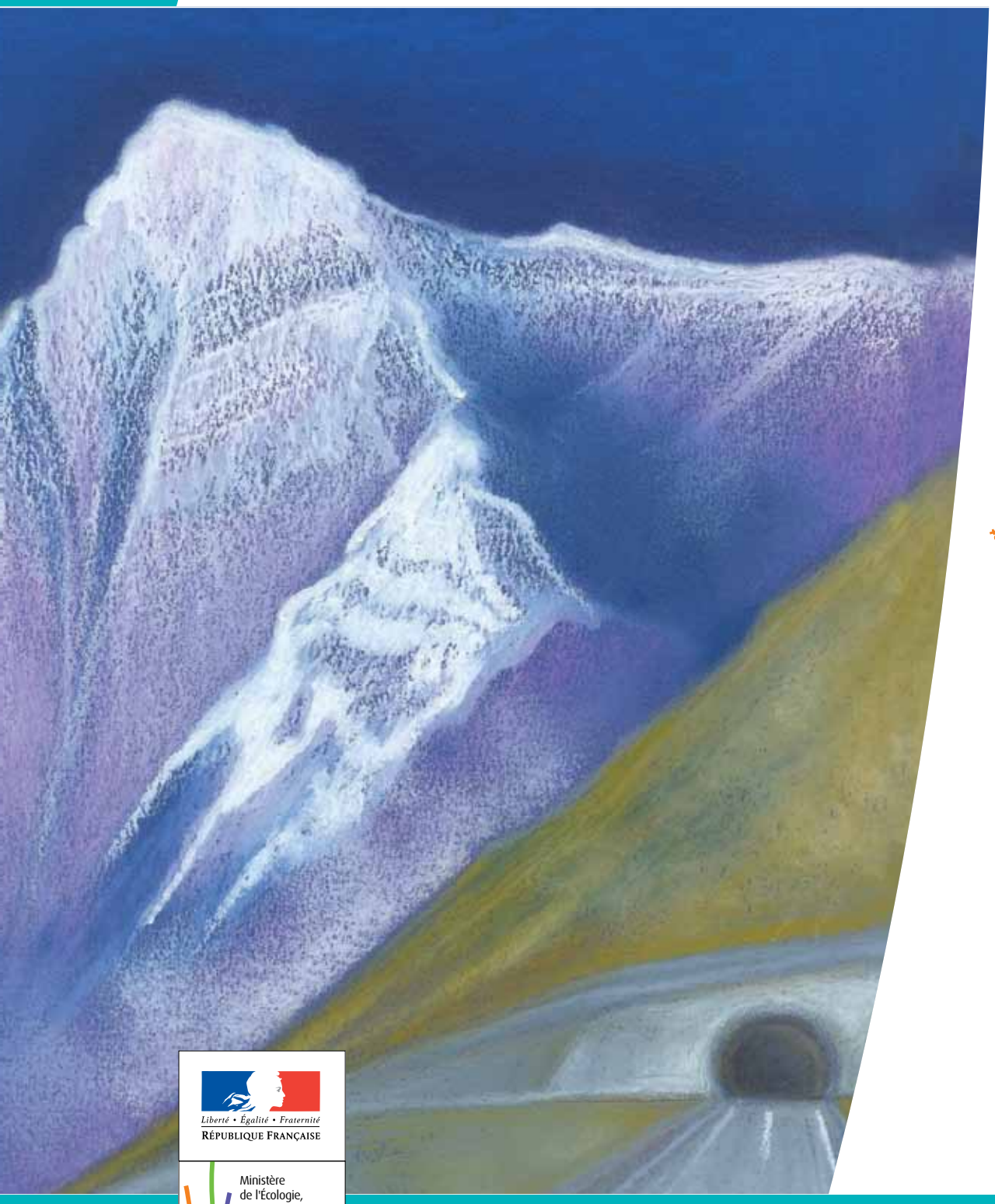
Les guides

LES ÉTUDES D'ENVIRONNEMENT DANS LES PROJETS ROUTIERS VOLETS "AIR" ET "SANTÉ"

LE CAS SPÉCIFIQUE DES TUNNELS



Ressources, territoires, habitats et logement
Énergies et climat
Développement durable
Prévention des risques
Infrastructures, transports et mer

Présent pour l'avenir

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement

octobre 2011

Centre d'Études des Tunnels

www.cetu.developpement-durable.gouv.fr

AVERTISSEMENT

Les guides sont l'aboutissement de travaux de synthèse, de réflexion méthodologique, de recherche, de retour d'expérience, menés ou commandités par le CETU. Ils ont vocation à servir de référence pour la conception, la réalisation ou l'exploitation des ouvrages souterrains. Comme tout état de l'art à un moment donné, un guide peut toutefois devenir un jour obsolète, soit du fait de l'évolution des techniques ou des réglementations, soit par la mise au point de méthodes plus performantes.

LES ÉTUDES D'ENVIRONNEMENT DANS LES PROJETS ROUTIERS VOLETS "AIR" ET "SANTÉ"

LE CAS SPÉCIFIQUE DES TUNNELS

octobre 2011

Centre d'Études des Tunnels
25, avenue François Mitterrand
Case n°1
69674 BRON - FRANCE
Tél. 33 (0)4 72 14 34 00
Fax. 33 (0)4 72 14 34 30

cetu@developpement-durable.gouv.fr
www.cetu.developpement-durable.gouv.fr

TABLE DES MATIÈRES

Introduction 5

1 Les tunnels et leur ventilation 7

1.1 Impact sur la qualité de l'air des projets routiers : pourquoi étudier les tunnels de façon spécifique ? 8
1.2 Les différents types de voies routières couvertes, définition d'un tunnel 9
1.3 Les situations accidentelles 11
1.4 Les modes de rejet de l'air vicié par les tunnels 11
1.5 Les ouvertures 12
1.6 Présentation des systèmes de ventilation 13
1.7 Le traitement de l'air en tunnel 15
1.8 Quelques règles à connaître 16

2. Les études amont 19

2.1 Les études d'opportunité 20
2.2 Les études préliminaires 21

3 La réglementation et les polluants à considérer 23

3.1 Air intérieur et air extérieur des tunnels : deux réglementations distinctes 24
3.2 Air extérieur aux tunnels : la loi sur l'air comme texte de référence 24
3.3 Air intérieur aux tunnels : les niveaux admissibles 25
3.4 Les polluants à retenir dans les études d'impact 26
3.5 Lien entre opacité, fumées et particules en suspension 27
3.6 Les oxydes d'azote 28
3.7 Les unités de mesure des polluants 28
3.8 Tableau de synthèse des niveaux réglementaires ou recommandés 30

4 Les outils d'évaluation, de l'état initial au risque sanitaire 31

4.1 L'établissement de l'état initial 33
4.2 Le calcul des émissions polluantes 34
4.3 Le calcul de la dispersion des polluants au voisinage des tunnels 36
4.4 Le contenu du volet sanitaire 41

5 Le contenu des études d'opportunité 45

5.1 Estimation des concentrations aux têtes 46
5.2 Évaluation sommaire des caractéristiques du rejet 47
5.3 Prise en compte de la dilution 48
5.4 Cas particulier des oxydes d'azote 49
5.5 Conclusion quant à la sensibilité du projet 49
5.6 Exemple d'application 51

6 Le contenu des études préliminaires - comparaison des variantes 53

6.1 Les principes de la méthode proposée 54
6.2 Calcul des émissions polluantes et répartition entre les deux têtes 55
6.3 Calcul de dispersion des polluants gazeux 55
6.4 Calcul de l'indicateur d'exposition de la population à la pollution gazeuse (IPP) 56
6.5 Exemple d'application 57
6.6 Conclusion 58

7 Le contenu des études préliminaires - étude de la variante proposée 59

7.1 Prise en compte du niveau d'étude 60
7.2 Principes d'évaluation 60
7.3 Conclusions 61

Glossaire et liste des acronymes 62

Bibliographie thématique 66

Annexe 69

INTRODUCTION

Pour franchir des obstacles naturels ou pour améliorer l'intégration des projets routiers, en particulier en milieu urbain, la construction de tunnels est une solution pertinente. Il faut néanmoins se poser la question de leurs possibles impacts, en particulier sur la qualité de l'air.

Ce guide propose une méthodologie d'étude des effets des tunnels sur la qualité de l'air lors de l'élaboration des projets routiers, au stade des études amont. Les phases d'étude traitées sont les études d'opportunité et les études préliminaires, jusqu'à l'élaboration de l'étude d'impact et du dossier d'enquête préalable à la déclaration d'utilité publique.

L'article L122-3 CE du *Code de l'Environnement [30]* précise que l'étude d'impact comprend au minimum *« une description du projet, une analyse de l'état initial de la zone susceptible d'être affectée et de son environnement, l'étude des effets du projet sur l'environnement ou la santé humaine, y compris les effets cumulés avec d'autres projets connus, les mesures proportionnées envisagées pour éviter, réduire et, lorsque c'est possible, compenser les effets négatifs notables du projet sur l'environnement ou la santé humaine ainsi qu'une présentation des principales modalités de suivi de ces mesures et du suivi de leurs effets sur l'environnement ou la santé humaine ».*

Puisque les tunnels constituent des sources très localisées de pollution dont la dilution n'est pas immédiate, la présence de riverains qui seraient soumis en permanence à ces nuisances justifie que l'on s'interroge sur la qualité de l'air au voisinage de ces ouvrages.

Dans bien des cas, il n'est pas nécessaire d'engager d'étude spécifique avant la déclaration d'utilité publique. Ces cas de figure sont les plus fréquents, et ce guide a pour premier objectif de donner les moyens de les détecter à des projeteurs routiers non-spécialistes des tunnels. Pour ces cas, le guide fournit les éléments qui permettront au projeteur d'expliquer pourquoi l'enjeu est faible, car l'absence d'étude spécifique ne signifie pas l'absence de justification et d'information vis-à-vis du public.

Dans d'autres cas, un projet de tunnel peut être sensible, et une étude spécifique doit être conduite. Ce guide propose pour cela une méthodologie adaptée à chaque phase d'élaboration du projet, depuis les études d'opportunité jusqu'à l'étude de la variante proposée à l'enquête publique.

Pour traiter les stades d'étude ultérieurs, et pour les études en phase « Projet » notamment, on se reportera au *Guide pour la prise en compte de la qualité de l'air au voisinage des tunnels routiers [2].*

Le présent guide a été rédigé pour être utilisé dans le cadre de projets neufs de tunnel ou de tranchée couverte. Bien que le cas des tunnels anciens ne soit pas spécifiquement abordé, la méthodologie exposée peut être adaptée sans difficultés particulières à leur étude, par exemple dans le cas d'importants travaux nécessitant la réalisation d'une étude d'impact.

Ce document peut être considéré comme un complément spécialisé à la *Note méthodologique*[(1)] *sur l'évaluation des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact routières de février 2005 [3] et à son Annexe technique [4],* publiées par le SETRA et le CERTU.

Comme ces deux documents, ce guide constitue une aide à l'application des principes édictés dans le *Code de l'Environnement [30]*, dans la *circulaire d'application n° 98-36 du 17 février 1998 [1], dans le décret n° 2003-767 du 1er août 2003 modifiant le décret n° 77-1141 du 12 octobre 1977 sur les études d'impact [6], dans la circulaire du Ministère de la Santé du 3 février 2000 relative au guide de lecture et d'analyse du volet sanitaire des études d'impact [7], et dans la circulaire du Ministère de la Santé du 11 avril 2001 relative à l'analyse des effets sur la santé dans les études d'impact [8].*

Ce guide a été rédigé par un groupe de travail réunissant le CETU, le SETRA, le CERTU, le CETE de Lyon et le CETE Méditerranée, avec des contributions du CEREA.

(1) Cette Note est en cours de révision. Son évolution future pourrait nécessiter une application adaptée de ce guide, en attendant qu'il soit lui-même mis à jour en conséquence.

1. LES TUNNELS ET LEUR VENTILATION

1.1 IMPACT SUR LA QUALITÉ DE L'AIR DES PROJETS ROUTIERS : POURQUOI ÉTUDIER LES TUNNELS DE FAÇON SPÉCIFIQUE ?

La pollution de l'air produite par un tunnel routier est de nature identique à celle provoquée par toute voie routière. Un tunnel ne crée pas de pollution. La quantité totale d'émissions polluantes, en grande partie proportionnelle au nombre de véhicules et à la distance parcourue, reste inchangée, que l'on soit en tunnel ou pas.

Les effets possibles d'un tunnel sur la quantité des émissions sont donc minimes, limités aux conséquences d'une éventuelle modification des conditions de circulation (vitesse pratiquée par les véhicules ou profil en long) et en général favorables (évitement du franchissement d'un col en montagne sollicitant fortement les moteurs par exemple).

Si les tunnels ont peu d'impact sur les émissions, ils en ont sur les concentrations, car ils conduisent à des rejets polluants plus localisés, tout en permettant une stratégie d'évitement des zones sensibles par un tracé judicieux. C'est la raison pour laquelle les tunnels doivent être étudiés de façon spécifique.

1.1.1 Un double aspect : air intérieur et air extérieur

Un tunnel constitue un espace semi-confiné à l'intérieur duquel la dilution est moindre que sur les routes à l'air libre. Ceci conduit à des niveaux de pollution plus forts au-dessus de la chaussée et à une accumulation de la pollution en sortie de tunnel.

L'étude de la qualité de l'air d'un tunnel doit donc porter sur l'évaluation des niveaux de pollution tant à l'intérieur du tunnel qu'à ses abords immédiats.

1.1.2 L'air intérieur des tunnels : une étude menée après la déclaration d'utilité publique, au stade du Projet

L'étude détaillée des niveaux de concentration à l'intérieur des tunnels ne relève pas du stade des études antérieures à l'enquête d'utilité publique, car dans tous les cas, des solutions techniques permettent de garantir de faibles niveaux de pollution intérieure, sans que soit remise en cause la faisabilité du projet faute d'une solution appropriée.

Un pré-dimensionnement simple de la ventilation sanitaire est réalisé à ce stade, mais son étude détaillée est menée lors de l'établissement du Projet d'Ouvrage d'Art. Elle a pour but de dimensionner le système de ventilation du tunnel afin de garantir une bonne qualité de l'air à l'intérieur du tunnel, conforme à la réglementation (voir *Dossier pilote « Ventilation »* du CETU [9]).

Au stade amont des études, il faut toutefois être capable de connaître les caractéristiques principales du rejet polluant (quantité émise et vitesse d'éjection), à partir desquelles seront évalués les impacts dans l'air ambiant.

1.1.3 L'air extérieur aux tunnels : un critère à prendre en compte dès le stade amont des études pour certains projets complexes

Dès les phases préalables à la déclaration d'utilité publique, la présence d'un tunnel dans un projet routier peut conduire à une étude spécifique de son impact sur la qualité de l'air à ses abords immédiats.

Les études de tracé doivent bien sûr avoir pour premier objectif de conduire à une solution apportant un gain en termes de qualité de l'air. Plus précisément, il faudra rechercher une solution telle que les quantités de polluants qui auraient été émises à proximité de zones sensibles en l'absence de tunnel soient grâce à lui rejetées dans des lieux non sensibles, ou en tout cas moins sensibles (cas de figure courant des tunnels en milieu urbain).

Mais les rejets en zones sensibles ne peuvent pas toujours être évités. Dans certains cas, il est alors nécessaire d'engager une étude spécifique, tant pour vérifier la faisabilité du projet, c'est-à-dire s'assurer que ses impacts sont acceptables, que pour apporter des éléments à la comparaison des variantes et justifier les choix réalisés. Ce guide propose une méthodologie simple pour mener de telles études.

1.2 LES DIFFÉRENTS TYPES DE VOIES ROUTIÈRES COUVERTES, DÉFINITION D'UN TUNNEL

L'objet de ce guide est de fournir une méthode d'évaluation des effets provoqués par la canalisation des émissions polluantes qui se produit dès lors qu'une route n'est pas à l'air libre.

Tous les ouvrages qui contribuent à ce phénomène de canalisation de la pollution sont traités dans le présent document, où le terme « tunnel » a un sens très large. Il désigne toutes les voies routières couvertes, quels que soient leur mode de construction et leur position par rapport au terrain naturel. Il peut s'agir d'ouvrages creusés, d'ouvrages immergés, de tranchées couvertes ou de couvertures non transparentes à l'air. La phase chantier de la réalisation de ces ouvrages peut avoir des impacts en termes de qualité de l'air, notamment des soulèvements de poussières, qui ne sont pas abordés dans le présent guide. Pour traiter cette question, on se référera au *Dossier Pilote « Environnement »* du CETU [11].

Les couvertures partielles qui présentent des surfaces d'ouverture supérieures à 1 m² par voie de circulation et par mètre linéaire [(2)] (transparences aérauliques par exemple) ne sont pas évoquées ici, car leur comportement est plus proche de celui d'ouvrages à l'air libre.

Les couvertures partielles qui présentent des surfaces d'ouverture inférieures à 1 m² par voie de circulation et par mètre linéaire ne sont pas non plus traitées dans ce document, car même s'il ne peut pas être assimilé à celui d'ouvrages ouverts, leur comportement aéraulique n'est pas identique à celui des tunnels. Un certain nombre d'éléments présentés ici peuvent toutefois sans difficulté être transposés pour l'étude de tels ouvrages.

1.2.1 Les tunnels creusés

Au sens strict, les tunnels sont des ouvrages souterrains creusés dans le sol. Le choix de la technique de creusement est lié à la géologie et aux caractéristiques géotechniques du site, mais prend aussi en compte les contraintes extérieures, comme par exemple la présence d'habitations, qui pourra orienter vers des techniques minimisant les nuisances en phase chantier.

Les méthodes de creusement sont nombreuses (voir *Dossier pilote « Génie civil »* du CETU *[10]*) :

- parmi les méthodes les plus simples, citons le creusement à l'explosif, très performant dans tous les terrains rocheux, l'abattage par machine à attaque ponctuelle, engin constitué d'un bras muni à son extrémité d'une tête rotative équipée d'outils de foration et de creusement, ou encore de simples pelles et brises-roches ;

Photo 1 - Creusement par méthode traditionnelle

- dans les terrains de mauvaise tenue, il faut avoir recours à des techniques plus sophistiquées. Il s'agit soit d'améliorer les caractéristiques du terrain en place (drainage, injection, congélation, etc.) pour lui donner une meilleure tenue intrinsèque avant l'excavation, soit de construire des pré-soutènements (boulonnage du front de taille, réalisation d'une prévoûte, etc.) ;
- il y a une trentaine d'années sont apparus les tunneliers, machines destinées à réaliser des tunnels en assurant des fonctions étendues pouvant aller de l'excavation à la pose du revêtement final. Leur utilisation, très efficace en terrain meuble, s'est développée très rapidement.

Photo 2 - Tunnelier de creusement du tunnel du Mont Sion (A41)

(2) Définition donnée par l'Instruction technique du 25 août 2000 [13]

1.2.2 Les tranchées couvertes

Les tranchées couvertes se différencient des tunnels creusés par leur technique de construction, qui n'est pas souterraine, mais à l'air libre : les déblais sont en général exécutés à ciel ouvert.

Les tranchées couvertes sont essentiellement réalisées en milieu urbain, pour réduire les nuisances sonores et restituer la continuité du tissu urbain. Elles sont envisageables lorsque le profil en long du projet fait apparaître une faible couverture au-dessus de la voûte et que le site est libre de toute construction.

Parfois, les tranchées couvertes sont le simple résultat de la couverture de voiries existantes.

Une fois en exploitation, le fonctionnement aéraulique des tranchées couvertes est, la plupart du temps, identique à celui des tunnels, avec des rejets atmosphériques en quelques points localisés (têtes et bouches d'extraction).

Photo 3 - Tranchée couverte en cours de réalisation (traversée souterraine de Toulon)

1.2.3 Les tunnels immergés

Pour les traversées sous-fluviales ou sous-marines, on peut utiliser la technique des tunnels immergés, qui consiste à déposer des caissons, de section la plus souvent rectangulaire, au fond du fleuve ou de la mer.

Photo 4 - Caissons en construction

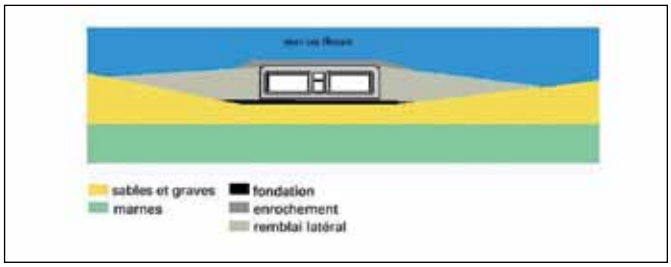


Illustration 1 - Caissons immergés et remblayés en fond de mer ou de rivière

L'avantage de cette technique est qu'elle conduit à la solution de longueur la plus faible car le débouché est situé en rive du fleuve ou de la mer. Mais cet avantage peut se transformer en inconvénient si de fortes contraintes d'occupation du sol sont présentes à l'endroit prévu pour le débouché. Cette technique a aussi parfois l'inconvénient de diminuer le tirant d'eau disponible pour la navigation.

1.3 LES SITUATIONS ACCIDENTELLES

Les situations accidentelles, surtout du fait de leur rareté, ont un impact très limité sur la qualité de l'air extérieur et la santé des riverains. Seuls peuvent faire exception certains accidents de Transports de Marchandises Dangereuses (TMD) ayant pour conséquence le relâchement de gaz toxiques. Ce point est traité dans le cadre des études d'analyse des risques (cf. fascicule 3 du *Guide des dossiers de sécurité* du CETU [12]).

