken as absolute truth, but always should carefully be interpreted;
- traffic can substantially disturb the pollution dispersion from road tunnels, mainly in generating a flow when being uni-directional. However, this effect seems to be limited to a small area around the portal and the road, and has little effect on the concentration distribution some decametres away;
- the tunnel jet seems to bend rather quickly towards the ambient wind direction. Hence, the length of the tunnel jet along the street depends not only on the exit velocity and the tunnel geometry, but also on the ambient wind speed and direction. It was found to vary between ~50 m for head winds and 200-300 m for following winds. Bending tunnel jets are also supported by CFD model results;



- des taux élevés de dilution ont été observés au niveau des points de dispersion des tunnels. Par exemple, les taux de dilution du tunnel Ehrentalerberg se situent aux alentours de 1:20 à une distance de 20 m de la tête et de 1:50 à une distance de 80 m de la tête ;
- les effets de la flottabilité semblent jouer un rôle prépondérant dans la dispersion des polluants générés au niveau des têtes d'un tunnel routier et doivent par conséquent être pris en considération lors de l'élaboration d'un modèle mathématique, au moins pour les études au cas par cas.

- high dilution ratios were found for the tunnel exhausts. For instance, at the Ehrentalerberg tunnel dilution ratios were around 1:20 at a distance of 20 m, and 1:50 at a distance of 80 m from the portal;
- buoyancy effects seem to play a major role in the pollutant dispersion from road tunnel portals and should therefore be incorporated in a mathematical model at least when considering single case studies.