La sécurité des usagers est pour sa part traitée à travers le *Code de la voirie routière (Titre I^er^ Chapitre VIII) [25]* et de plusieurs textes d'accompagnement qui définissent les modalités administratives et techniques auxquelles doivent se soumettre les tunnels routiers de plus de 300 mètres de longueur.

Parmi ces textes, l'*Instruction technique du 25 août 2000 [13]* précise dans le détail et thème par thème, toutes les dispositions techniques à prévoir (dispositions de génie civil, équipements de sécurité, comportement au feu et exploitation). Bien que réglementairement applicable aux seuls tunnels neufs de l'État, elle constitue le référentiel technique utilisé pour la définition du niveau de sécurité des tunnels de l'État existants et pour les tunnels des collectivités, neufs ou existants.

Le dossier de sécurité (cf. le *Guide des dossiers de sécurité* du CETU [12]) est une pièce maîtresse. Il rassemble tous les documents, descriptions et études indispensables à la bonne compréhension du fonctionnement et de la sécurité de l'ouvrage à chaque étape de sa vie.

1.4 LES MODES DE REJET DE L'AIR VICIÉ PAR LES TUNNELS

La spécificité des tunnels par rapport aux routes à l'air libre tient à l'existence de rejets localisés d'air pollué. Trois lieux de rejet peuvent être distingués :

- les têtes du tunnel,
- les systèmes d'extraction,
- les ouvertures éventuelles dans la structure de l'ouvrage.

1.4.1 Les têtes de tunnel

Les têtes, parfois aussi appelées portails, matérialisent l'entrée et la sortie du tunnel. Elles constituent les points de rejet naturels des émissions polluantes des tunnels quand aucun dispositif spécifique n'est mis en place. Lorsque des bretelles sont branchées sur un tunnel, leur extrémité libre constitue une tête à part entière.

Illustration 2 - Rejet de la pollution par les têtes du tunnel

Les rejets d'air par les têtes sont complexes, et la dispersion est plus ou moins rapide selon la configuration du site. En milieu urbain, les sorties en trémie, en tranchée, ou entre des façades proches d'immeubles (« rues canyon ») constituent des conditions défavorables à une bonne dispersion, pour certaines conditions de vent. C'est ce type de rejet qui génère le plus de risques de concentrations élevées au niveau des habitations.

1.4.2 Les systèmes d'extraction

Selon les cas, les systèmes d'extraction d'air du tunnel vers le milieu extérieur sont destinés à être utilisés :

- uniquement pour le désenfumage en cas d'incendie,
- uniquement pour l'extraction de l'air pollué en exploitation courante,
- tant pour le désenfumage que pour l'extraction de l'air pollué.

Généralement, les systèmes d'extraction sont prévus pour la sécurité vis-à-vis des incendies, afin d'évacuer les fumées du tunnel.

Plus rarement, les systèmes d'extraction sont utilisés pour éviter des vitesses d'air en tunnel trop élevés, ou pour limiter la sortie de polluants par les têtes lorsqu'elles sont implantées dans des lieux très sensibles.

A l'extrémité du système d'extraction se trouve généralement une cheminée, appelée cheminée de ventilation, cheminée d'extraction ou cheminée de rejet.

Illustration 3 - Rejet de la pollution par une cheminée de ventilation

En milieu urbain et en présence d'habitations proches, il est parfois nécessaire de prévoir des cheminées relativement hautes pour permettre une surélévation du panache de pollution et en diminuer les impacts.

Les cheminées sont toujours associées à un système de ventilation mécanique qui peut être aussi bien longitudinal que transversal (cf. 1.6.2). Elles peuvent être envisagées pour tous les types de tunnels, y compris les tranchées couvertes.
L'implantation des cheminées, leur hauteur et la vitesse des rejets doivent être étudiées pour garantir une dispersion convenable de la pollution rejetée.

La décision de construire une cheminée de rejet doit être prise avant l'enquête publique, afin que cette caractéristique soit connue du public et inscrite dans la déclaration d'utilité publique.

Toutefois, au stade des études préalables à la déclaration d'utilité publique, la hauteur et la vitesse des rejets ne peuvent pas faire l'objet d'études approfondies, celles-ci nécessitant un dimensionnement très précis de la ventilation. A ce stade, il faut veiller à ne pas sous-évaluer la hauteur d'une cheminée dont la modification ultérieure pourrait entraîner un risque de non conformité du projet au dossier de déclaration d'utilité publique. Pour la même raison, lorsqu'une station est prévue à des fins de désenfumage, mais que l'on souhaite conserver la possibilité de modifier son usage en vue de l'extraction de la pollution, même de manière intermittente, il faut le mentionner dans l'étude d'impact.

Des études architecturales et paysagères intégrées à la phase de conception du tunnel permettent d'aboutir à une bonne intégration des stations de ventilation et de leurs dispositifs d'extraction. Un exemple d'insertion en milieu urbain est donné sur la photo ci-dessous, pour l'unité de ventilation UV2 du tunnel de Toulon.

Photo 5 - Unité de ventilation UV2 du tunnel de Toulon

1.5 LES OUVERTURES

Dans le cas de tunnels proches de la surface, les rejets polluants peuvent se produire de façon naturelle du tunnel vers l'atmosphère à travers les ouvertures présentes dans les parois, sans recours à des moyens mécaniques. Outre la sortie des polluants, les ouvertures permettent l'entrée d'air frais dans le tunnel.

Il peut s'agir par exemple de transparences aérauliques, de zones en damier phonique, ou d'une succession de tranchées couvertes séparées par de courts tronçons à l'air libre.

Illustration 4 - Rejet de la pollution par des transparences aérauliques

Les ouvertures sont disposées latéralement ou en plafond ; leur configuration et leur implantation doivent être étudiées pour ne pas créer une pollution locale inacceptable, en intégrant toutes les thématiques les concernant, et en particulier les aspects acoustiques.

Il faut distinguer les véritables transparences aérauliques, capables d'évacuer l'air vicié en permanence, des transparences aérauliques « incendie », fermées en exploitation normale, et qui ne sont ouvertes qu'en cas d'incendie. Ces dernières sont toutefois de moins en moins utilisées, car en l'absence de tout moyen de ventilation mécanique permettant de forcer l'extraction des fumées, il n'est pas garanti que leur ouverture aura un effet bénéfique. Un autre inconvénient est le manque de fiabilité de ces systèmes lourds, rarement manœuvrés, mais qui doivent conserver une excellente mobilité en cas de besoin.

1.6 PRÉSENTATION DES SYSTÈMES DE VENTILATION

1.6.1 Le rôle de la ventilation

La ventilation en tunnel a pour objectif, en situation normale d'exploitation, de garantir des niveaux de pollution faibles :

- à l'intérieur du tunnel, en y assurant la dilution des polluants émis ;
- à l'extérieur du tunnel, en contribuant à une diminution des concentrations (voir le *dossier pilote « Ventilation » [9]).*

On parle alors de ventilation sanitaire.

La ventilation a aussi un rôle primordial en cas d'incendie, d'abord pour mettre les usagers à l'abri des fumées le temps de leur évacuation, puis pour permettre l'intervention des services de secours et de lutte contre l'incendie. On parle alors de ventilation de désenfumage. Ce document, qui a pour objectif de traiter les impacts sur l'environnement des tunnels du point de vue de la pollution atmosphérique, ne s'intéressera pas à la ventilation en cas d'incendie. Ce domaine, qui fait l'objet d'une réglementation très précise, doit être étudié en détail lors des phases postérieures à la déclaration d'utilité publique.

Dans le cas de tunnels ventilés mécaniquement, les exigences de désenfumage en cas d'incendie s'avèrent souvent dimensionnantes. Il en résulte que les performances du système vont au-delà du strict besoin de ventilation sanitaire. En exploitation courante, cette marge peut être utilisée pour garantir le respect des contraintes environnementales du point de vue de la qualité de l'air, même en cas de scénario de pollution extrêmement pénalisant et nettement plus pessimiste que les hypothèses de dimensionnement. Dans de tels cas, l'abaissement des niveaux de concentration à l'intérieur du tunnel peut être obtenu par simple élévation du régime de ventilation, dès lors que les capteurs de pollution placés à l'intérieur du tunnel mesurent des niveaux trop élevés. Cette marge de manœuvre peut aussi être utilisée dans le but d'abaisser les niveaux aux abords du tunnel. Dans ce cas, la difficulté est d'identifier ces situations critiques, en l'absence de capteurs permanents à l'extérieur du tunnel. On verra plus loin que l'on peut établir, par des méthodes simples, un lien approximatif entre le niveau de concentration en sortie de tunnel et le niveau à une distance donnée (voir 5.3).

1.6.2 Les types de ventilation en tunnel

Les types de ventilation les plus courants sont présentés dans les paragraphes qui suivent.

1.6.2.1 La ventilation naturelle

On parle de ventilation naturelle lorsqu'aucun système mécanique dédié à la ventilation n'est mis en place dans un tunnel. Les deux facteurs principaux qui contribuent à la ventilation naturelle en créant un courant d'air longitudinal sont :

- l'effet du trafic qui se traduit par le pistonnement (courant d'air dans le sens du trafic) et l'augmentation des niveaux de turbulence ;
- les conditions météorologiques à chacune des têtes, ou plus précisément les différences de conditions météorologiques entre les deux têtes (pression atmosphérique, température ou vent) qui peuvent être à l'origine de courants d'air importants dans un tunnel.

Par définition, les moyens naturels de ventilation ne sont pas maîtrisés par l'exploitant du tunnel. Ils ne sont suffisants pour assurer la dilution des polluants que dans le cas de tunnels courts.

1.6.2.2 La ventilation mécanique longitudinale

Le système longitudinal consiste à pousser la masse d'air du tunnel vers l'extérieur, sans apport d'air frais autrement que par les têtes. L'air vicié est presque toujours évacué directement par les têtes. Rarement, il est prévu des extractions ponctuelles (extractions massives).

Illustration 5 - Système longitudinal (les flèches représentent le mouvement de l'air)

La poussée est créée par des ventilateurs, généralement appelés accélérateurs ou ventilateurs de jets, positionnés en sous-face de la voûte du tunnel.

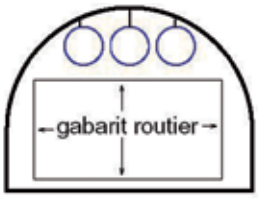


Illustration 6 - Exemple d'implantation de ventilateurs en voûte de tunnel

1.6.2.3 La ventilation mécanique transversale

Le système de ventilation mécanique transversal consiste à injecter et / ou extraire de l'air à intervalles réguliers dans le tunnel. On parle de système transversal pur lorsque le débit extrait est égal au débit insufflé, de système semi-transversal lorsqu'il n'y a pas d'extraction d'air vicié ou pas d'insufflation d'air frais, et de système transversal partiel lorsque le débit d'extraction est plus faible que le débit d'insufflation (la terminologie précise des différents systèmes de ventilation transversaux est détaillée dans le *Dossier pilote « Ventilation » [9]).*

Illustration 7 - Système transversal (les flèches représentent le mouvement de l'air, air frais en bleu, air vicié en rouge)

La ventilation mécanique transversale impose généralement l'implantation de gaines de ventilation pour le soufflage de l'air frais et pour l'extraction de l'air vicié. Ces gaines peuvent être positionnées en plafond, sous la chaussée ou latéralement.

1.6.2.4 Exemples de profils en travers de tunnels ventilés transversalement :

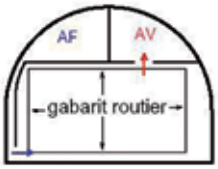


Illustration 8 - Gaines en plafond (AF = air frais, AV = air vicié)

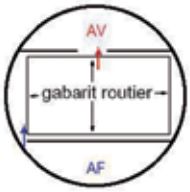


Illustration 9 - Gaine d'air frais sous chaussée et gaine d'air vicié en plafond

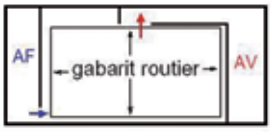


Illustration 10 - Gaines latérales

Pour ce type de ventilation, les ventilateurs sont souvent placés dans une ou plusieurs stations de ventilation (cf. Glossaire et liste des acronymes) situées à l'extrémité des gaines de transit de l'air frais et de l'air vicié. Parfois, dans le cas de tranchées couvertes, les ventilateurs sont directement placés en plafond, au niveau de bouches d'extraction ou d'insufflation régulièrement espacées sur la toute la longueur de l'ouvrage. Dans ce cas, il n'y a pas de gaines de ventilation.

1.6.3 Choix du type de ventilation et conséquences sur la localisation des rejets

Pour étudier l'impact d'un tunnel sur la qualité de l'air, il est nécessaire de connaître la localisation des rejets, qui dépend étroitement du type de ventilation (cf. 1.6.2).

Au stade amont des études routières, les études précises de ventilation concernant les tunnels n'ont pas forcément été engagées et il n'est donc pas toujours possible de s'y référer. Pour traiter le cas des tunnels dans les études d'impact, on peut toutefois retenir les principes généraux suivants, et les conséquences qui en découlent :

> **Dans la plupart des cas, les tunnels inférieurs à 300 mètres de longueur ne sont pas ventilés mécaniquement, mais seulement de manière naturelle.**
Pour un tube de longueur inférieure à 300 mètres à l'intérieur duquel la circulation se fait dans un seul sens, on peut considérer que les rejets polluants sont entièrement localisés à la tête de sortie (tête aval), sous l'effet du pistonnement des véhicules. Dans le cas courant d'un tunnel comportant deux tubes unidirectionnels, on considère qu'il y a une répartition des émissions entre chaque tête de sortie de tube, donc entre les deux côtés du tunnel.
En cas de circulation bidirectionnelle dans un seul tube, on peut faire l'hypothèse simplificatrice que les rejets se répartissent de façon égale entre les deux têtes, dès lors que l'on s'intéresse à une période suffisamment longue pour couvrir des conditions d'influence aéraulique variées (trafic et météo).

> **Pour les tunnels plus longs nécessitant une ventilation mécanique, la conception du système de ventilation repose sur l'utilisation maximale des effets de pistonnement créés par la circulation des véhicules.**
Pour les tunnels à circulation unidirectionnelle, ce principe conduit souvent à retenir un système longitudinal, dont les effets peuvent directement venir renforcer ceux du pistonnement, si ce dernier est insuffisant. On peut alors considérer que les rejets sont entièrement localisés à la tête de sortie des véhicules.

A partir d'une certaine longueur, il peut toutefois être nécessaire d'avoir recours à une cheminée d'extraction pour maintenir des niveaux de pollution acceptables en tunnel. Une certaine partie des rejets se fait alors au niveau de la cheminée.
En cas de circulation unidirectionnelle, le caractère urbain peut toutefois conduire à choisir un système de ventilation de type transversal, mieux adapté au désenfumage lorsqu'il y a des risques de congestion et donc de présence de véhicules bloqués à l'aval d'un incendie. Dans ce cas, en première approximation, on peut néanmoins considérer que c'est l'effet naturel de pistonnement qui dicte le sens d'écoulement de l'air dans le tunnel, et on peut alors faire l'hypothèse que les rejets sont entièrement localisés à la tête de sortie des véhicules, ce qui revient à supposer qu'il y a une répartition des émissions entre chaque tête de sortie, donc entre les deux côtés du tunnel, dans le cas courant d'un tube par sens de circulation.

> **Les règles de sécurité imposent souvent le recours à la ventilation de type transversal en cas de circulation bidirectionnelle.**
Lorsque la circulation est bidirectionnelle dans un tube, le choix du type de ventilation est étroitement lié au caractère urbain ou non urbain du tunnel. Pour tous les tunnels urbains dépassant 300 mètres de longueur et pour les tunnels non urbains les plus longs, c'est le système de ventilation transversal qui est requis, essentiellement pour des raisons de désenfumage.
Pour tous ces cas de circulation bidirectionnelle, quel que soit le système de ventilation envisagé et à condition qu'il n'y ait pas d'extraction prévue pour les besoins sanitaires, on pourra faire l'hypothèse simplificatrice que les rejets se répartissent de façon égale entre les deux têtes, dès lors que l'on s'intéresse à une période suffisamment longue pour couvrir des conditions d'influence aéraulique variées (trafic, météo).

Les quelques principes généraux qui ont été donnés ci-dessus constituent une approche très simplifiée. Pour toute étude de ventilation plus précise, il convient de se reporter aux dispositions réglementaires de ventilation définies par l'instruction technique annexée à la circulaire 2000-63 *[13]* pour les tunnels de longueur supérieure à 300 mètres, qui sont aussi présentées dans le *Dossier pilote « Ventilation » [9].*

1.7 LE TRAITEMENT DE L'AIR EN TUNNEL

Le traitement de l'air est une solution souvent évoquée pour réduire les impacts des rejets des tunnels. Il apparaît d'autant plus séduisant que l'air vicié est d'ores et déjà canalisé par le tunnel ou dans les gaines d'extraction.

Deux types de traitement doivent être distingués en fonction de la nature des polluants :

- la filtration, applicable aux particules en suspension et aux fumées,
- le traitement chimique ou biologique, pour certains polluants gazeux considérés les plus nocifs parmi ceux contenus dans les émissions des véhicules, comme par exemple les oxydes d'azote.

La filtration des fumées en tunnel est une technique mise en œuvre depuis une trentaine d'années au Japon où elle est utilisée pour garantir une bonne qualité de l'air intérieur de certains tunnels dont le débit d'insufflation est faible, et en Norvège où se posent des problèmes particuliers de pollution particulaire liés à l'abrasion des chaussées par les pneus à clous. La filtration demeure néanmoins une solution technique lourde et onéreuse. Seulement une soixantaine de systèmes de filtration en tunnel ont été réalisés dans le monde.

Le traitement des polluants gazeux des tunnels est plus récent. Les réalisations dans le monde sont rares et relèvent encore souvent de l'expérimentation.

Pour plus détails, on pourra se reporter à la note du CETU *« Le traitement de l'air des tunnels routiers -État des connaissances sur les études et les réalisations » [16].*

De telles techniques peuvent constituer des solutions d'accompagnement, en sachant toutefois que le simple recours à une ou plusieurs cheminées d'extraction, sans traitement, permet de diminuer suffisamment l'impact des rejets, y compris dans les cas les plus difficiles.

1.8 QUELQUES RÈGLES À CONNAÎTRE

1.8.1 Les effets de la ventilation sur les niveaux de concentration en tunnel

La vitesse d'écoulement de l'air et les concentrations en polluant dans un tunnel sont liées au système de ventilation. Leur évolution en fonction de la distance à la tête d'entrée est donnée dans les paragraphes qui suivent[3].

NOTATIONS UTILISÉES

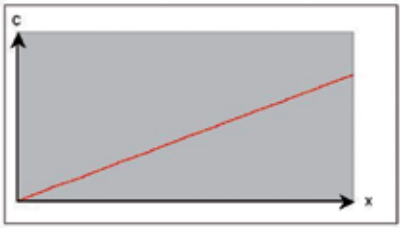
- *e : émission moyenne d'un certain polluant par véhicule (en quantité émise par seconde)*
- *n : nombre de véhicules par kilomètre de tunnel*
- *V : vitesse de l'air (m/s)*
- *C : concentration en quantité de polluant par mètre cube d'air*
- *S : section du tunnel (m^2)*
- *x : distance en kilomètre depuis la tête du tunnel par laquelle entre l'air frais*
- *L : longueur du tunnel*
- *V_0 : vitesse de l'air à la tête par laquelle entre l'air*
- *q : débit insufflé mécaniquement (m^3/s/km)*

1.8.1.1 Ventilation longitudinale

Comme il n'y a ni extraction ni soufflage, la vitesse de l'air est constante le long du tunnel : $V = V_0$.

Profil en long de la vitesse de l'air

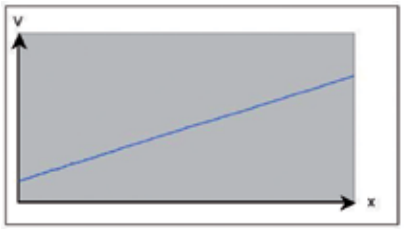
La concentration de polluant est : $C = e.x.n / V.S$



Profil en long de la concentration en polluants

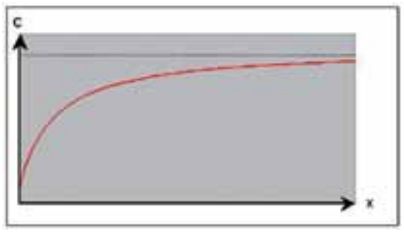
1.8.1.2 Ventilation semi-transversale sans inversion du sens de la vitesse de l'air[4]

De l'air frais entre par une tête et à travers des bouches de soufflage disposées à intervalles réguliers. A l'autre tête, de l'air pollué ressort avec une vitesse $V = V_0 + (q.L/S)$.



Profil en long de la vitesse de l'air

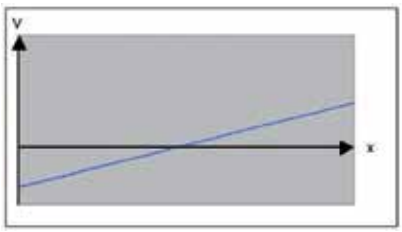
La concentration tend vers une valeur limite maximale $C_{max} = e.n / q$.



Profil en long de la concentration en polluants

1.8.1.3 Ventilation semi-transversale avec inversion du sens de la vitesse de l'air

De l'air vicié sort par les deux têtes, la concentration est constante : $C = e.n / q$



Profil en long de la vitesse de l'air

Profil en long de la concentration en polluants

(3) On a supposé que la concentration de l'air frais entrant dans le tunnel était négligeable

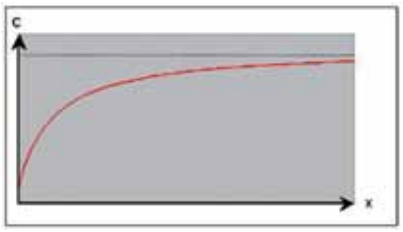
(4) L'inversion ou non du sens de l'écoulement de l'air dans le tunnel est fonction de l'importance des contre-pressions atmosphériques et du pistonnement dû au trafic

1.8.1.4 Ventilation transversale pure (cas d'une vitesse longitudinale de l'air non nulle)

Les débits d'insufflation et d'extraction étant égaux, la vitesse longitudinale de l'air est constante : $V = V_o$.

Profil en long de la vitesse de l'air

La concentration tend vers une valeur limite $C_{max} = e.n / q$.



Profil en long de la concentration en polluants

L'extraction n'a qu'un effet limité sur la dilution, son principal rôle est de modifier la vitesse du courant d'air.

1.8.1.5 Ventilation transversale pure (cas d'une vitesse longitudinale de l'air nulle)

La concentration est constante, $C_{max} = e.n / q$; l'extraction n'a aucun effet sur la dilution, son seul rôle est d'annuler le courant d'air longitudinal.

1.8.2 Indépendance aéraulique de tunnels successifs

Lorsque des problèmes de ventilation se posent en phase de conception d'un tunnel, la première solution est de chercher s'il est possible de limiter sa longueur, afin de diminuer les émissions en tunnel et donc la concentration des rejets.

Cette solution est toutefois le plus souvent impossible à mettre en œuvre, et on peut alors chercher à subdiviser le tunnel en plusieurs tunnels successifs plus courts.

Dans le cas de tunnels de moins de 300 mètres de longueur, on considère en général qu'ils sont indépendants sur le plan aéraulique lorsque la longueur non couverte entre deux couvertures est de l'ordre de la centaine de mètres.

1.8.3 Voiles anti-recyclage

Les voiles anti-recyclage sont des murs construits à l'extrémité des tunnels, dans leur prolongement. Ils peuvent être utilisés en présence de deux tubes parallèles unidirectionnels, pour éviter que l'air vicié rejeté à l'extrémité d'un tube ne pénètre à l'intérieur de l'autre tube, sous l'effet du pistonnement des véhicules.

Leur longueur est le plus souvent d'une quarantaine de mètres.

Leur hauteur est au moins égale à celle de la voûte, mais dépend de l'environnement. Pour éviter le passage de l'air d'un tube à l'autre, une autre solution que le voile anti-recyclage est le décalage des têtes, d'une valeur pouvant aller de 30 à 50 mètres.

Photo 7 - Voile antirecyclage – tranchée couverte du Landy – autoroute A1 (Seine Saint Denis)

Photo 6 - Décalage des têtes – tunnel d'Uriol sur l'autoroute A51

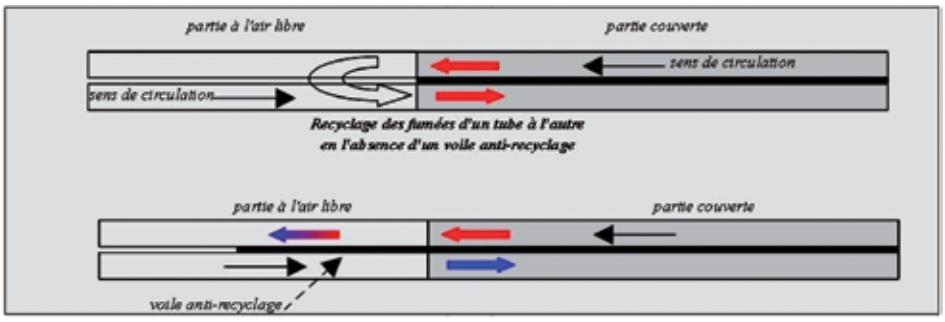


Illustration 11 - Effet d'un voile anti-recyclage

2. LES ÉTUDES AMONT

La décision de réaliser un projet d'infrastructure routière requiert la démonstration de son intérêt économique, social et environnemental. Si cet intérêt est démontré, le processus d'élaboration du tracé est engagé en plusieurs étapes successives. A l'issue de chacune d'elles, le niveau de précision du futur tracé est affiné, dans le respect des contraintes techniques, environnementales, sociales et économiques.

Tout au long de ce processus, la qualité de l'air doit être prise en compte sous tous ses aspects, des plus globaux (problématique de l'effet de serre planétaire ou de la pollution photochimique régionale) lors des débats sur l'intérêt du projet, aux plus locaux (effets directs de la pollution sur la santé, la végétation ou le bâti) lorsque la zone d'étude se réduit à une bande d'étude de quelques centaines de mètres, voire beaucoup moins.

L'obligation de prendre en compte la qualité de l'air, qui est devenue une préoccupation majeure en termes d'environnement depuis quelques années, a été renforcée par l'entrée en vigueur de la *loi sur l'air du 30 décembre 1996 [5]*. Outre son caractère obligatoire, l'étude des effets potentiels d'un projet sur la qualité de l'air est indispensable pour que le maître d'ouvrage puisse apporter des réponses aux nombreuses questions qui lui sont posées tout au long de l'élaboration du projet. Les procédures d'étude laissent en effet une large part aux débats et à la concertation avec les administrations, les élus, les associations, les riverains et les usagers, tous aujourd'hui sensibilisés sur le sujet de la pollution atmosphérique.

Lorsqu'un tunnel est présent dans un projet routier, il est susceptible d'induire des effets particuliers du point de vue de la dispersion de la pollution (cf. 1.1), et doit donc faire l'objet d'une prise en compte adaptée, si ce n'est d'une étude spécifique.

Ce chapitre, qui décrit sommairement les phases successives d'élaboration d'un projet routier, indique pour chacune d'elles les enjeux en termes de pollution atmosphérique liée aux tunnels, et la façon dont leur étude doit être abordée. Le terme d'études amont recouvre les études d'opportunité et les études préliminaires, jusqu'à l'élaboration de l'étude d'impact et du dossier d'enquête préalable à la déclaration d'utilité publique.

Les projets de conception de tunnels routiers et autoroutiers des maîtres d'ouvrages publics, qu'ils appartiennent à des voiries nationales, départementales ou communales, sont soumis à la *loi MOP [17].* Sur le réseau routier national, la *circulaire du 7 janvier 2008 fixant les modalités d'élaboration, d'instruction, d'approbation et d'évaluation des opérations d'investissement sur le réseau routier national [18]* complète la loi MOP*,* en fixant la marche à suivre pour l'élaboration des projets, tout en soulignant les exigences en matière de qualité, de formalisation de la commande ou de bilans financiers.

Pour une analyse détaillée du contenu de ces deux textes et de leur incidence en matière d'étude de conception des tunnels, on pourra se reporter au *« Guide des études » [19]* du CETU.

On retiendra que les principaux textes utiles à la compréhension et la mise en application du présent guide sont :

- la *loi 85-704 du 12 Juillet 1985 [17],* dite loi MOP, relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée ;
- la *circulaire du 7 janvier 2008 fixant les modalités d'élaboration, d'instruction, d'approbation et d'évaluation des opérations d'investissement sur le réseau routier national [18],* qui modifie et remplace en partie la *circulaire du 27 octobre 1987 [20] relative aux projets autoroutiers concédés,* et annule la *circulaire du 5 mai 1994 [21] relative aux projets du réseau routier national non concédé ;*
- la *circulaire de conduite des grands projets nationaux d'infrastructures du 15 décembre 1992 [22]* et la *loi Barnier du 2 février 1995 [23] ;*
- la *circulaire n°2004-63 Équipement-Écologie du 22 novembre 2004 relative à la concertation entre les services de l'environnement et les services de l'équipement pour l'élaboration et l'instruction des projets routiers du réseau national [24] ;*
- le *code de la voirie routière [25],* titre Ier , chapitre VIII, relatif à la sécurité des ouvrages du réseau routier dont l'exploitation présente des risques particuliers pour la sécurité des personnes ;
- la *loi du 10 juillet 1976 [26],* précisée par les *décrets du 12 octobre 1977 [27], du 25 février 1993 [28]* et *du 1er août 2003 [6],* qui introduit l'étude d'impact(5) ;
- le *Code d'Environnement [30],* et en particulier son *article L122-3,* dont le contenu a été précisé par la *circulaire du 17 février 1998 [1] ;*
- *la circulaire Santé-Équipement-Écologie du 25 février 2005 relative à la prise en compte des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact des infrastructures routières.*

Dans la suite du document, le vocabulaire employé est celui de la loi MOP, car elle est d'une portée plus générale que la circulaire du 7 janvier 2008. Les trois étapes successives d'études menées antérieurement à l'enquête publique sont donc présentées sous la dénomination « études d'opportunité », « études préliminaires - comparaison des variantes » et « études préliminaires - étude de la variante proposée ».

(5) dans le cadre de la loi Grenelle 2, une réforme profonde du régime des études d'impact est en cours ; le lecteur devra se reporter aux textes qui seront publiés

2.1 LES ÉTUDES D'OPPORTUNITÉ

2.1.1 Rappel des objectifs

Sans détailler les objectifs qui sont définis dans les textes pré-cités, rappelons seulement ici que les premières études engagées doivent permettre au maître d'ouvrage de se prononcer sur l'opportunité et la faisabilité du projet, sur les plans économique, social et environnemental.

A ce stade, l'opportunité du projet est débattue à l'appui d'études conduites par le maître d'ouvrage, études qui doivent aborder toutes les grandes fonctions de l'infrastructure dans une approche multimodale.

2.1.2 Consistance du débat et intervenants impliqués

Pour les plus grands projets, ceux d'intérêt national, la *loi « Barnier » du 2 février 1995 [23],* complétée par le *décret du 10 mai 1996 [29],* a créé la Commission nationale du débat public (CNDP), d'une très large représentativité : parlementaires, élus locaux, associations, membres du Conseil d'État et des juridictions de l'ordre administratif et judiciaire. Le débat qu'elle organise doit expressément porter sur tous les enjeux socio-économiques et sur les impacts significatifs sur l'environnement.

Pour les autres projets de l'État, la *circulaire du 15 décembre 1992 [22]* fixe le cadre du débat, dit débat « Bianco », qui associe le maître d'ouvrage et les responsables politiques, sociaux, économiques et associatifs, sous la responsabilité d'un préfet coordinateur. Une Commission de suivi du débat est organisée, avec des expertises externes. A l'issue du débat, un cahier des charges est établi et publié par le gouvernement.`

2.1.3 Les enjeux en termes de qualité de l'air et de tunnels

A ce stade des études, les débats menés autour des projets suscitent fréquemment de nombreuses questions sur les effets potentiels d'un tunnel du point de vue de la pollution atmosphérique. Ces questions viennent de la part des responsables politiques et des associations, qu'il s'agisse de riverains, d'agriculteurs et de viticulteurs, ou d'associations de protection de la nature.

Pour apporter des réponses à ces interrogations, le maître d'ouvrage pourra s'appuyer sur un recueil de données bibliographiques (plan régionaux pour la qualité de l'air ou schémas régionaux du climat, de l'air et de l'énergie, plans de déplacements urbains, plans de protection de l'atmosphère, rapports de mesures établis par les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air, etc.).

Ces données suffisent généralement pour apporter des réponses pertinentes à ce stade, sauf dans quelques cas, par exemple ceux de longs tunnels urbains, qui peuvent représenter des enjeux particulièrement forts en termes de qualité de l'air. Dans ces cas-là, tout en cherchant à utiliser au maximum les données bibliographiques existantes, il pourra être utile d'apporter des réponses plus détaillées en engageant par anticipation des études du niveau « Études Préliminaires ».

On retiendra que la principale difficulté à ce stade se pose en termes de communication, car il s'agit d'apporter des éléments de réponse très concrets (cf. 5 - Le contenu des études d'opportunité), alors qu'il existe encore une grande ouverture sur les caractéristiques physiques et techniques du projet. C'est lors des stades ultérieurs que les études seront affinées, au fur et à mesure de leur avancement (notion de progressivité), afin de construire le projet.

2.2 LES ÉTUDES PRÉLIMINAIRES

2.2.1 Les objectifs

Les études préliminaires[6] ont quatre objectifs :

- établir le pré-programme qui recense les besoins, les contraintes, les données et les exigences du maître d'ouvrage, et permet une définition adaptée et fiable des principales caractéristiques de l'opération ;
- s'assurer de la faisabilité technique et financière de chaque variante en conformité avec le pré-programme ;
- proposer une solution privilégiée pour lancer l'enquête publique ;
- établir l'évaluation financière préalable de l'opération.

Si l'établissement du projet de programme est une démarche continue qui progresse tout au long des études préliminaires, l'étude de chaque variante et l'étude de la variante qui sera proposée à l'enquête publique constituent, au sens de la problématique traitée dans le présent document, deux phases d'études distinctes qui se succèdent dans le temps. On les désignera respectivement dans la suite de ce document par « comparaison des variantes » et « étude de la variante proposée ».

2.2.2 Études préliminaires : comparaison des variantes

2.2.2.1 Consistance des études, intervenants impliqués et documents établis

A l'intérieur de l'aire d'étude, le maître d'ouvrage commence par procéder à un recueil de données techniques, économiques et environnementales.

A l'appui de ces données, plusieurs variantes de tracé sont étudiées, ainsi que les variantes d'échanges avec le reste du réseau (carrefours, échangeurs et diffuseurs). Le niveau de précision pour la présentation du projet est de l'ordre du 1/10 000ème.

Une comparaison environnementale et socio-économique des variantes est menée en poursuivant la concertation avec les élus locaux.

Cette phase débouche sur l'établissement du sous-dossier de comparaison des variantes des études préliminaires. Au stade des études préliminaires, chaque tunnel de chaque variante doit faire l'objet d'études spécifiques, afin de vérifier sa faisabilité technique et d'établir son évaluation financière préalable.

(6) Ou « études préalables à l'enquête publique » selon la circulaire du 7 janvier 2008

L'étude particulière d'ouvrage ainsi établie pour chaque tunnel permet de comparer plusieurs solutions du point de vue technique et financier. A ce stade, les réflexions techniques portent essentiellement sur les aspects de génie civil (géologie, techniques de creusement et de soutènement) et sur la définition géométrique de l'ouvrage y compris la position des têtes. Du point de vue de la ventilation, l'étude reste assez sommaire. Elle consiste essentiellement à définir le système de ventilation à retenir et à mener un calcul de pré-dimensionnement dont l'objectif est de fournir toutes les caractéristiques utiles à la définition du profil en travers. A ce stade, il faut examiner si des stations de ventilation doivent être prévues et le cas échéant étudier leurs emplacements possibles.

2.2.2.2 Les enjeux en termes de qualité de l'air

La comparaison des variantes recouvre de nombreux thèmes environnementaux. La qualité de l'air en fait partie, au même titre que l'hydrologie, les milieux naturels, l'intégration paysagère, le bruit, l'agriculture, l'hydrogéologie, l'urbanisme, le cadre de vie ou la protection architecturale.

Pour que le critère de la qualité de l'air puisse être discriminant, une étude suffisamment détaillée doit être menée. Le recueil de données doit aller au-delà d'une synthèse bibliographique. En premier lieu, des mesures in situ doivent être organisées, car les niveaux de pollution initiaux sont des éléments à prendre en compte dans le choix de la bande d'étude. Ensuite, pour comparer les variantes les unes aux autres, il est nécessaire de construire des indicateurs quantifiés, qui sont le plus souvent :

- les quantités d'émissions polluantes,
- l'exposition de la population à la pollution,
- l'exposition des cultures à la pollution.

La spécificité des tunnels doit être prise en compte dans ces calculs. La méthode d'étude pourra néanmoins rester simple et didactique, car il s'agit, à ce stade, d'un travail avant tout comparatif (cf. 6 - Le contenu des études préliminaires - comparaison des variantes).

Même si en toute rigueur ce sont des bandes d'étude qui sont comparées les unes aux autres, le maître d'ouvrage établit le plus souvent, pour chaque bande d'étude, un tracé de référence (tracé en plan, profil en long et profil en travers). Grâce à cela, l'étude de la qualité de l'air pourra s'appuyer sur un tracé intégrant une définition relativement précise de la géométrie et de la position des tunnels, et de leurs têtes en particulier, même si elles sont bien sûr susceptibles d'évoluer lors des phases d'étude ultérieures.

2.2.3 Études préliminaires : étude de la variante proposée

2.2.3.1 L'objectif

Une fois choisie la bande d'étude proposée à l'enquête publique, le tracé de référence correspondant, désigné par le terme de « variante proposée », doit être étudié dans le détail, afin d'évaluer ses effets prévisibles, des points de vue socio-économique et environnemental. L'étude de la variante proposée, qui suit l'étude de comparaison des variantes établie précédemment, sert à établir l'étude d'impact, qui constituera le dossier technique support pour l'enquête préalable à la déclaration d'utilité publique.

2.2.3.2 Consistance des études, intervenants impliqués et documents établis

Il s'agit à ce stade d'étudier de façon détaillée les impacts potentiels de la réalisation du projet dans la bande d'étude retenue à l'issue de la phase précédente.

Même si le tracé n'est pas figé dans la bande d'étude, sa définition est affinée par rapport au stade de comparaison des variantes. L'échelle de présentation des cartes et des plans du projet atteint généralement le 1/5 000ème , et parfois même le 1/2 500ème en milieu urbain.

Le dossier d'études préliminaires final regroupe le sous-dossier de comparaison des variantes et celui de l'étude de la variante proposée. Un rapport d'étude particulière est établi en site difficile pour chaque tunnel de chaque variante, et dans tous les cas pour chaque tunnel de la variante proposée.

Même si ce dossier est essentiellement technique, il doit permettre de tirer des conclusions claires, facilement compréhensibles par des non spécialistes. En effet, il va servir de base à l'établissement de l'étude d'impact, dont la diffusion est très large, auprès des administrations et des élus, des associations, des riverains et usagers, en tant qu'élément du dossier d'enquête préalable à la déclaration d'utilité publique.

2.2.3.3 Les enjeux en termes de qualité de l'air

A ce stade des études, il n'est par définition plus possible de raisonner en termes comparatifs, puisqu'une solution particulière est approfondie.

Il faut estimer quels pourraient être les impacts du projet : estimation des concentrations, comparaison aux seuils réglementaires, évaluation de la population concernée, etc, tout en veillant attentivement à ce que le niveau d'approfondissement de l'étude reste proportionné à la sensibilité du projet. Il faut veiller à éviter de mettre en œuvre des outils dont la complexité ne serait pas en cohérence avec le niveau de définition du projet (cf. 7 - Le contenu des études préliminaires - étude de la variante proposée).

Des outils de modélisation de la dispersion pourront être utilisés, mais ils devront obéir à deux conditions : rester adaptés et simples, et apporter des résultats fiables et facilement exploitables en termes de communication auprès de personnes non spécialistes, dans le cadre de l'étude d'impact. Il ne faudra jamais perdre de vue que l'un des enjeux majeurs est de rendre accessible au plus grand nombre des éléments souvent techniques, et à cet égard, le résumé non technique de l'étude d'impact est un outil essentiel.

3. LA RÉGLEMENTATION ET LES POLLUANTS À CONSIDÉRER

3.1 AIR INTÉRIEUR ET AIR EXTÉRIEUR DES TUNNELS : DEUX RÉGLEMENTATIONS DISTINCTES

Les réglementations ou recommandations en matière de concentration en polluants atmosphériques, aussi bien dans les ouvrages souterrains que dans l'air ambiant, visent en premier lieu à garantir des niveaux de concentration acceptables pour la collectivité, autant à court terme qu'à long terme.

Dans les tunnels, les recommandations intègrent aussi le fait que les gaz polluants peuvent avoir des effets sur le confort des usagers (transparence de l'air et odeurs) et leur sécurité (distance de visibilité).

En matière de santé, les risques pour un individu sont étroitement liés à la quantité de polluant inhalée, c'est-à-dire au produit de la concentration en polluant dans l'air respiré par la durée d'exposition à cette pollution. Comme les temps de séjour, et donc l'exposition, sont plus courts en tunnel, les niveaux acceptables y sont plus élevés que dans l'air extérieur.

Les niveaux de concentration de référence diffèrent donc entre l'intérieur d'un tunnel et ses abords.

Cette double référence constitue une réelle difficulté pour la prise en compte des tunnels dans les études routières. Car outre le fait que les niveaux acceptables ne sont pas les mêmes, ils sont calculés sur des durées différentes et exprimés dans des unités distinctes.

Les principaux polluants rejetés par les véhicules automobiles sont les polluants gazeux dont les effets toxiques dépendent de la concentration et de la durée d'exposition. Il s'agit en particulier du monoxyde de carbone (CO), des oxydes d'azote (NOx) et des hydrocarbures (HC). Les véhicules, surtout les diesels, sont aussi à l'origine du rejet de particules très fines, de diamètre de l'ordre de un à quelques micromètres.

3.2 AIR EXTÉRIEUR AUX TUNNELS : LA LOI SUR L'AIR ET LE CODE DE L'ENVIRONNEMENT COMME TEXTES DE RÉFÉRENCE

La *loi sur l'air [5]* , dont les dispositions ont été reprises dans les articles L.220-1 et suivants du *Code de l'environnement [30],* impose la surveillance de la qualité de l'air ambiant sur l'ensemble du territoire français.

3.2.1 Les polluants suivis : décret n°2002-213

Le *décret n°2002-213 du 15 février 2002 [31],* qui vient compléter *la loi sur l'air [5],* fixe la liste des polluants qui doivent être suivis. Ils sont au nombre de sept :

- monoxyde de carbone,
- dioxyde de soufre,
- dioxyde d'azote,
- particules en suspension (PM10 [7] et PM2.5[8])
- plomb,
- ozone,
- benzène.

Les seuils d'alerte et les valeurs limites à ne pas dépasser pour chacun de ces polluants, tous surveillés par le réseau des associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA), sont fixés par ce décret.

Chaque seuil correspond à une concentration ayant des effets limités sur la santé ou la végétation. Pour ce qui concerne la santé, ils ont été définis à partir des recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et d'études épidémiologiques.

3.2.2 Principe d'application des seuils

Pour chaque polluant, plusieurs seuils admissibles sont donnés, en fonction de la durée sur laquelle le seuil est calculé, le but étant à la fois de surveiller et de réglementer :

- les pics de pollution (niveau à ne pas dépasser sur une durée courte ou niveau ne pouvant être dépassé que très ponctuellement sur une longue période d'observation) ;
- les niveaux moyens rencontrés au jour le jour (niveaux moyens calculés sur une longue période).

Les durées d'observation fixées par le décret du *15 février 2002 [31]* varient de l'heure à l'année.

(7) Particules de diamètre inférieur à 10 µm
(8) Particules de diamètre inférieur à 2,5 µm

3.3 AIR INTÉRIEUR AUX TUNNELS : LES NIVEAUX ADMISSIBLES

Le monoxyde de carbone a été pendant longtemps le critère de dimensionnement de la ventilation sanitaire dans les tunnels. Aujourd'hui toutefois, compte tenu de la très forte diminution des émissions de monoxyde de carbone, le dimensionnement repose sur les oxydes d'azote (NOx) et l'opacité.

3.3.1 La circulaire 99.329 du ministère de la Santé

La loi sur l'air ne contient aucune prescription concernant les niveaux de concentration admissibles en tunnel, ni même plus généralement sur les niveaux à respecter dans les ouvrages souterrains fermés ou semi-fermés.

La principale référence concernant les polluants toxiques pour les ouvrages souterrains est la *circulaire 99.329 du 8 juin 1999 [32].* Elle demande de suivre les recommandations données par le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHPF) dans son rapport *« Qualité de l'air dans les ouvrages souterrains ou couverts » [33]* rendu le 14 décembre 1998.

3.3.2 Le dossier pilote ventilation du CETU

Afin de garantir de bonnes conditions de visibilité, le *dossier pilote « Ventilation » [9]* du CETU fixe un seuil à ne pas dépasser en matière d'opacité. Il s'agit, à travers la régulation de ce paramètre, d'écarter le risque d'accident dû à un manque de visibilité et de maintenir un sentiment de confort et de sécurité pour les usagers. Le seuil d'opacité n'a donc pas été fixé selon des critères sanitaires. La régulation de l'opacité constitue néanmoins un moyen de limiter les concentrations en fumées et particules fines nocives pour la santé.

3.3.3 L'instruction technique du 25 août 2000

En situation d'incident ou d'accident, l'instruction technique du 25 août 2000 donne des seuils à ne pas dépasser pour le monoxyde de carbone et l'opacité.

3.3.4 Les polluants suivis

Les polluants suivis sont d'une part les deux polluants réglementés dans la *circulaire 99.329 [32]* :

- le monoxyde de carbone,
- les oxydes d'azote (à travers le monoxyde d'azote ou le dioxyde d'azote),

et d'autre part les particules, à travers la mesure de l'opacité.

Les concentrations en monoxyde de carbone sont aujourd'hui devenues beaucoup plus faibles qu'il y a une vingtaine d'années, grâce au renouvellement du parc automobile. Son suivi ne représente donc plus un enjeu sanitaire.

Du fait de la difficulté à mesurer en continu le dioxyde d'azote, la *circulaire 99.329 [32]* propose de mesurer à sa place le monoxyde d'azote et d'appliquer un coefficient de conversion. Aujourd'hui, les mesures effectuées en tunnel montrent toutefois qu'il est devenu difficile d'appliquer un coefficient de conversion fiable, car le rapport NO_2 / NO est très fluctuant, avec de forts niveaux de NO_2. Pour cette raison, la mesure du NO_2 pourrait rapidement devenir incontournable, au moins dans les tunnels les plus circulés.

3.3.5 Principe d'application des seuils

Comme les durées d'exposition dans les ouvrages souterrains sont en principe courtes, les limites à ne pas dépasser sont calculées sur des durées assez réduites (15 à 30 minutes au maximum), ou même tout simplement exprimées en seuil instantané à ne pas dépasser. Pour plus de détails, on se reportera au d*ossier pilote « Ventilation » [9].*

3.4 LES POLLUANTS À RETENIR DANS LES ÉTUDES D'IMPACT

3.4.1 Études d'impact

Pour tous les projets soumis à une étude d'impact, l'étude des effets sur la qualité de l'air et sur la santé humaine est rendue obligatoire par *l'article L122-1 du Code de l'Environnement [30]*.

Pour les projets routiers, la consistance des études à mener dans ce cadre est fixée par la *circulaire du 17 février 1998 [1].*

Cette circulaire a été complétée par la *note méthodologique sur l'évaluation des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact routières [3].*

Cette note méthodologique donne la liste des polluants qui doivent être pris en compte dans les études d'impact des projets routiers [9].

Dans tous les cas, il faut prendre en considération les huit polluants suivants :

- les oxydes d'azote (monoxyde d'azote et dioxyde d'azote),
- le monoxyde de carbone,
- les hydrocarbures,
- le benzène,
- les particules émises à l'échappement,
- le dioxyde de soufre
- le nickel,
- le cadmium.

Si ces polluants sont ceux auxquels il faut a priori s'intéresser dans une étude d'impact, tous ne doivent pas pour autant être étudiés dans le détail aux différents stades d'étude. Le choix doit être fait en fonction du type de projet et du milieu dans lequel il s'insère. Par exemple, le dioxyde de soufre, qui n'est presque plus émis par la circulation routière, ne sera étudié que si d'autres sources très fortes de ce polluant sont présentes à proximité du projet.

Il faut noter que pour les études de niveau 1 au sens de la *note méthodologique [3]*, la liste des polluants définis ci-dessus est étendue à d'autres substances. La liste complète des polluants à retenir afin d'estimer le risque sanitaire est dans ce cas la suivante :

- polluants classiques : dioxyde de soufre, monoxyde de carbone, dioxyde d'azote, particules émises à l'échappement,
- composés organiques volatils : benzène, 1.3-butadiène, acétaldéhyde, formaldéhyde, acroléine,
- hydrocarbures aromatiques polycycliques : benzo(a)pyrène,
- métaux : arsenic, baryum, cadmium, chrome, mercure, nickel, plomb.

(9) La révision en cours de la Note méthodologique pourrait conduire à une évolution de la liste des polluants

3.4.2 Les polluants à retenir pour traiter le cas des tunnels

Le premier principe à adopter pour prendre en compte les tunnels lors des phases amont des projets routiers est un principe de cohérence avec le reste de l'étude de la qualité de l'air.

En effet, à ce stade, comme il l'a été dit plus haut (cf. 2 - Les études amont), il s'agit avant tout d'évaluer les impacts d'un itinéraire routier au sein duquel est présent un tunnel, mais pas de mener l'étude approfondie du tunnel, qui viendra plus tard (au stade du Projet).

Le cadre réglementaire restant celui de la loi, des décrets et des circulaires, la liste des polluants pour lesquels les effets des tunnels seront spécifiquement évalués dans l'étude préliminaire sera a priori la même que celle retenue pour l'étude d'impact (cf. 3.4.1 - Études d'impact), à l'exception du dioxyde de carbone qui ne fera pas l'objet d'un examen particulier, la présence d'un tunnel ne modifiant en rien l'effet de ce polluant global.

En pratique, on peut établir une liste de base des polluants à prendre en compte pour traiter le cas spécifique des tunnels dans les projets routiers aux stades antérieurs à la déclaration d'utilité publique.

Cette liste comptera quatre polluants :

- le monoxyde de carbone,
- le dioxyde d'azote,
- les fumées ou « particules »,
- le benzène.

Les trois premiers polluants (monoxyde de carbone, dioxyde d'azote et fumées ou « particules ») font à la fois partie de ceux qui doivent être étudiés dans les études d'impact de projets routiers et de ceux qui sont réglementés et mesurés dans les tunnels. Ils sont donc incontournables.

Le benzène devra aussi être étudié, car même s'il ne fait pas partie des polluants classiquement suivis dans les tunnels, il est aujourd'hui devenu une préoccupation majeure en termes de surveillance de la qualité de l'air, du fait de ses effets reconnus sur la santé humaine et des fréquents dépassements des niveaux réglementaires dont il fait l'objet en proximité des voies de circulation.

Au cours du déroulement du projet, cette liste pourra évoluer entre les différentes phases d'étude en même temps que les méthodologies employées. On se reportera pour cela aux chapitres 5, 6 et 7 de ce guide, qui traitent respectivement des études d'opportunité, de la comparaison des variantes (études préliminaires) et de l'étude de la variante proposée (études préliminaires).

3.5 LIEN ENTRE OPACITÉ, FUMÉES ET PARTICULES EN SUSPENSION

Dans les tunnels, le terme « fumées » est couramment employé pour désigner la pollution particulaire, mais du fait de techniques de mesure très différentes, les fumées observées en tunnel diffèrent nettement des particules en suspension communément suivies dans l'air ambiant.

En tunnel, la pollution particulaire n'est pas mesurée directement (en masse, en nombre ou en volume) mais de façon indirecte, à travers l'opacité. L'opacité est définie comme l'atténuation d'un flux lumineux qui traverse une épaisseur d'air. Elle est exprimée en m^{-1}, et on recommande comme opacité maximale $K = 5.10^{-3}\ m^{-1}$ en exploitation normale. Cela correspond à une atténuation de 10 % de l'intensité lumineuse sur une distance de 20 mètres.
En mesurant l'opacité, c'est la totalité des particules qui sont prises en compte, alors que pour ce qui concerne l'air ambiant, seules les particules de faible diamètre sont observées (particules en suspension PM 10 (10) et PM 2,5 (11)).

Il est très difficile d'établir une règle de correspondance entre les valeurs d'opacité et les concentrations en particules (PM10 par exemple).

Des mesures jumelées de l'opacité et des concentrations en particules faites dans plusieurs pays européens montrent qu'à des opacités égales ne correspondent pas des niveaux de concentration identiques, car entrent en jeu le type d'opacimètre, le calibrage de la lumière par l'opacimètre et le spectre du diamètre des particules que l'on mesure.

Pour évaluer les concentrations en PM10 d'un rejet à une tête de tunnel, on pourra d'abord considérer qu'à l'intérieur du tunnel, on se situe au seuil admissible ($K = 5.10^{-3}\ m^{-1}$), même si cela est pénalisant puisque ce seuil ne devrait normalement jamais être dépassé.

Ensuite, pour le passage de l'opacité aux particules PM10, on pourra retenir la correspondance (12) :

$$10.10^{-3}\ m^{-1} \Leftrightarrow 1000\ \mu g/m^3\ (PM10),$$

ce qui conduit à prendre une valeur de 500 $\mu g/m^3$ si l'on se place au seuil admissible. Par ailleurs, des mesures comparatives ont montré, pour les PM totales, une correspondance (13) :

$$4{,}7.10^{-3}\ m^{-1} \Leftrightarrow 1000\ \mu g/m^3\ (PM).$$

Ces valeurs par défaut permettent, en première approximation, d'obtenir un ordre de grandeur (surévalué) des concentrations, avec la possibilité ultérieure de mener des calculs plus précis et moins pénalisants si l'on constate que les seuils réglementaires sont approchés ou dépassés.

En fait, le coefficient de passage entre particules et opacité dépend du tunnel et de son type de trafic. Dans un tunnel emprunté par un fort trafic de poids lourds transportant des matériaux pulvérulents, par exemple s'il est situé à proximité d'une carrière, les particules seront de grandes dimensions. A l'inverse, les particules seront les plus fines dans les tunnels régulièrement nettoyés recevant un trafic essentiellement composé de véhicules légers.

Des informations complémentaires sur ce sujet sont données par le rapport « Tunnels routiers : émissions des véhicules et besoins en air pour la ventilation » *[34]* publié en 2004 par le Comité des tunnels routiers de l'Association mondiale de la route (AIPCR).

(10) particules de diamètre inférieur à 10 µm
(11) particules de diamètre inférieur à 2,5 µm
(12) voir le dossier pilote Ventilation du CETU
(13) voir le dossier pilote ventilation du CETU

3.6 LES OXYDES D'AZOTE

Le terme « oxydes d'azote » recouvre le monoxyde d'azote (NO), le dioxyde d'azote (NO_2) et le tétraoxyde d'azote (N_2O_4).

C'est le dioxyde d'azote qui est le plus fréquemment retrouvé dans l'air ambiant, car le monoxyde d'azote est rapidement oxydé en dioxyde d'azote. Le monoxyde d'azote est par ailleurs considéré comme environ cinq fois moins toxique que le dioxyde d'azote [(14)]. Pour ces raisons, c'est le dioxyde d'azote qui a été retenu parmi les polluants à étudier.

L'obtention des concentrations en dioxyde d'azote à partir des émissions des véhicules n'est toutefois pas directe, car les émissions sont données en oxydes d'azote.

A la sortie des pots d'échappement des véhicules, les oxydes d'azote sont essentiellement du monoxyde d'azote, mais ensuite le monoxyde d'azote a tendance à s'oxyder dans l'air, et le ratio NO/NOx à diminuer au fur et à mesure que le temps passe et que l'on s'éloigne des voies de circulation. Les réactions chimiques qui entrent en jeu dans cette transformation sont complexes, et certaines d'entre elles ne peuvent s'initier qu'en présence de lumière naturelle (rayonnement ultraviolet).

Le comportement des oxydes d'azote est donc très différent à l'intérieur d'un tunnel ou à ses abords. En tunnel, l'oxydation du monoxyde d'azote est très limitée et ce gaz reste prépondérant. Dans ses *recommandations [33]*, le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France indique de retenir le ratio :

$$NO / NO_2 = 10, \text{ soit } NO_2 / NOx \approx 0,1.$$

Des mesures récentes en tunnel ont toutefois montré que le rapport NO_2/NOx avait tendance à augmenter. Des ratios de 0,2 voire 0,5 ou plus ont été relevés, confirmant une tendance observée pas seulement en tunnel [(15)] .

A l'extérieur des tunnels, le rapport NO_2 / NOx augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne du point de rejet. Le calcul précis de l'évolution du ratio NO_2/NOx est très délicat, compte tenu du grand nombre de paramètres qui entrent en jeu (géométrie, rayonnement solaire, températures, pollution de fond, etc.).

A la demande du CETU, le Centre d'Enseignement et de Recherche sur l'Environnement Atmosphérique (CEREA) a développé un modèle simplifié de calcul du rapport NO_2/NOx, en fonction de la position par rapport à la tête du tunnel. La méthode de modélisation est décrite dans le rapport 2004-19 *« Estimation de ratios moyens de NO_2/NOx au voisinage du débouché d'un tunnel en tranchée en milieu urbain » [35]*, dont un résumé est donné en Annexe.

(14) voir la fiche toxicologique FT 133 de l'Institut National de Recherche et de Sécurité

(15) voir l'avis de l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (AFSSET) relatif à « Impact des technologies de post-traitement sur les émissions de NO_2 de véhicules diesel, et aspects sanitaires associés » du 11 août 2009.

3.7 LES UNITÉS DE MESURE DES POLLUANTS

Les concentrations en polluants gazeux peuvent être exprimées sous deux formes :

- en concentrations massiques (µg/m³ par exemple),
- en concentrations volumiques ou titre volumique (parties par million – ppm, ou parties par milliard – ppb).

La première forme est la plus répandue pour l'air ambiant, la seconde étant souvent utilisée dans le domaine des ouvrages souterrains.

La conversion d'une unité à l'autre s'effectue à partir de l'équation des gaz parfaits.

Cette équation s'écrit sous la forme :

$$W_i = \left(\frac{R_m \cdot T_u}{P_u}\right) \cdot \frac{K_i}{M_i} \cdot 10^6$$

NOTATIONS UTILISÉES

- *W_i : concentration volumique d'un gaz i en parties par million (ppm),*
- *M_i : masse molaire du gaz i (kg/kmol),*
- *K_i : concentration massique du gaz i (kg/m³),*
- *R_m : constante des gaz parfaits (8314,3 Nm/(kmol.K)),*
- *T_u : température ambiante (K),*
- *P_u : pression atmosphérique (bar, avec 1 bar ≈ 105 Pa).*

L'application de la formule de transformation nécessite donc de connaître la température en Kelvin et la pression sur le lieu du projet.

Il faut noter que pour des températures situées autour de 20° C, une variation de 3° C n'entraîne qu'une variation de 1 % de la température exprimée en Kelvin.

En fixant la température et la pression, l'équation de transformation devient :

- pour des conditions « normales » décrites par p_u = 101 325 Pa et T = 273 K (0°C),

$$W_i \text{ (ppm)} = 22{,}401 \cdot \frac{Ki}{M_i} \left(\frac{\text{mg / m}^3}{\text{kg / kmol}} \right)$$

- pour des conditions « standard » décrites par p_u = 101 325 Pa et T =298 K (25°C),

$$W_i \text{ (ppm)} = 24{,}453 \cdot \frac{Ki}{M_i} \left(\frac{\text{mg / m}^3}{\text{kg / kmol}} \right)$$

Le *tableau 1* donne les correspondances entre concentrations massiques et concentrations volumiques pour les polluants usuels [16] .

gaz	masse molaire (g/mol)	facteurs de conversion conditions « normales » (101 325 Pa, 0°C)	facteurs de conversion conditions « standard » (101 325 Pa, 25°C)
monoxyde de carbone	28	1 ppm = 1,25 mg/m³ 1 mg/m³ = 0,800 ppm	1 ppm = 1,14 mg/m³ 1 mg/m³ = 0,873 ppm
monoxyde d'azote	30	1 ppm = 1,34 mg/m³ 1 mg/m³ = 0,747 ppm	1 ppm = 1,23 mg/m³ 1 mg/m³ = 0,815 ppm
dioxyde d'azote	46	1 ppm = 2,05 mg/m³ 1 mg/m³ = 0,487 ppm	1 ppm = 1,88 mg/m³ 1 mg/m³ = 0,532 ppm
benzène	78	1 ppm = 3,48 mg/m³ 1 mg/m³ = 0,287 ppm	1 ppm = 3,19 mg/m³ 1 mg/m³ = 0,313 ppm

Tableau 1 - Correspondances entre concentrations massiques et concentrations volumiques pour les polluants usuels

(16) pour les tunnels situés en altitude, il convient de prendre en compte la pression atmosphérique moyenne à l'altitude du tunnel (voir le dossier pilote Ventilation du CETU)

3.8 TABLEAU DE SYNTHÈSE DES NIVEAUX RÉGLEMENTAIRES OU RECOMMANDÉS

Le *tableau 2* présente les niveaux réglementaires ou recommandés pour les polluants de la liste proposée au paragraphe 4.2.

Lorsqu'aucune indication n'est donnée dans le tableau, les valeurs sont relatives à la protection de la santé humaine. Les seuils de protection des écosystèmes sont signalés.

polluant	milieu concerné	paramètre	durée d'observation	niveau réglementaire ou recommandé		référence
monoxyde de carbone	ouvrages souterrains	en situation exceptionnelle, en tout point du tunnel	valeur instantanée	**150 ppm**	*[171 mg/m³]*	instruction technique du 25/08/00
		teneur moyenne sur toute la longueur de l'ouvrage	15 minutes	**90 ppm**	*[103 mg/m³]*	circulaire du 08/06/99
			30 minutes	**50 ppm**	*[57 mg/m³]*	circulaire du 08/06/99
	air ambiant	valeur limite	moyenne sur 8 heures	*[8 ppm]*	**10 mg/m³**	décret du 15/02/02
dioxyde d'azote	ouvrages souterrains	teneur moyenne sur toute la longueur de l'ouvrage	15 minutes	**0,4 ppm**	*[752 µg/m³]*	circulaire du 08/06/99
	air ambiant	seuil d'alerte	moyenne horaire	*[0,21 ppm]*	**400 µg/m³**	décret du 15/02/02
		seuil de recommandation et d'information	moyenne horaire	*[0,11 ppm]*	**200 µg/m³**	décret du 15/02/02
		valeur limite	centile 99,8* sur l'année civile des valeurs moyennes horaires	*[0,11 ppm]*	**200 µg/m³**	décret du 15/02/02
		valeur limite	moyenne annuelle	*[0,021 ppm]*	**40 µg/m³**	décret du 15/02/02
		objectif de qualité	moyenne annuelle	*[0,021 ppm]*	**40 µg/m³**	décret du 15/02/02
oxydes d'azote	air ambiant	valeur limite (protection de la végétation)	moyenne annuelle	*[0,016 ppm]*	**30 µg/m³**	décret du 15/02/02
particules opacité	ouvrages souterrains	en situation exceptionnelle, en tout point du tunnel	valeur instantanée	**9.10^{-3} m^{-1}**	*voir paragraphe 3.5*	instruction technique du 25/08/00
		en situation normale, en tout point du tunnel	valeur instantanée	**5.10^{-3} m^{-1}**	*voir paragraphe 3.5*	recommandation
particules PM10	air ambiant	valeur limite	centile 90,4** sur l'année civile des valeurs moyennes journalières	*[5.10-4 m-1]*	**50 µg/m³**	décret du 15/02/02
		valeur limite	moyenne annuelle	*[4.10-4 m-1]*	**40 µg/m³**	décret du 15/02/02
		objectif de qualité	moyenne annuelle	*[3.10-4 m-1]*	**30 µg/m³**	décret du 15/02/02
benzène	air ambiant	seuil d'alerte	moyenne annuelle	*[1,6 ppb]*	**5 µg/m³**	décret du 15/02/02
		objectif de qualité	moyenne annuelle	*[0,6 ppb]*	**2 µg/m³**	décret du 15/02/02

Tableau 2

Valeur en gras : valeur réglementaire ou recommandée

[Valeur entre crochets] : valeur convertie pour les conditions de température et de pression « standard » (25°C, 101 325 Pa)

** valeur à respecter 99,8 % du temps, c'est-à-dire qui ne peut être dépassée que 18 heures par année civile de 365 jours*

*** valeur à respecter 90,4 % du temps, c'est-à-dire qui ne peut être dépassée que 35 jours par année civile de 365 jours*

4. LES OUTILS D'ÉVALUATION, DE L'ÉTAT INITIAL AU RISQUE SANITAIRE

Ce chapitre présente les étapes à suivre pour mener l'étude de qualité de l'air d'un projet routier, depuis l'établissement de l'état initial jusqu'à l'évaluation des risques sanitaires.

Les quatre étapes successives d'étude sont les suivantes :

- la caractérisation de l'état initial,
- la détermination des quantités d'émissions rejetées par le tunnel,
- la modélisation de la dispersion des polluants,
- l'étude sanitaire.

La *note méthodologique [3]* donne des recommandations sur la consistance de chacune de ces étapes, qui varie selon le niveau d'étude. Quatre niveaux d'études sont prévus, numérotés de I à IV, du plus complet au plus simple. Le niveau d'étude est déterminé en fonction du trafic attendu à l'horizon d'étude sur le projet (selon des tronçons homogènes de plus de 1 km) et de la densité de population dans la bande d'étude du projet.

Le *tableau 3* donne les critères généraux de choix du niveau d'étude pour les projets routiers. Pour plus de détails, on se reportera à la *note méthodologique [3]*.

La gradation des études en fonction de l'ampleur du projet découle de l'application des textes réglementaires.

C'est le *décret du 12 octobre 1977 [27]*, pris pour l'application de l'article 2 de la loi du 10 juillet 1976 [26] relative à la protection de la nature, qui précise le contenu des études d'impact. Il indique que ce contenu doit être en relation avec l'importance des travaux et des aménagements projetés et avec leur incidence prévisible sur l'environnement. Le *décret du 1er août 2003 [6]* fixe à 1,9 M€ le seuil à partir duquel l'étude d'impact est obligatoire (17). L'article 3 du *décret du 12 octobre 1977 [27]* apporte des précisions quant à la soumission à la procédure d'étude d'impact : il indique que les travaux d'entretien et grosses réparations, quels que soient les ouvrages ou aménagements auxquels ils se rapportent, ne sont pas soumis à ce type de procédure (17).

Dans ce chapitre sont présentés les outils d'évaluation à utiliser à chaque étape d'étude. La façon de les mettre en œuvre est pour sa part décrite dans les chapitres 5, 6 et 7.

T : trafic à l'horizon d'étude sur le projet d : densité de population dans la bande d'étude	T ≤ 10000 véh/j ou T ≤ 1000 uvp/h	10000 < T ≤ 25000 véh/j ou 1000 < T ≤ 2500 uvp/h	25000 < T ≤ 50000 véh/j ou 2500 < T ≤ 5000 uvp/h	T > 50000 véh/j ou T > 5000 uvp/h
pas de bâti	IV	IV	III	III
d < 2000 hab / km²	III si L_{projet} ≤ 50 km ou II si L_{projet} > 50 km	II	II	I
2 000 < d < 10 000 hab / km²	III si L_{projet} ≤ 25 km ou II si L_{projet} >25 km	II	II	I
d ≥ 10 000 hab / km²	III si L_{projet} ≤ 5 km ou II si L_{projet} > 5 km	II	I	I

Tableau 3 - Niveau d'étude en fonction du trafic et de la densité de population

(17) dans le cadre de la loi Grenelle 2, une réforme profonde du régime des études d'impact est en cours ; le lecteur devra se reporter aux textes qui seront publiés

4.1 L'ÉTABLISSEMENT DE L'ÉTAT INITIAL

4.1.1 Objectifs

Qu'il s'agisse d'un aménagement comprenant un tunnel ou non, l'état initial relatif à la thématique « air » doit aborder plusieurs thèmes. Ces thèmes sont les suivants :

- la qualité de l'air,
- la qualité des sols,
- le recensement des émissions,
- les données météorologiques,
- les données topographiques, de rugosité et de bâti,
- les données de population,
- les indicateurs sanitaires.

L'établissement de l'état initial doit qualifier les enjeux, évaluer les sensibilités et définir les contraintes en l'absence de tout projet d'aménagement, afin d'étudier, dans la suite des études, les impacts des variantes du projet par rapport à cette situation de référence.

L'analyse de l'état initial a pour objet :

- d'une part, de décrire la qualité environnementale de l'aire d'étude, à partir de données connues au moment de l'étude d'environnement, et les perspectives d'évolution jusqu'à la date de réalisation du projet ;
- d'autre part, de fournir les éléments de référence qui serviront à évaluer les impacts du projet sur l'environnement.

La recherche de ces éléments est nécessaire au stade de l'étude d'impact, mais ce recueil doit avoir été initié dès les études préliminaires, même si, à ce stade, il manque parfois des précisions techniques quant à la définition exacte du projet.

Le rapport d'étude intitulé *« Études d'impact d'infrastructures routières, volets "air" et "santé" - État initial et recueil de données» [37],* publié en février 2009 par le CERTU, décrit dans le détail les éléments indispensables lors de cette phase d'étude. Il convient de s'y reporter pour plus de détails, ainsi qu'au Chapitre 10 de l'*annexe technique à la Note méthodologique [4]*.

4.1.2 Contenu par thème et sources d'informations

4.1.2.1 Qualité de l'air

Du point de vue de la qualité de l'air proprement dite, l'état initial consiste en une estimation des niveaux de pollution dans les zones d'implantation des têtes de tunnels et le cas échéant de leurs unités de ventilation. Il s'agit d'évaluer la qualité de l'air sur le tracé du tunnel avant sa mise en service, en vue d'établir un état « zéro ».

L'état initial permet d'apprécier la pollution en un point donné une fois le projet réalisé, en ajoutant aux niveaux de concentration mesurés lors de l'état initial les niveaux de pollution dus au tunnel, calculés lors des phases ultérieures d'étude.

Selon le degré de sensibilité de l'aire d'étude et selon les données disponibles, l'analyse de l'état initial relatif à la thématique « air » pourra s'appuyer sur des données préexistantes ou nécessiter un recueil spécifique.

Pour l'utilisation de données existantes, les sources principales sont :

- le Réseau de Surveillance de la Qualité de l'Air (RSQA) et ses Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA),
- la Base de Données de la Qualité de l'Air (BDQA),
- les Schémas Régionaux du Climat, de l'Air et de l'Énergie (SRCAE) qui vont remplacer les Plans Régionaux pour la Qualité de l'Air (PRQA),
- les Plans de Déplacements Urbains (PDU),
- les Plans de Protection de l'Atmosphère (PPA),
- les Dossiers de Voirie d'Agglomération (DVA).

Si les données citées ci-dessus sont inexistantes ou insuffisantes, il faut mener des campagnes de mesure in situ spécifiques, par exemple à l'aide d'analyseurs, de tubes passifs ou de bio-indicateurs végétaux. Pour pouvoir exploiter correctement de telles campagnes, il est primordial de connaître les conditions météorologiques rencontrées pendant les périodes de mesure. Les relevés de vitesse et de direction de vent pourront parfois être obtenus à partir d'une station météorologique fixe, mais ces stations sont souvent éloignées du lieu de mesure, et il est alors préférable d'en prévoir une en complément du dispositif de mesure de pollution.

Cet équipement est d'ailleurs souvent intégré aux stations de mesure mobiles.

Pour ce qui concerne le choix des polluants à étudier, on se reportera au 3.4.

4.1.2.2 Qualité des sols

Les données relatives à la qualité des sols peuvent être obtenues auprès de l'Institut National de Recherche Agronomique, des Chambres d'agriculture ou des DREAL (Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement).

Parfois, il est nécessaire de mener des campagnes de mesure spécifiques par prélèvements sur le site puis analyses en laboratoire.

4.1.2.3 Le recensement des émissions

Des données générales d'émissions liées au trafic routier pourront être obtenues au sein d'inventaires d'émissions par sources auprès des DREAL et du CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique).

Dans la plupart des cas, seule une modélisation permet d'obtenir des données à une échelle suffisamment fine.

4.1.2.4 Données météorologiques, topographiques, de rugosité et de bâti

Pour ce qui concerne les sources utiles à l'obtention de données météorologiques, topographiques, de rugosité et de bâti, il conviendra de se reporter au 4.3.3.

4.1.2.5 Données de population et indicateurs sanitaires

La *circulaire du 17 février 1998 [1]* rend obligatoire l'étude des effets des projets sur la santé.

L'état initial doit obligatoirement identifier les populations exposées dans la bande d'étude, en précisant :

- leur type (résidents, bureaux, activités, scolaires, etc.),
- leur nombre (nombre d'habitations individuelles ou collectives touchées par les émissions) pour chaque catégorie d'effet,
- leur degré d'exposition en fonction de leur distance à la source ou de leur activité,
- leur réceptivité ou leur vulnérabilité relative (hôpitaux, écoles, etc.).

Ces données pourront être établies en s'appuyant sur les bases de données « Îlots » ou « Iris » de l'INSEE [(18)] , sur des photos aériennes, sur les documents d'urbanisme ou sur des enquêtes de terrain.

En complément, les bases de données d'occupation du sol citées en 4.3.3 pourront aussi être utiles au travail d'estimation de la population.

Il faudra aussi s'attacher à repérer les secteurs particulièrement vulnérables tels que les espaces et équipements publics, les lieux d'habitation et les établissements sensibles comme les hôpitaux, les cliniques, les centres de repos ou les établissements scolaires.

Les indicateurs sanitaires relatifs aux populations recensées pourront être recherchés auprès des ARS (Agences Régionales Sanitaires), des ORS (Observatoires Régionaux de la Santé) et des CIRE (Cellules Inter-régionales d'Épidémiologie).

(18) Institut National de la Statistique et des Études Économiques

4.2 LE CALCUL DES ÉMISSIONS POLLUANTES

4.2.1 Données de trafic

L'acquisition des données de trafic constitue une étape préalable indispensable au calcul des émissions de polluants, car c'est sur ces données que repose toute la suite des calculs.

Comme l'exposera la suite de ce guide, l'évaluation des impacts lors des études préliminaires est à conduire au regard de valeurs moyennes annuelles. Il s'agira en particulier d'évaluer les émissions et les concentrations pour une heure moyenne de l'année, et de les comparer aux moyennes annuelles de concentration fixées par la loi sur l'air dans l'air ambiant.

Pour les projets en milieu interurbain, la valeur moyenne annuelle de trafic à prendre en compte sera toujours directement disponible, car dans de tels cas, les études de trafic sont menées pour une heure moyenne de l'année. Les valeurs fournies, qui correspondent au trafic d'une journée moyenne de l'année différenciées pour les véhicules légers et les poids lourds, sont exprimées en « Trafic Moyen Journalier Annuel » (TMJA). Ce sont ces valeurs qui sont à prendre en compte pour l'étude d'impact.

Pour les projets en milieu urbain, la valeur moyenne annuelle de trafic ne sera pas donnée directement par les études de trafic, qui portent la plupart du temps exclusivement sur les épisodes de saturation du réseau. En conséquence, le type de données fournies se rapporte à l'heure de pointe du soir (HPS) ou à l'heure de pointe du matin (HPM), tous les types de véhicules étant comptabilisés en unités de véhicule particulier (uvp). Pour les besoins de l'étude d'impact sur la qualité de l'air, il sera donc nécessaire de transformer les valeurs de trafic à l'heure de pointe en valeurs de trafic moyennes annuelles. Pour cela, on s'appuiera sur l'expérience des mesures de trafic

réalisées en continu, qui permettent d'établir un rapport entre le trafic total journalier et le trafic à l'heure de pointe. Ce rapport varie en fonction du type de voie (rue, route, voie rapide ou autoroute), du milieu considéré (centre-ville, péri-urbain, rase campagne) et bien sûr du niveau de saturation. Lorsqu'aucune donnée particulière n'est disponible, une approximation du rapport est obtenue en prenant une valeur de 10 : Trafic heure de pointe = Trafic moyen journalier annuel / 10.

4.2.2 Facteurs d'émissions

La quantité de polluant sortant par les têtes dépend, d'une part, du nombre de véhicules transitant dans le tunnel (trafic routier) et, d'autre part, du dégagement unitaire des véhicules.

Les émissions polluantes sont calculées à partir de facteurs d'émission unitaires qui correspondent à la masse de polluant émise par un véhicule automobile en circulation. Ces facteurs d'émission sont exprimés en g/km/véhicule.

Pour plus de détails concernant les paramètres d'influence des émissions, on se reportera au guide *« Émissions de polluants et consommation liées à la circulation routière : paramètres déterminants et méthode de quantification » [38]* publié par l'ADEME. Ce guide aborde la question du choix du parc automobile, qui n'est pas traitée ici.

4.2.3 Les méthodes de calcul disponibles

Quatre méthodes de calcul des émissions peuvent ici être citées :

- la méthode Copert,
- la méthode du Centre d'Études des Tunnels,
- la méthode de l'Association Mondiale de la Route,
- la méthode ARTEMIS.

4.2.3.1 Méthode Copert

Les facteurs d'émissions sont donnés par les rapports COPERT III (Computer Program to Calculate Emissions from Road Transport) et COPERT IV publiés par l'Agence Européenne d'Environnement en juillet 1999 et août 2007. COPERT IV est une actualisation des facteurs d'émission proposés dans COPERT III.

Les facteurs dépendent du type de véhicule (véhicule particulier, véhicule utilitaire léger, poids lourds, car, bus ou deux roues), de son mode de carburation (essence ou diesel), de sa cylindrée et de sa date de mise en circulation. Ces facteurs d'émissions ont été déterminés à travers des mesures réelles effectuées par plusieurs laboratoires européens sur un large panel de véhicules. La France est représentée par l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS devenue IFSTTAR), qui travaille depuis de nombreuses années sur la connaissance des émissions unitaires.

La méthodologie COPERT permet de prendre en compte :

- les émissions à chaud,
- les sur-émissions à froid pour les véhicules légers,
- les sur-émissions liées à la pente pour les poids lourds, les bus et les autocars,
- les sur-émissions liées à la charge des poids lourds, des bus et des autocars,
- les corrections liées aux améliorations des carburants,
- les évaporations à l'arrêt et en circulation des véhicules légers essence et des deux roues.

Les émissions unitaires sont quantifiées pour des cycles cinématiques précis, qui permettent d'établir les courbes d'émission en fonction de la vitesse moyenne.

4.2.3.2 La méthode du Centre d'Études des Tunnels (CETU)

Le CETU a élaboré une méthode de calcul des émissions routières spécialement adaptée au cas des tunnels. Cette méthode est décrite dans le document intitulé *« Calcul des émissions de polluants des véhicules automobiles en tunnel » d'avril 2002 [39]*, disponible auprès du CETU. Elle consiste à multiplier des facteurs d'émissions unitaires dépendant du type de véhicule, de leur technologie et des conditions de circulation par le nombre de véhicules circulant dans le tunnel. Plusieurs paramètres doivent être pris en compte, comme l'horizon d'étude, le type d'itinéraire et l'altitude.

La méthode s'attache à prendre en compte les variations des caractéristiques des poids lourds (masse, puissance et âge) selon le type d'itinéraire (urbain, interurbain ou international).

Les données utilisées sont issues d'études effectuées dans le cadre de différents programmes européens auxquels ont participé l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, la France, la Grèce, le Royaume-Uni et la Suisse. On y retrouve les résultats de COPERT III, mais aussi ceux du TUG (Autriche) communiqués dans le cadre du Comité de l'exploitation des tunnels routiers de l'AIPCR, et de mesures spécifiques qui avaient été effectuées par l'INRETS à la demande du CETU.

Cette méthode est en cours d'actualisation. La nouvelle version intégrera des données très récentes, tirées de la base COPERT IV. Seront ainsi pris en compte des facteurs d'émissions mesurés sur les véhicules les plus récents (Euro IV), ainsi que des facteurs d'émissions pour les véhicules du futur, construits à partir des réglementations Euro V et Euro VI. La méthode actualisée intégrera par ailleurs la dernière version du parc automobile français donnée par l'INRETS. Cette nouvelle méthode sera publiée par le CETU courant 2012.

4.2.3.3 La méthode de l'Association Mondiale de la Route (AIPCR)

Cette méthode est exposée dans le guide *« Tunnels routiers – Émissions des véhicules et besoins en air pour la ventilation des tunnels » [34]* de l'AIPCR. Cette méthode et la méthode du CETU sont très proches. Les bases de données utilisées pour établir les coefficients d'émissions unitaires sont en partie communes aux deux méthodes. La provenance des données est essentiellement européenne (Autriche, Allemagne, Suisse et Pays-Bas en particulier) avec parmi les données les plus récentes celles des programmes de recherche Artemis, Particulates et Cost 346.

Le gros défaut de cette méthode est de ne pas intégrer de parcs automobiles nationaux spécifiques. Pour un calcul de tunnel en France, il ne sera donc pas possible de prendre en compte les spécificités françaises (taux de diesel par exemple).

Une version actualisée de la méthode AIPCR sera publiée prochainement.

4.2.3.4 La méthode ARTEMIS

Le modèle Artemis, publié en octobre 2007, a été élaboré au niveau européen dans un souci d'harmonisation du calcul des émissions des polluants d'origine routière. Il intègre une base de données d'émissions provenant de plusieurs pays européens. Au lieu de proposer des facteurs d'émission variant avec la vitesse moyenne des véhicules, Artemis propose une approche par situation de trafic, définie par :

- une zone (rurale ou urbaine),
- une condition de trafic (fluide, saturé, etc.),
- un type de voie (autoroute, route nationale, etc.)
- une vitesse limite.

Des travaux sont en cours pour produire un outil basé sur la méthodologie Artemis. L'objectif du futur outil « Impact-Artemis » (dénommé Ademis), élaboré par l'Ademe, est une utilisation simplifiée de la méthodologie Artemis, en réduisant notamment le nombre de situations de trafic et en les adaptant aux besoins des futurs utilisateurs.

4.2.4 Choix d'une méthode

L'objectif de ce chapitre n'est pas d'imposer une méthode pour le calcul des émissions de polluants. On peut simplement dire que dans le cas de projets routiers en général, c'est la méthodologie COPERT qui est utilisée le plus couramment par les bureaux d'études.

Concernant les tunnels, les données d'émissions exposées dans le guide du CETU *[39]* et celui de l'AIPCR *[34]* sont un peu mieux adaptées, car elles permettent de prendre en compte certaines de leurs spécificités (par exemple la remise en suspension des particules et le calcul d'opacité à partir des valeurs de concentration en particules). On conseillera donc d'utiliser plutôt ces méthodes, et en particulier la méthode CETU réactualisée (à paraître en 2012).

4.3 LE CALCUL DE LA DISPERSION DES POLLUANTS AU VOISINAGE DES TUNNELS

4.3.1 Position du problème

La qualité de l'air au voisinage des tunnels routiers est un élément essentiel à prendre en compte lors de l'étude de ces ouvrages et de leur ventilation.

La particularité d'une tête de tunnel est qu'elle constitue une discontinuité du point de vue des niveaux de pollution admissibles et observés. En termes de niveaux admissibles, la pollution tolérée dans un tunnel est plus importante qu'à l'air libre, car les temps d'exposition y sont plus faibles. Par ailleurs, même s'il ne génère pas plus de pollution qu'une route à ciel ouvert, le tunnel est un milieu confiné dans lequel les polluants émis par le trafic s'accumulent, si bien que les têtes constituent une source de polluants concentrés vis-à-vis de l'environnement extérieur. Il est donc clair que le respect des normes relatives à l'air ambiant à proximité des têtes de tunnel sera à examiner, et que le respect des normes dans le tunnel grâce à une bonne gestion de la ventilation ne garantit pas l'absence de problème de qualité de l'air en tête de tunnel.

L'enjeu de la modélisation de la dispersion des polluants rejetés par un tunnel est de décrire le champ de concentration dans la zone d'impact extérieure au tunnel, où les niveaux de pollution sont certes inférieurs à ceux en tunnel, mais peuvent toutefois excéder les valeurs limites fixées par la loi sur l'air pour la protection de la santé. L'étude de la dispersion de la pollution est une étape majeure de l'évaluation de l'impact du tunnel sur son environnement.

La modélisation du comportement et de l'évolution des polluants doit s'appuyer sur quatre étapes fondamentales :

- la définition précise du cahier des charges de l'étude et le choix de l'outil de modélisation,
- le recueil des données d'entrée : orographie, occupation des sols, météorologie, émissions,
- le calcul du transport, de la dispersion et éventuellement de la transformation des polluants,
- l'exploitation des résultats produits.

4.3.2 Définition de l'étude de dispersion et choix du modèle

Si la dispersion atmosphérique des polluants est très étudiée, elle n'en reste pas moins complexe, et le cas du rejet en tête de tunnel constitue lui-même un problème particulier à traiter. En effet, contrairement à la plupart des sources usuelles, une tête de tunnel apporte une quantité de mouvement horizontale non négligeable. On est alors en présence d'un écoulement très complexe qui résulte de l'interaction d'un jet avec la couche limite atmosphérique. Le paramètre retenu pour quantifier cette interaction est le rapport entre la vitesse du rejet et la vitesse du vent à une altitude de référence (en général 10 mètres au-dessus du niveau du sol). A cette particularité s'ajoutent les phénomènes habituels de la dispersion atmosphérique : effet du trafic, stabilité thermique, prise en compte de la chimie, etc.

Avant de choisir un modèle, il est toujours nécessaire de définir le niveau de précision que l'on veut obtenir. Il faut aussi garder à l'esprit que le calcul de dispersion ne constitue qu'une étape de l'étude d'impact, et que sa précision doit être cohérente avec celle des autres sources de données (étude de trafic et étude météorologique). A ce titre, une bonne définition des objectifs de l'étude est primordiale.

Certains points méritent d'être correctement identifiés afin de choisir l'outil de calcul à appliquer :

- les polluants visés : gaz ou particules, polluants primaires qui sont censés ne pas interagir avec les autres composants de l'atmosphère ou polluants secondaires issus de réactions ;
- la nature des sources prises en compte : cheminée de ventilation, tête du tunnel, etc.
- l'échelle spatiale : étendue du domaine de calcul, qui peut varier de quelques centaines de mètres autour de la source (échelle locale) à quelques dizaines de kilomètres (échelle urbaine) ;
- le niveau de détail dans la description du site (présence d'obstacles ou de bâtiments, complexité du relief, évaluation de la ou des rugosités, etc.) ;
- l'échelle temporelle, pour laquelle on peut schématiquement définir deux analyses possibles :
  - l'analyse des niveaux chroniques de pollution afin d'évaluer l'exposition des populations et les effets sur leur santé. Les scénarios d'évaluation des risques sanitaires se calent en effet le plus souvent sur une base temporelle annuelle, voire pluriannuelle. Ainsi, les données d'entrée (émissions et météorologie) sont prises en compte sur une période longue de l'ordre d'une année. Les émissions sont des valeurs moyennes éventuellement pondérées suivant la saison ou d'autres paramètres ; les données météorologiques sont issues de la rose des vents et des roses de stabilité ;
  - l'analyse du cas le plus pénalisant, pour une ou plusieurs sources de polluants (le calcul est réalisé pour une situation météorologique et des données d'émission fixées - il s'agit d'un calcul stationnaire, sans évolution temporelle).

4.3.3 Le recueil des données d'entrée

4.3.3.1 Météorologie

Le choix des données météorologiques dépend directement de l'échelle temporelle retenue pour les calculs. Pour l'analyse des niveaux chroniques, il faut calculer le niveau de concentration pour chaque situation météorologique, puis en déduire la concentration « moyenne » calculée au prorata de l'occurrence de chaque situation sur la rose des vents. Pour l'étude du cas le plus pénalisant, seule la situation météorologique correspondante est nécessaire.

Toutes les données (roses des vents, thermométrie et hauteur de couche de mélange) peuvent être obtenues auprès de la station Météo France la plus proche du site du projet. Il faudra toutefois toujours examiner dans quelle mesure ces données peuvent être utilisées, car les conditions locales du projet peuvent être très différentes de celles de la station Météo France.

4.3.3.2 Rugosité et topographie

Les caractéristiques du terrain ont une influence très importante sur l'écoulement et la dispersion. Elles sont prises en compte globalement par la hauteur de rugosité z_o (exprimée en mètres), qui dépend du relief, de la taille et de la répartition des bâtiments éventuellement présents, et de la nature du terrain (mer, forêt, prairies, bâti, etc.).

Au niveau national, les fichiers Corine Land Cover et BD Carto®, décrivant l'occupation des sols, peuvent être utilisés pour déterminer les rugosités sur l'aire d'étude. On peut également utiliser le schéma numérique de représentation des transferts d'énergie entre le sol, la végétation et l'atmosphère ISBA (Interactions Sol-Biosphère-Atmosphère), développé par le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM, unité de recherche mixte CNRS-Météo-France).

Pour la connaissance de la topographie du site, la BD Alti® de l'IGN, qui est un extrait de la BD topo®, est la principale base de données existante.

4.3.4 Les différents types de modèle disponibles

Le choix du modèle de transport des polluants, qui dépend des réponses que l'on aura apportées aux questions précédentes, doit être fait parmi une gamme d'outils très variée.

Du plus simple au plus compliqué, en fonction du contexte, les modèles suivants peuvent être utilisés : approche empirique, modèles de boîtes, modèles gaussiens simples, modèles lagrangiens, modèles eulériens et modélisation physique.

4.3.4.1 Approche par exploitation de mesures réalisées sur site ou sur maquette

Différentes modélisations empiriques des rejets de têtes de tunnel ont été réalisées à partir de mesures in situ ou de mesures sur maquettes (Administration Norvégienne des Routes par exemple *[40]*). Elles peuvent constituer une première approche, mais il ne faut pas oublier qu'elles ne fournissent qu'un résultat approximatif.

Il peut également être utile de consulter le Catalogue de cas du CETU *[41]*, qui est une compilation des résultats les plus intéressants issus des modélisations physiques (maquettes hydrauliques et aérauliques) commandées par le CETU jusqu'en 1998. Ainsi pour une dizaine de configurations différentes de débouchés de tête de tunnel, le catalogue présente, sous un format fixe, les éléments suivants :

- une photographie de la maquette réalisée et testée,
- les caractéristiques de l'ouvrage et les conditions expérimentales de l'étude,
- une vue en plan de la maquette montrant le bâti, l'implantation des points de mesure de concentration en polluant, et les directions de vent étudiées,
- un diagramme des résultats propres à chacun des points de mesure de la concentration en polluants issus du rejet, en fonction de la direction du vent et de son intensité relative.

4.3.4.2 Les modèles multi–boîtes

Dans les modèles multi–boîtes *[42]*, le domaine d'étude est découpé en plusieurs boîtes se répartissant dans tout le volume. Les concentrations sont supposées uniformes à l'intérieur de chaque volume, et en effectuant des bilans sur ces boîtes, on obtient un champ de concentration sur tout le domaine. Le champ de vitesse doit être calculé par ailleurs, et le résultat final dépend évidemment très fortement de ce calcul préalable.

4.3.4.3 Les modèles gaussiens

Les modèles gaussiens ont été initialement développés pour représenter le comportement d'un panache issu d'une cheminée. Ils sont basés sur la résolution analytique de l'équation d'advection - diffusion. Sous certaines hypothèses (champ de vent uniforme, fermeture par une loi de Fick turbulente), on obtient une description simple du champ de concentrations.

Cette formulation introduit des coefficients de dispersion dans les directions horizontale et verticale normales à la direction de l'écoulement, et l'une des difficultés majeures de mise en œuvre de ces modèles réside justement dans l'obtention d'une valeur correcte pour ces coefficients. Ils sont classiquement donnés comme une fonction de la distance à la source, de la force du vent et de la stabilité atmosphérique. Afin de formaliser la notion fondamentale de « stabilité atmosphérique », une classification basée sur des observations du gradient thermique vertical, de la nébulosité ou encore de rayonnement solaire et d'autres paramètres météorologiques a été établie (classes de Pasquill, Gifford, et Turner).

La simplicité de l'approche analytique des modèles gaussiens fait qu'ils sont bien adaptés au calcul sur le long terme. En effet, il est tout à fait envisageable de réaliser plusieurs milliers de calculs correspondant à l'ensemble des situations horaires sur une année afin d'en tirer une concentration moyenne annuelle. Cependant, leur domaine de validité est restreint, rendant leur usage délicat, car :

- la description du champ de concentrations est imprécise à proximité de la source ;
- leur usage reste limité à des situations où le relief est peu important et sans obstacles ;
- les vents faibles (inférieurs à 0,5 m/s) ne peuvent pas être convenablement traités, le panache n'ayant alors plus un profil gaussien (mais cette mauvaise prise en compte des vents faibles est commune à presque tous les modèles).

4.3.4.4 Les modèles gaussiens sophistiqués

A partir des modèles gaussiens au sens strict du terme, une nouvelle génération de modèles gaussiens plus sophistiqués a été développée pour prendre en compte le relief, la présence de bâtiments, un champ de vitesse plus complexe, des réactions chimiques,etc. Le calcul des coefficients de dispersion a lui aussi été raffiné pour aboutir à une paramétrisation continue fonction des caractéristiques de la couche limite atmosphérique.

Même avec les améliorations qu'ils comportent, les temps de calcul des modèles gaussiens restent très réduits, de l'ordre de quelques minutes pour une situation météorologique donnée, ce qui permet de calculer aisément des roses des vents complètes.

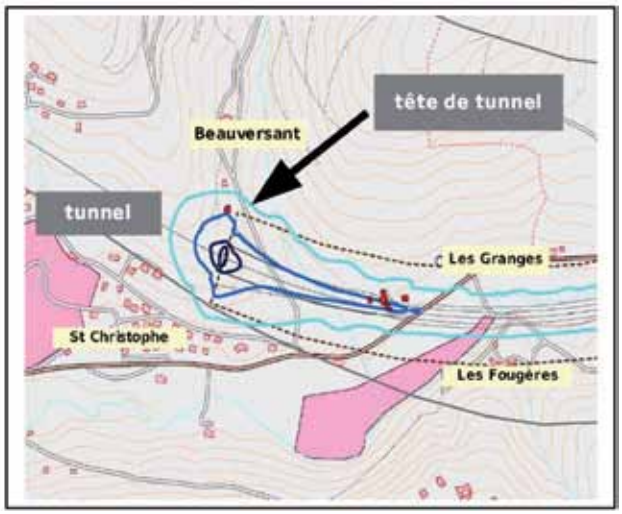


Illustration 12 - Cartographie de concentrations en dioxyde d'azote calculées à l'aide du logiciel ADMS (modèle gaussien « sophistiqué ») - CETE de Lyon

4.3.4.5 Les modèles lagrangiens

Dans les modèles lagrangiens, les panaches sont décrits par le déplacement des éléments qui le composent et qui sont suivis dans leur mouvement. Les modèles gaussiens à bouffées et les modèles particulaires sont les deux représentants de cette catégorie.

Dans les modèles gaussiens à bouffées, qui sont utilisés pour traiter des émissions non stationnaires et non homogènes, le rejet est assimilé à une succession de bouffées qui évoluent de façon gaussienne.

Dans les modèles particulaires, on « lâche » plusieurs milliers de particules dont on calcule la trajectoire, puis la concentration est déduite par un traitement statistique de ces trajectoires.

L'approche lagrangienne est efficace en champ proche, mais peut vite devenir lourde si le nombre de sources est important.

4.3.4.6 Les modèles eulériens

Les modèles qui reposent sur la résolution numérique des équations fondamentales de la mécanique des fluides (équations de Navier-Stokes) pour la partie dynamique, et de l'équation d'advection-diffusion pour la dispersion des polluants, sont aussi appelés « modèles eulériens », ou « modèles 3D ». Dans ces modèles, les équations sont discrétisées en temps et en espace, ce qui nécessite un maillage du domaine étudié, dont la construction est déterminante pour la qualité des résultats et les temps de calcul. Une stratégie judicieuse de maillage consiste à retenir une grille raffinée dans les zones où les phénomènes physiques sont déterminants (près du sol, à proximité d'obstacles) et des mailles de taille plus importante dans les zones moins problématiques.

De tels modèles permettent de traiter des écoulements complexes et de prendre en compte des effets spécifiques, comme la chimie par exemple. Ils sont cependant lourds et coûteux à mettre en œuvre, et l'utilisateur doit faire de nombreux choix délicats (maillage, modélisation de la turbulence, définition des conditions aux limites du domaine, etc.), qui exigent de solides compétences. Des indications sur la bonne utilisation de ces modèles sont données dans l'Annexe D du fascicule 4 du *guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers [12]*.

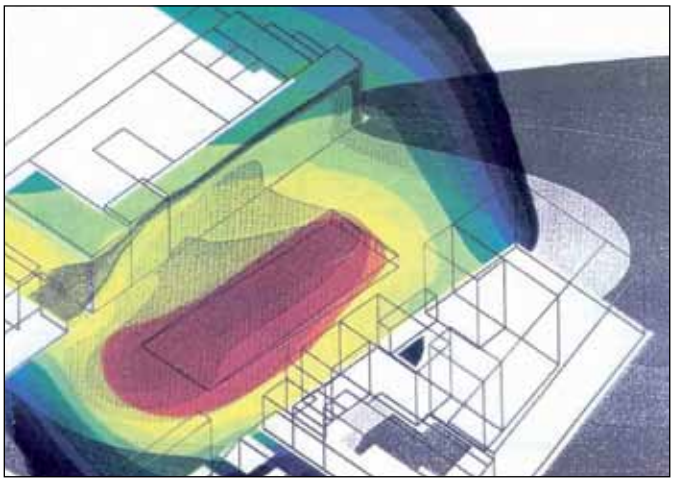


Illustration 13 - Exemple de présentation de résultats de simulation numérique 3D - Champ de concentration (document ARIA)

Dans les modèles basés sur la discrétisation des équations de Navier-Stokes et de l'équation d'advection-diffusion, le temps de calcul nécessaire pour modéliser une situation météorologique donnée est de plusieurs heures, ce qui rend en pratique impossible la modélisation d'une rose des vents complète.

Illustration 14 - Exemple de présentation de résultats de simulation numérique 3D - Courbes de concentration (document INERIS)

4.3.4.7 Les modèles physiques

La modélisation physique consiste à reproduire le site sur maquette à échelle réduite, dans une veine d'essai aéraulique ou hydraulique. Elle s'appuie sur la notion de similitude et permet d'étudier des sites très complexes.

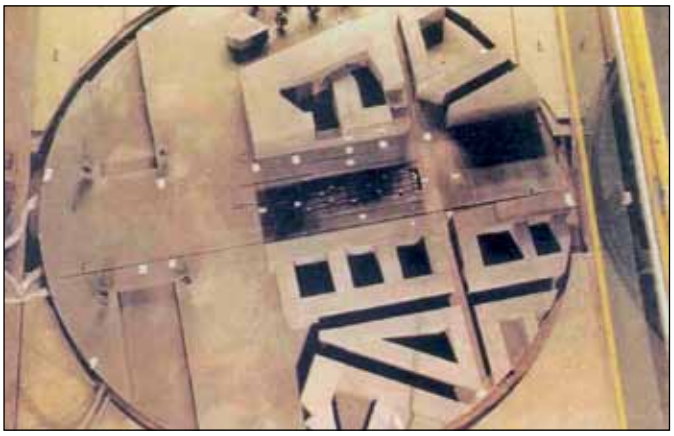


Illustration 15 - Vue d'une maquette hydraulique installée dans une veine d'essais (document CERG)

Pour plus d'informations concernant le principe des maquettes, il conviendra de se rapporter au Guide pour la prise en compte de la qualité de l'air au voisinage des tunnels routiers *[32]*, publié en juin 2000 par le CETU.

Illustration 16 - Vue d'une maquette aéraulique en soufflerie atmosphérique (document CSTB)

type de modèle	gaussien traditionnel	gaussien sophistiqué	lagrangien	eulérien	physique
avantages	• simple à mettre en œuvre • exploitation statistique facile • temps de calcul très faible	• simple à mettre en œuvre • exploitation statistique facile • possibilité de prendre en compte le relief et certains obstacles en champ proche • prise en compte possible de la chimie • temps de calcul modéré	• temps de calcul assez faible	• possibilité de traitement des écoulements complexes • prise en compte possible de la chimie	• possibilité de traitement des écoulements complexes. • fiabilité des résultats
inconvénients	• inadapté en champ proche • approche très simplifiée • pas adapté aux sites complexes à petites échelles • pas de prise en compte de la chimie	• limitations en champ proche • approche simplifiée • problèmes en cas de topographie complexe (falaises par exemple)	• prise en compte de la chimie possible mais complexe	• lourd à mettre en œuvre • utilisation délicate	• lourd à mettre en œuvre • pas de prise en compte de la chimie
coût	faible	faible	moyen	élevé	très élevé
champ d'application	études globales	recommandé pour les études préalables à la déclaration d'utilité publique	peu employé à ce jour pour les têtes de tunnels	réservé aux cas où l'architecture et la position des têtes sont connues de façon précise	réservé aux études très fines

Tableau 4 - Synthèse des caractéristiques des outils de modélisation

4.3.4.8 Synthèse

Les différentes approches présentées sont comparées dans le tableau 4.

Il apparaît que suivant les caractéristiques de l'étude à réaliser, certaines approches ne sont pas appropriées.

Les modèles gaussiens traditionnels sont très simples et seront réservés à des études globales, à des échelles importantes.

Les modèles gaussiens sophistiqués, capables de prendre en compte des phénomènes comme la chimie ou le relief et utilisant un calcul raffiné des coefficients de dispersion, seront bien adaptés aux stades d'études préalables à la déclaration d'utilité publique. Mais ils ne conviendront pas à une étude pointue sur un site complexe, car ils ne peuvent pas prendre en compte correctement les bâtiments.

Dans ce dernier cas, la modélisation physique est une meilleure approche, malgré son coût. L'utilisation de modèles basés sur la discrétisation des équations de Navier-Stokes et de l'équation d'advection-diffusion, qui demande un investissement important, est elle aussi réservée à l'étude de sites particulièrement sensibles du point de vue de la qualité de l'air.

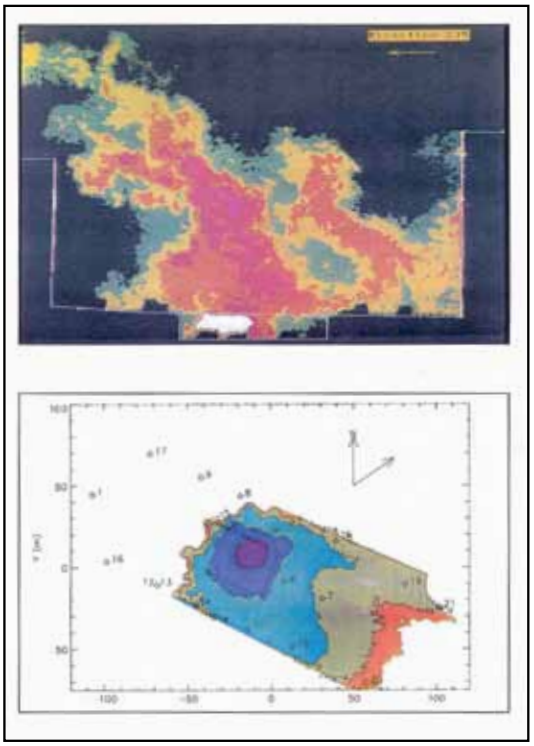


Illustration 17 - Modèles physiques - Exemples de visualisation des écoulements et répartition des concentrations obtenues par fluorescence induite par laser et traitement d'images (document CNRM)

4.4 LE CONTENU DU VOLET SANITAIRE

Une fois les niveaux d'exposition calculés, la façon de traiter le volet sanitaire de l'étude d'impact d'un tunnel ne comporte aucune spécificité par rapport aux projets routiers à l'air libre. Afin de faciliter le travail du lecteur, la méthode d'étude est néanmoins brièvement rappelée dans les paragraphes qui suivent. Le lecteur intéressé trouvera également ici les références utiles pour aller plus loin.

4.4.1 Rappel du contexte et du cadre réglementaire

Selon les termes de l'article 19 de la *loi sur l'air [5]*, une étude des effets du projet sur la santé doit être établie pour tous les projets nécessitant une étude d'impact. Cette étude doit être accompagnée des mesures envisagées pour supprimer, réduire, et si possible compenser les conséquences dommageables du projet sur l'environnement.

Le ministre de chargé de l'Environnement a défini, dans la *circulaire du 17 février 1998 [1]*, les principes généraux qui doivent présider à l'élaboration de la partie sanitaire des études d'impact. Ces différents points sont les suivants :

- l'étude doit porter sur tous les thèmes pertinents au regard des risques du projet sur la santé (air, bruit, eau, sols et sécurité routière) et évaluer les effets directs et indirects ;
- l'étude doit apprécier les effets cumulatifs par rapport aux nuisances extérieures ;
- l'étude doit quantifier les populations exposées ;
- l'étude des effets sur la santé porte à la fois sur la phase chantier et sur la phase exploitation.

Le ministre chargé de la santé a transmis aux services déconcentrés, par *circulaire du 3 février 2000,* un guide *dit « guide de lecture et d'analyse du volet sanitaire des études d'impact » [7].* Ce guide préconise de suivre la démarche d'évaluation des risques formalisée aux États-Unis par l'Académie Nationale des Sciences, l'administration fédérale de l'alimentation et des médicaments et l'agence pour la protection de l'environnement. Cette démarche connaît une application française dans le cadre de la politique nationale de gestion des sites et sols pollués (Ministère de l'Environnement, 1999).

Le ministère chargé de la Santé a par ailleurs, dans une *circulaire du 11 avril 2001 [8]*, suggéré aux préfets de s'appuyer sur les Agences Régionales Sanitaires pour procéder à l'analyse du contenu des études des effets sur la santé des projets soumis à étude d'impact. En annexe de cette circulaire figure le contenu minimal des dites études.

La circulaire Santé - Équipement - Écologie du 25 février 2005 précise et clarifie la méthodologie à mettre en œuvre pour la prise en compte des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact des infrastructures routières.

Une autre circulaire importante en termes de seuil d'acceptabilité du risque est la *circulaire du 10 décembre 1999 [43]* émanant du ministère chargé de l'Environnement et relative aux objectifs de dépollution des sols. En effet, c'est le seul document en France qui définit un seuil d'excès de risque individuel à ne pas dépasser pour les polluants sans seuil. Ce seuil (19) est fixé à 10^{-5}.

4.4.2 Documents techniques

Les principaux documents techniques qui déclinent la démarche en France sont les suivants :

- le référentiel de l'INERIS : *« Évaluation des Risques Sanitaires dans les Études d'impact des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement - Substances chimiques » [44]* publié en 2003, destiné au cas des industries,
- le guide de l'Institut de Veille Sanitaire : *« Guide pour l'analyse du volet sanitaire des études d'impact » [45]* de janvier 2000,
- le rapport de travail *« Sélection des agents dangereux à prendre en compte dans l'évaluation des risques sanitaires liés aux infrastructures routières » [46]* de novembre 2004,
- la *note méthodologique sur l'évaluation des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact routières (CERTU et SETRA) de février 2005 [3]* qui donne les éléments nécessaires à cette approche.

D'autres documents apportent également des informations quant aux effets sur la santé de la pollution atmosphérique. Citons le travail de la Société Française de Santé Publique sur *« La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique » [47]* qui fait le point sur 15 ans de recherche internationale.

Le rapport intitulé *« Sélection des agents dangereux à prendre en compte dans l'évaluation des risques sanitaires liés aux infrastructures routières » [31]* a été établi par un groupe de travail réunissant des membres de la Direction générale de la Santé, de l'ADEME, de l'InVS, de l'INRETS, du CERTU, du SETRA et du CETE Méditerranée. Il est destiné aux services déconcentrés et aux bureaux d'études.

Son objectif est de proposer une liste des différentes substances à prendre en compte dans les évaluations du risque sanitaire conduites dans le cadre des projets routiers, ainsi que les effets sanitaires à considérer et les valeurs toxicologiques de référence les plus pertinentes à utiliser pour les substances proposées.

Ceci correspond aux premières étapes du travail à réaliser dans toute évaluation du risque sanitaire.

L'objectif final est d'aider les professionnels des bureaux d'études à réaliser les études les plus appropriées en termes de pertinence et de faisabilité, et de faciliter le travail des services de l'administration chargés de l'analyse des études d'impact.

4.4.3 Contenu du volet sanitaire en fonction du niveau d'étude

Le contenu du volet sanitaire dépend du niveau d'étude requis (cf. 4 - Les outils d'évaluation, de l'état initial au risque sanitaire) :

- les études de niveau I requièrent une étude détaillée « santé » avec comparaison aux seuils réglementaires de qualité de l'air ;
- les études de niveau II requièrent une analyse simplifiée des effets sur la santé avec utilisation de l'IPP (indice pollution-population - cf. 6.1.3) ;
- les études de niveau III et IV requièrent une simple information des effets de la pollution atmosphérique sur la santé.

4.4.3.1 Étude de niveau I

Pour ce niveau d'étude, il est nécessaire d'engager une étude sanitaire détaillée. La démarche retenue doit suivre la méthodologie préconisée par le guide de l'InVS *[25]*, présentée dans la circulaire DGS du 11 avril 2001 sur l'analyse des effets sur la santé dans les études d'impact, et la grille de lecture du guide InVS qui promeut la démarche d'évaluation des risques sanitaires (ERS) *[24]*.

La démarche de l'ERS se décline en quatre étapes.

Étape 1 : Identification des dangers

Cette première phase consiste à recenser les agents dangereux pouvant être émis par l'infrastructure, puis à identifier les effets toxiques de chaque agent dangereux, par voies respiratoire et orale, selon la durée d'exposition. Un choix raisonné des éléments traceurs du risque est effectué en fonction de la toxicité intrinsèque à chaque élément.

(19) cette valeur de 10^{-5} correspond à la probabilité de voir apparaître un cancer sur 100 000 individus, du fait d'une exposition à un agent cancérigène.

Étape 2 : Caractérisation des relations doses-réponses ou doses-effets

Cette étape concerne d'une part, la description des symptômes pouvant être observés suite à une exposition à court et à long terme, et d'autre part, le choix des valeurs toxicologiques de référence (VTR). Si ces valeurs n'existent pas réglementairement, elles figurent dans la littérature scientifique. On distingue deux types d'effets : les effets systémiques ou à seuil, et les effets sans seuil, ou cancérigènes, ou génotoxiques, pour lesquels des VTR différentes sont disponibles (voir encadré). Les VTR (valeurs numériques établies par les instances nationales ou internationales à partir de l'examen approfondi des connaissances toxicologiques et épidémiologiques) décrivent la relation entre une dose et un danger.

Effets toxiques avec ou sans seuil

L'étape finale de l'évaluation des risques sanitaires comprend deux parties : le calcul des estimations de risques et l'analyse de l'incertitude, dont une partie est assimilable à la discussion qui s'organise autour de toute étude scientifique. Les risques pour la santé humaine sont estimés de manière différente selon que le danger est considéré comme survenant ou non au-delà d'une limite de dose.
On distingue classiquement deux types d'effets toxiques :
• les effets toxiques réputés à seuil,
• les effets toxiques réputés sans seuil.

Effets toxiques réputés à seuil

En ce qui concerne les effets aigus et chroniques non cancérigènes, un quotient de danger (QD) est calculé en faisant le rapport entre la dose moyenne journalière (DMJ), ou la concentration moyenne dans l'air (CMA) pour la voie respiratoire, et la valeur toxicologique de référence, pour la voie d'exposition considérée. Cette valeur n'est pas un risque, et l'évaluation est ici de nature qualitative : un rapport inférieur à 1 signifie que la population exposée est théoriquement hors de danger, alors qu'un quotient supérieur à 1 signifie que l'effet toxique peut se déclarer, sans qu'il soit possible de prédire la probabilité de survenue de cet événement.

Effets toxiques réputés sans seuil

Pour les effets cancérigènes et mutagènes, l'évaluation des risques est véritablement quantitative. La probabilité d'occurrence du cancer pour la vie entière des sujets exposés, qui vient s'ajouter au risque de base non lié à cette exposition, est appelée excès de risque individuel (ERI) : elle est calculée, pour chaque voie, en multipliant l'excès de risque unitaire (ERU) par la dose moyenne journalière totale « vie entière » (ou l'unité de temps pertinente) ou par la concentration « vie entière » dans l'air.

Le produit de ce risque par l'effectif (n) de la population exposée fournit l'excès de risque collectif (ERC), aussi appelé impact. Il représente une estimation du nombre de cancers en excès, liés à une exposition étudiée, qui pourraient survenir au cours de la vie de ce groupe d'individus.

Ces VTR permettent donc d'établir les relations entre une dose et un agent dangereux et la fréquence (réponse) ou la gravité du danger (effet) qu'elle provoque.

Pour les effets cancérigènes, on donnera l'ERU (Excès de Risque Unitaire), qui est la pente de la droite associant la probabilité d'effets à la dose toxique pour des valeurs faibles de la dose. Il s'agit d'une hypothèse linéaire permettant de calculer la probabilité au delà du domaine des doses réellement expérimentées. C'est une estimation haute du risque d'apparition d'un cancer par unité de dose lié à une exposition durant la vie entière applicable à tous les individus d'une population, qu'ils appartiennent ou non à un groupe sensible.

Pour les effets non cancérigènes on donnera la concentration admissible dans l'air (CAA) quand l'exposition a lieu par voie respiratoire. La CAA définit, pour une durée d'exposition spécifiée, la teneur maximale théorique de l'air ambiant en agent toxique qu'un individu, issu d'un groupe sensible ou non, peut inhaler quotidiennement sans que survienne un effet nuisible à sa santé.

Étape 3 : Évaluation des expositions

L'évaluation des expositions consiste, d'un côté, à décrire les personnes exposées (âge, sexe, caractéristiques physiologiques, éventuelles pathologies et sensibilité) et les voies de pénétration des agents toxiques. De l'autre, elle doit quantifier la fréquence, la durée et l'intensité de l'exposition à ces substances – exprimée par une dose moyenne journalière ou, pour l'inhalation, par une concentration moyenne dans l'air pour chaque voie pertinente.

Étape 4 : Caractérisation des risques sanitaires

L'étape finale de l'évaluation des risques sanitaires comprend deux parties : les estimations des risques et l'analyse de l'incertitude. Cette étape correspond à une synthèse et à une mise en relation des informations rassemblées au cours des étapes précédentes, ainsi qu'une analyse critique de la validité et de l'étendue potentielle des risques.

4.4.3.2 Étude de niveau II

Cette étude simplifiée de la comparaison des variantes et de la solution retenue sur le plan de la santé est réalisée grâce à l'utilisation d'un indicateur sanitaire simplifié (IPP indice pollution-population - cf. 6.1.3) croisant les données d'émission ou de concentration en benzène et de population. En complément à l'IPP en benzène, un calcul pour les oxydes d'azote est conseillé, ces derniers étant plus sensibles aux variations induites par les différents scénarios d'aménagement envisagés.

4.4.3.3 Étude de niveaux III et IV

Pour ce niveau d'études, le volet sanitaire est très simplifié, puisqu'il ne comprend plus alors qu'une simple information des effets de la pollution atmosphérique sur la santé.

4.4.4 Les polluants à retenir suivant les niveaux d'études

Pour une étude de niveau I, on retiendra les polluants suivants, afin d'estimer le risque sanitaire :

- polluants classiques : dioxyde de soufre, monoxyde de carbone, dioxyde d'azote, particules émises à l'échappement,
- composés organiques volatils : benzène, 1.3-butadiène, acétaldéhyde, formaldéhyde, acroléine,
- hydrocarbures aromatiques polycycliques : benzo(a) pyrène,
- métaux : arsenic, baryum, cadmium, chrome, mercure, nickel, plomb.

Pour les études de niveau II, III et IV, les polluants à prendre en considération sont ceux cités dans la *note méthodologique [3]*, à savoir :

- les oxydes d'azote (monoxyde d'azote et dioxyde d'azote),
- le monoxyde de carbone,
- les hydrocarbures,
- le benzène,
- les particules émises à l'échappement,
- le dioxyde de soufre,
- le nickel,
- le cadmium.

5. LE CONTENU DES ÉTUDES D'OPPORTUNITÉ

Au stade des études d'opportunité, le sujet de la qualité de l'air et des tunnels doit avant tout être abordé à travers une présentation du projet et un exposé des phénomènes en jeu. Pour bien comprendre cette démarche, le lecteur non spécialiste des tunnels pourra se reporter au premier chapitre de ce guide, qui donne les éléments de culture générale.

Parfois, notamment si des habitations sont présentes à proximité immédiate du projet, les attentes sont plus importantes et les informations générales ne sont plus suffisantes. Une étude très simplifiée peut alors être envisagée, dans le but de caractériser la sensibilité du tunnel.

Une méthode est proposée dans ce chapitre pour établir le niveau de sensibilité du projet. Elle n'a pas pour but d'évaluer l'impact absolu du tunnel.

Compte tenu du niveau d'incertitude lié aux nombreuses hypothèses simplificatrices utilisées, l'interprétation et l'exploitation des résultats obtenus devront être réalisées avec la plus grande précaution.

Afin qu'elle puisse être utilisée dès un stade très préalable des études, la méthode qui est proposée dans les paragraphes qui suivent est très simple. Elle pourra être appliquée de manière identique quel soit le niveau d'étude au sens de la *note méthodologique [3]*, du niveau I le plus complet au nouveau IV le plus réduit.

Elle pourra également être utilisée, en première approche, lors des stades d'études ultérieurs. Il s'agira alors de déceler si le projet peut poser des problèmes du point de vue de la qualité de l'air, auquel cas les méthodes plus sophistiquées décrites aux chapitres 6 et 7 pourront être mises en œuvre dans un deuxième temps.

Les étapes successives de la méthode sont décrites ci-dessous, puis résumées dans un logigramme.

5.1 ESTIMATION DES CONCENTRATIONS AUX TÊTES

5.1.1 Calcul des émissions polluantes

Le calcul des émissions de polluants est mené selon la méthodologie conseillée au 4.2, pour les oxydes d'azote, les particules et le benzène.

Les chiffres de trafic sont ceux d'un heure moyenne de l'année, à l'horizon d'étude retenu pour le reste des études d'environnement (trafic horaire moyen annuel - cf. 4.2.1).

Le trafic horaire moyen annuel est obtenu à partir du trafic moyen journalier annuel, qui est une donnée presque toujours disponible dès ce stade des études.

5.1.2 Répartition des émissions entre les deux têtes

Dans le cas général, l'émission à une tête de tunnel peut être prise égale à la moitié des émissions calculées sur la portion d'itinéraire couverte (cf. 1.6.3). Cela est notamment vrai dans le cas de deux tubes unidirectionnels côte à côte, ou dans le cas d'un tube bidirectionnel.

Une exception est bien sûr le cas d'un tube unique unidirectionnel, où la totalité des émissions est rejetée à la tête de sortie des véhicules.

5.2 ÉVALUATION SOMMAIRE DES CARACTÉRISTIQUES DU REJET

5.2.1 Vitesse du rejet

En l'absence de calcul, on peut faire l'hypothèse que la vitesse de sortie de l'air du tunnel est de 3 m/s, qui est la vitesse minimale que les systèmes longitudinaux doivent être capables de fournir vis-à-vis de la sécurité incendie. Généralement, le simple pistonnement des véhicules conduit à des vitesses d'écoulement nettement plus élevées. L'hypothèse faite va donc dans le sens de la sécurité par rapport au risque de pollution.

Le débit d'air sortant du tunnel est donc Q = 3 x S, S étant la section du tunnel (Q en m^3/s et S en m^2).

5.2.2 Concentration du rejet

La concentration du rejet C_0 en tête de tunnel pour un polluant donné est C_0 = Émission / Q (l'émission étant exprimée en unité de masse par seconde).

Si les hypothèses de calcul conduisent à obtenir une concentration C_0 supérieure à la concentration recommandée en tunnel, cela signifie que l'effet de pistonnement est insuffisant pour assurer la ventilation sanitaire, et qu'en pratique, la ventilation mécanique serait mise en route. On peut alors faire l'hypothèse que la concentration du rejet C_0 est égale au seuil recommandé (cf. 3.3), ce qui constitue une hypothèse défavorable.

Le cas des oxydes d'azote est traité de façon particulière. Les émissions étant connues pour les oxydes d'azote totaux, alors que les seuils réglementaires sont fixés pour le dioxyde d'azote seul, la concentration du rejet en dioxyde d'azote est estimée en supposant qu'en tunnel, le rapport des concentrations NO_2/NOx est égal à 0,1 ou à une valeur supérieure (cf. 3.6).

5.3 PRISE EN COMPTE DE LA DILUTION

Les polluants émis par le rejet du tunnel contribuent à créer une sur-concentration par rapport au niveau qui serait atteint en son absence. Cette sur-concentration diminue néanmoins rapidement dès que l'on s'éloigne de la tête du tunnel.

De nombreuses études de modélisation sur maquette ont été menées au CETU par le passé. Elles recouvrent l'essentiel des conditions météorologiques (direction du vent, force du vent et conditions de stabilité de l'atmosphère) et de nombreuses configurations géométriques de têtes de tunnel.

L'ensemble de ces résultats a été compilé dans le *Catalogue de cas [41]*. Ce document constitue une source riche d'informations qui permettra au projeteur de bien appréhender le phénomène de décroissance de la concentration des rejets émis aux têtes de tunnel.

Nous n'encourageons toutefois pas à utiliser le *Catalogue de cas* pour l'estimation des niveaux de concentration d'un projet donné. En effet, chaque projet est trop spécifique pour que les résultats obtenus pour une autre configuration, même proche en apparence, puissent lui être appliqués. Par ailleurs, la grande hétérogénéité de traitement des modélisations rend impossible le calcul d'un niveau de concentration moyen calculé sur l'ensemble des essais du *Catalogue de cas*.

5.3.1 Méthode proposée

Pour offrir au projeteur une méthode pratique, nous proposons ci-dessous des valeurs de décroissance de concentration qui pourront être utilisées, en première approximation, au stade des études d'opportunité. Il s'agit de résultats obtenus au cours des années 2003 et 2004, par des mesures sur maquette aéraulique. Ces mesures ont été réalisées dans la soufflerie de l'École Centrale de Lyon, à l'occasion d'un travail de thèse financé par le CETU. La description de ces essais et la présentation complète des résultats est détaillée dans le rapport d'essais *« Étude sur maquette d'un cas de dispersion en tête de tunnel » [36]*, déjà cité plus haut (cf. 3.6 -Les oxydes d'azote).

Les mesures ont été réalisées pour une configuration très simple : tunnel (ou tranchée couverte) débouchant dans une tranchée (voir figure ci-dessous).

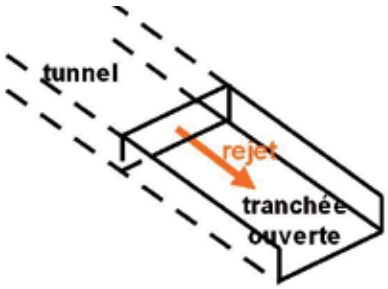


Illustration 18 - Géométrie de la configuration testée : tunnel (ou tranchée couverte) débouchant dans une tranchée ouverte

Les essais ont porté sur quatre rapports de vitesses (vitesse de rejet sur vitesse du vent) et sept orientations de vent (de 0 à 180°).

A partir de ces données, une étude statistique a été menée, afin d'établir le niveau de concentration moyen en un point situé à proximité du rejet, en fonction de sa position par rapport à la tête du tunnel [20]. Cette position est définie par l'angle *θ* et la distance *d*, *θ* donnant la direction dans laquelle se trouve le point par rapport à la direction du rejet, et *d* étant la distance entre le point et la tête du tunnel (voir illustration 19).

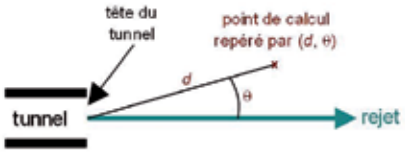


Illustration 19 - Définition de la distance d et de l'angle θ

Le niveau de concentration moyen a été calculé en retenant la même occurrence pour chacun des quatre rapports vitesse de rejet / vitesse du vent, et à chaque direction de vent. Les valeurs sont données à 3 mètres au-dessus du niveau du sol.

5.3.2 Cas des polluants passifs (benzène, particules)

Dans le cas des polluants passifs, les résultats des mesures réalisées sur maquette sont directement applicables : le coefficient de dilution mesuré expérimentalement est appliqué à la concentration initiale du rejet pour évaluer la sur-concentration due au tunnel en un point donné. Le niveau de pollution total est ensuite obtenu en ajoutant la sur-concentration au niveau de fond initial.

La forme du champ de concentration obtenu expérimentalement est représentée sur l'illustration 20.

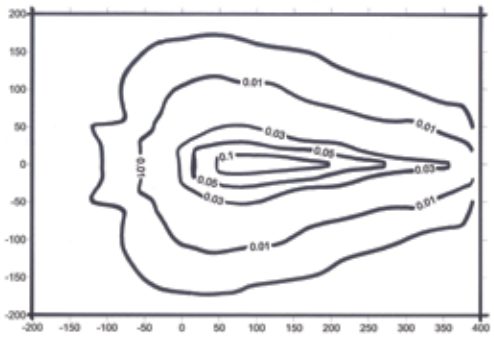


Illustration 20 - Champ de concentration obtenu en moyenne pour l'ensemble des situations testées (concentrations relatives C/C_0, distances en mètres, sur les deux axes, par rapport à la tête de tunnel)

Les valeurs numériques du champ de concentration obtenu figurent dans le tableau 5.

La grandeur donnée est celle du coefficient de dilution $\alpha_{d,\theta}$. Il s'agit du rapport entre la sur-concentration $C_{d,\theta}$ due au tunnel au niveau du point repéré par (d, θ) et la sur-concentration initiale du rejet C_0 : $\alpha_{d,\theta} = C_{d,\theta} / C_0$.

Par exemple, en un point situé à une distance de 25 mètres de la tête du tunnel dans une direction de 30° par rapport à l'axe du tunnel, le coefficient de dilution est de 0,09, ce qui signifie que la sur-concentration en ce point est de 9, pour une sur-concentration initiale en sortie immédiate du tunnel de 100. Si la concentration du rejet est de 0,15 ppb de benzène, on obtient une sur-concentration de 0,15 x 0,09 = 0,0135 ppb de benzène à 25 mètres de la tête du tunnel, dans une direction de 30°.

$\alpha_{d,\theta}$	distance *d* à la tête du tunnel					
angle θ	25 m	50 m	100 m	150 m	200 m	300 m
0°	0,07	0,10	0,19	0,10	0,05	0,02
30°	0,06	0,05	0,03	0,02	0,01	< 0,01
60°	0,04	0,03	0,02	0,01	< 0,01	< 0,01
90°	0,03	0,02	0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
120°	0,03	0,02	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01
150°	0,02	0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
180°	0,02	0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Tableau 5 - Coefficient de dilution d'un rejet de tunnel pour les polluants passifs

(20) Bien que les mesures de concentration sur maquette aient été menées en des points répartis sur un quadrillage régulier, il est apparu que le fait de ne disposer que de valeurs ponctuelles pouvait fortement biaiser l'exploitation statistique. C'est pourquoi, préalablement à l'étude statistique, une modélisation simple du champ observé a été menée, afin de transformer les mesures ponctuelles en un champ continu.

5.4 CAS PARTICULIER DES OXYDES D'AZOTE

Pour estimer la sur-concentration en dioxyde d'azote due au tunnel, il n'est pas possible d'appliquer directement le coefficient de dilution expérimental à la quantité de dioxyde d'azote présente dans le rejet. Il faut aussi prendre en compte la quantité de dioxyde d'azote créée par transformation du monoxyde d'azote présent dans le rejet initial (voir 3.6).

Ces réactions de transformation sont très dépendantes des conditions environnantes. Ceci se traduit par une évolution du rapport NO_2/NOx plus ou moins rapide selon la quantité d'ozone présente, le rayonnement, la température, etc.

Nous proposons dans ce cas d'utiliser les résultats du modèle simplifié présenté au 3.6. Le calcul direct de la sur-concentration en NO_2 due au rejet n'est pas possible : il faut d'abord calculer la concentration totale en oxydes d'azote (sur-concentration due au rejet + fond) par dilution passive (méthode similaire au benzène et aux particules), puis appliquer au résultat le rapport NO_2/NOx issu du modèle simplifié (tableaux 16 et 17), pour obtenir la concentration en NO_2. Cette démarche est exposée dans l'exemple d'application proposé au *chapitre 6*.

Les valeurs du rapport NO_2/NOx sont données pour deux cas de figure (cf. 3.6) :

- grande agglomération avec une forte pollution de fond en oxydes d'azote,
- ville moyenne avec une faible pollution en oxydes d'azote.

Ces deux cas ne couvrent pas l'ensemble des situations possibles, mais ils sont suffisamment contrastés pour encadrer le comportement de la variation du rapport NO_2/NOx selon le degré d'urbanisation de la zone considérée.

Le lecteur de ce guide pourra choisir le cas le plus proche de celui qu'il doit traiter, ou raisonner en fourchette s'il est dans un cas intermédiaire.

5.5 CONCLUSION QUANT À LA SENSIBILITÉ DU PROJET

Le caractère sensible ou non sensible du tunnel s'apprécie en examinant à la fois le niveau de pollution de fond, la sur-concentration estimée $C_{d,\theta}$ et le seuil fixé comme objectif de qualité réglementaire.

La méthode très simplifiée qui est proposée ici ne prétend en aucun cas refléter des situations particulières en termes de conditions météorologiques ou de trafic. C'est la raison pour laquelle c'est le trafic d'une heure moyenne de l'année et un taux de dilution moyen résultant d'un grand nombre de conditions météorologiques qui ont été retenus.

La méthode consiste à raisonner sur une situation moyenne, ce qui correspond bien aux préoccupations de santé pour lesquelles il faut évaluer l'exposition à laquelle pourraient être soumises des personnes vivant en permanence à proximité du projet.

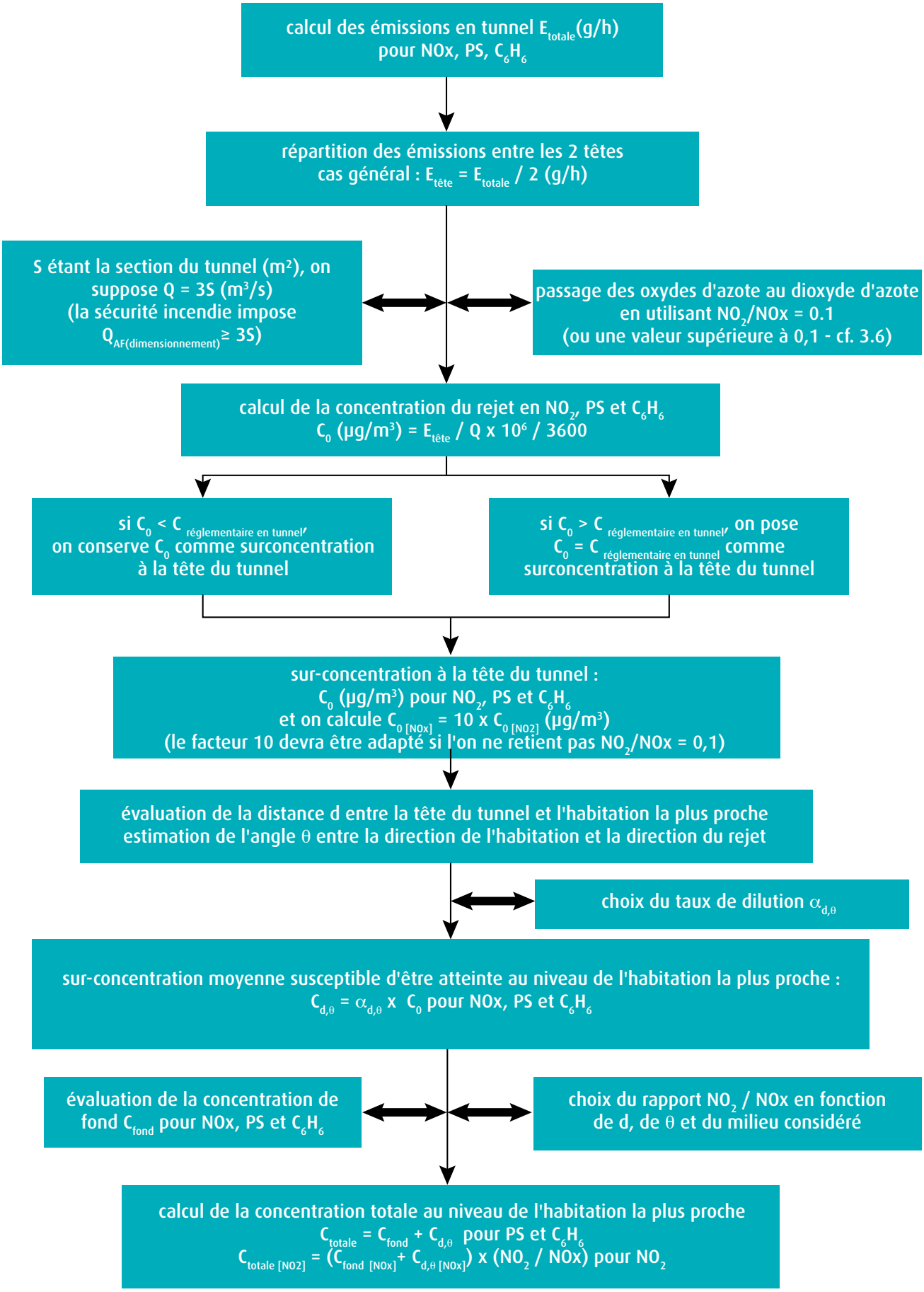
En cohérence avec cette démarche, les seuils réglementaires à retenir ici sont donc des objectifs de qualité portant sur une moyenne annuelle. Ils sont fixés par le *décret du 15 février 2002 [1]* pour le dioxyde d'azote, les particules en suspension et le benzène (cf. 3.2.1).

On rappelle ici que $C_{d,\theta}$ n'est qu'une estimation visant à juger de la sensibilité du tunnel dans son site, et qu'elle ne permet pas de juger de l'impact absolu que pourrait avoir le tunnel, du fait des fortes incertitudes pesant à ce stade sur le projet de tunnel.

Si la concentration totale, somme de la sur-concentration $C_{d,\theta}$ due au tunnel obtenue au paragraphe précédent et de la pollution de fond, est inférieure au seuil fixé comme objectif de qualité, le tunnel est non sensible.

Si la concentration totale est supérieure au seuil fixé comme objectif de qualité, le projet peut être jugé sensible. Dans ce cas, il convient d'abord de comparer la part relative que prennent la sur-concentration due au tunnel, la sur-concentration due à la part de route à l'air libre, et la pollution de fond dans la concentration totale, pour éventuellement relativiser l'effet du tunnel si le niveau de fond initial est déjà très proche du seuil réglementaire, voire supérieur dans certains sites très urbains. Par ailleurs, on rappellera que la méthode très simplifiée utilisée repose sur des hypothèses toujours défavorables, qui surévaluent l'impact du tunnel. Au stade des études d'opportunité, il est généralement illusoire de vouloir davantage approfondir les calculs ; cela nécessite en effet d'affiner au préalable les caractéristiques du projet et les données du site, autant d'éléments qui vont relever des stades ultérieurs d'étude.

Études d'opportunités - logigramme de la méthode proposée



5.6 EXEMPLE D'APPLICATION

Considérons un tunnel à un seul tube bidirectionnel d'une longueur de 1500 mètres projeté pour franchir un massif montagneux.

Compte tenu du trafic attendu à terme, 14 000 véhicules par jour avec 10 % de poids lourds à l'horizon 2015, il est prévu de ne construire qu'un seul tube bidirectionnel.

Bien que le site semble *a priori* sans enjeu du point de vue de la qualité de l'air compte tenu du faible niveau de pollution de fond et du trafic relativement réduit, la présence d'un hameau de quelques maisons à 60 mètres de l'une des deux têtes conduit à étudier la sensibilité du projet dès les études d'opportunité.

L'étude qui pourrait être menée dans ce cas est présentée ci-dessous, selon la méthodologie exposée plus haut.

5.6.1 Calcul des émissions polluantes

A l'intérieur du tunnel, pour les deux sens de circulation, les émissions moyennes sur l'année calculées selon la méthodologie Copert sont les suivantes (*tableau 6*) :

polluant	oxydes d'azote	particules en suspension	benzène
émissions totales (g/j)	11 536	296	8,2
émissions totales (g/h)	481	12,3	0,34

Tableau 6

5.6.2 Répartition des émissions entre les deux têtes

Le tunnel est prévu pour être ventilé par un système transversal, fonctionnant uniquement en semi-transversal (insufflation d'air frais sans extraction d'air vicié) pour les besoins sanitaires. Les rejets ont donc lieu uniquement aux têtes et on peut considérer qu'en moyenne sur une période assez longue, les émissions se répartissent également entre les deux côtés.

Les émissions à une tête sont donc les suivantes (*tableau 7*) :

polluant	oxydes d'azote	particules en suspension	benzène
émissions à une tête (g/h)	240	6,2	0,17

Tableau 7

5.6.3 Évaluation sommaire des caractéristiques du rejet

La section du tunnel étant de 56 m², en supposant une vitesse minimale de 3 m/s, on obtient un débit de renouvellement d'air dans le tunnel Q = 56 x 3 = 168 m³/s. On en déduit la concentration du rejet C_0 = (Émission / Q) x (10^6 / 3600), pour les oxydes d'azote, les particules en suspension et le benzène. On déduit la concentration du rejet en dioxyde d'azote à partir de celle en oxydes d'azote, retenant NO_2/NOx = 0,3 (*tableau 8*). Cette valeur de 0,3 correspond à un ratio maintenant couramment rencontré en tunnel.

polluant	oxydes d'azote	dioxyde d'azote	particules en suspension	benzène
concentration du rejet (µg/m³)	397	119	10	0,3

Tableau 8

Les seuils recommandés en tunnel, exprimés en µg/m³ (cf. tableau 2), sont les suivants [21] (*tableau 9*) :

polluant	dioxyde d'azote	particules en suspension
seuil recommandé en tunnel (µg/m³)	752	500

Tableau 9

Pour les deux polluants, on constate que la concentration du rejet est inférieure au seuil recommandé, donc on retient la valeur calculée comme sur-concentration due au tunnel à ses têtes.

5.6.4 Prise en compte de la dilution

La maison du hameau la plus proche de la tête étant située dans une direction de 60° par rapport à l'axe du tunnel et à une distance de 60 mètres, on retient un coefficient de dilution α = 0,03.

Ce coefficient est appliqué directement aux sur-concentrations du rejet, ce qui donne les sur-concentrations au niveau de l'habitation la plus proche pour chaque polluant (*tableau 10*) :

polluant	oxydes d'azote	particules en suspension	benzène
sur-concentration à 60 m de la tête (µg/m³)	12	0,3	0,01

Tableau 10

(21) aucun seuil n'est fixé pour le benzène

5.6.5 Conclusion quant à la sensibilité du projet

A ce stade des études, aucune mesure de la qualité de l'air n'a été réalisée sur le site. La pollution de fond en dioxyde d'azote et en particules étant cependant suivie dans une petite ville située à une cinquantaine de kilomètres, les niveaux qui y sont mesurés peuvent être utilisés en première approximation comme niveaux de fond près des habitations (16 µg/m³ pour NO_2 et 19 µg/m³ pour les particules en suspension). Cette hypothèse est défavorable car elle conduit sans doute à surévaluer le niveau de fond, l'urbanisation étant beaucoup moins forte dans la zone étudiée que dans la petite ville.

Comme on se situe dans un milieu rural, on choisit les rapports NO_2/NOx donnés pour une ville moyenne (cf. tableau 14), plus proche du cas étudié que celui de la grande agglomération. Ceci donne NO_2 / NOx = 0,89 en fond (cf. paragraphe 3.6), et NO_2 / NOx = 0,67 pour d = 60 m et θ = 60° (cf. tableau 17). On en déduit la concentration totale en NO_2 : $C(NO_2)$ = 0,67 x (12 + 16 / 0,89) = 20 µg/m³.

Pour les particules, on applique simplement :
C(PS) = 19 + 0,3 = 19,3 µg/m³.

En l'absence totale de mesures dans la zone du projet pour le benzène, on peut retenir un niveau de fond de 1 µg/m³, ce qui donne $C_{(C6H6)}$ = 1 + 0,01 ≈ 1 µg/m³. En ajoutant la sur-concentration calculée à la pollution de fond, on obtient le niveau moyen susceptible d'être atteint dans le hameau proche de l'une des deux têtes du tunnel (*tableau 11*), qui peut être comparé au seuil fixé comme objectif de qualité dans l'air ambiant.

polluant	dioxyde d'azote	particules en suspension	benzène
concentration à 60 m de la tête (µg/m³)	20	19,3	1
objectif de qualité	40	30	2

Tableau 11

Dans tous les cas, la concentration reste inférieure au seuil fixé comme objectif de qualité, donc on peut conclure que le site est non sensible, ce qui confirme l'intuition initiale.

6. LE CONTENU DES ÉTUDES PRÉLIMINAIRES COMPARAISON DES VARIANTES

L'objectif de la phase de comparaison des variantes des études préliminaires est de dégager, parmi tous les tracés envisagés, celui qui minimise les impacts sur la qualité de l'air.

La démarche proposée est celle de la *note méthodologique sur l'évaluation des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact routières [3]*. Elle consiste à bâtir, pour chaque variante, deux indicateurs d'exposition à la pollution due au projet : l'un relatif à la population, l'autre à la végétation et aux sols. Les indicateurs étant purement comparatifs, leur construction repose sur une méthode simplifiée, qui ne permet pas de calculer des niveaux absolus de pollution ou d'exposition, mais qui est suffisante pour dégager une hiérarchie des variantes.

6.1 LES PRINCIPES DE LA MÉTHODE PROPOSÉE

6.1.1 Prise en compte du niveau d'étude

La méthode de calcul d'indicateurs d'exposition à la pollution qui est présentée ici est destinée aux études de niveaux I et II, pour lesquelles la *note méthodologique [3]* requiert une étude spécifique des effets sur la santé (cf. 4.4.3) avec utilisation de l'IPP (indice pollution-population).

Pour les études de niveaux III et IV qui ne demandent qu'une simple information concernant les effets de la pollution atmosphérique sur la santé et aucun calcul de dispersion, la méthode n'aura pas à être mise en œuvre. La méthode très simplifiée présentée au chapitre précédent est à employer dans ce cas.

6.1.2 Articulation par rapport à l'ensemble du projet

Il faut garder à l'esprit que la démarche présentée ici ne constitue qu'une partie d'un calcul global qui vise à évaluer si un projet routier conduira à une hausse ou à une baisse de l'exposition de la population sur une aire d'étude. Le tunnel ne constitue en effet qu'un tronçon du projet, qui lui-même ne représente qu'une partie du réseau routier sur lequel porte l'évaluation (voir *note méthodologique [3]*).

Par définition, l'indice d'exposition relatif à un tunnel créé là où aucune route n'était présente est positif ou nul. Ceci ne signifie pas pour autant que son impact est négatif, en premier lieu car un tunnel apporte dans sa partie couverte une protection par rapport à une route qui serait construite à l'air libre, et en second lieu car le projet dans lequel s'insère le tunnel pourra par ailleurs conduire à une forte réduction de l'exposition le long d'itinéraires délestés.

Dans la suite, par simplicité, on utilise le terme d'indicateur d'exposition de la population, alors qu'il s'agit uniquement de la composante propre au tunnel de l'indicateur d'exposition total du projet.

6.1.3 Principe d'évaluation - construction d'un indicateur d'exposition de la population à la pollution gazeuse (IPP)

L'indicateur de comparaison des variantes et de leurs tunnels est l'indice d'exposition de la population à la pollution gazeuse (IPP - voir *note méthodologique [3]*).

Comme il s'agit d'une étude comparative, l'exposition calculée à travers l'indice est une exposition relative, c'est-à-dire due uniquement au projet et à son tunnel, sans que soient prises en compte la totalité des sources d'émissions potentielles (sources domestiques, sources industrielles et autres routes) qui sont identiques pour toutes les variantes.

Cet indicateur reflète la somme des expositions individuelles des personnes présentes à proximité de chaque variante de tunnel et soumises à ses effets, d'où le terme d'indice d'exposition de la population.

Comme l'exposition individuelle correspond à la multiplication de la dose de pollution reçue, c'est-à-dire du niveau de concentration de l'air respiré par un individu, par le temps d'exposition, un calcul de modélisation de la dispersion est nécessaire à ce stade afin de connaître quelle est la part de pollution émise par le projet qui se propage jusqu'aux habitations les plus proches. Les principes de modélisation conseillés pour le calcul de l'indicateur sont exposés plus bas.

6.2 CALCUL DES ÉMISSIONS POLLUANTES ET RÉPARTITION ENTRE LES DEUX TÊTES

Le calcul des émissions de polluants est mené selon une méthode similaire à celle utilisée au stade des études d'opportunité, selon la méthodologie proposée au 4.2.

Comme au chapitre précédent, les chiffres de trafic sont ceux d'un heure moyenne de l'année à l'horizon d'étude retenu pour le reste des études d'environnement.

Le polluant gazeux de référence à retenir vis-à-vis des effets sur la santé humaine est le benzène (cf. 4.4.3).

La répartition des émissions entre les deux têtes est faite a priori de manière identique à celle exposée au chapitre précédent, sauf si des éléments complémentaires établis à ce niveau des études permettent de l'affiner.

6.3 CALCUL DE DISPERSION DES POLLUANTS GAZEUX

Un calcul de dispersion est nécessaire à ce stade, car il faut disposer de valeurs de concentrations pour calculer les indices d'exposition à la pollution.

6.3.1 Choix des conditions météorologiques : reconstitution de la situation moyenne annuelle

Les récentes études épidémiologiques indiquent qu'en termes d'effets sur la santé humaine, des augmentations faibles du niveau moyen de pollution respiré toute l'année sont sans doute plus nocives que des augmentations fortes mais très ponctuelles (pics de pollution).

Pour cette raison, on choisira de modéliser l'augmentation de concentration moyenne sur l'année que risque de provoquer le projet à ses abords immédiats.

Cela conduit d'une part à retenir les chiffres de trafic d'une heure moyenne de l'année, comme exposé plus haut, et d'autre part à reconstituer la situation météorologique moyenne annuelle, à l'aide d'une rose des vents obtenue à partir des relevés d'une station locale, sur une durée minimale d'une année.

La reconstitution de la situation moyenne annuelle consiste à calculer le niveau de concentration en polluant pour chaque situation de la rose des vents, puis à en faire la moyenne pondérée en fonction de leur occurrence. Le résultat obtenu est une estimation de la concentration moyenne annuelle.

Il faut insister sur le fait que cette reconstitution conduit à effectuer autant de calculs de dispersion qu'il y a de situations présentes sur la rose des vents, ce qui impose une méthode de calcul rapide pour que la durée et le coût de l'étude restent raisonnables à ce stade d'étude préalable.

6.3.2 Prise en compte du relief

Le relief étant un grand facteur d'influence de la dispersion, il doit être pris en compte dans les calculs, au moins de façon simplifiée. Il s'agira dans tous les cas de modéliser le relief naturel au débouché des têtes, et éventuellement de grands remblais ou déblais qui viendraient en prolongement du tunnel.

En milieu urbain, les configurations en tranchée ouverte (« rue canyon ») doivent faire l'objet d'une modélisation adaptée, selon les possibilités du modèle utilisé.

6.3.3 Définition de la géométrie des sources

Les sources d'émissions linéaires que constitue le projet hors des zones de tunnel sont modélisées en suivant le tracé en plan fourni par le bureau d'études chargé de la conception géométrique du projet. La largeur est adaptée au nombre de voies prévues.

Pour ce qui concerne les tunnels, les émissions de polluants sont nulles le long de toutes leurs parties couvertes, et les rejets des têtes sont modélisés de façon spécifique, par une source linéaire de 10 mètres de longueur dans le prolongement de l'axe du tunnel, sur laquelle sont réparties de façon homogène les émissions produites par cette tête. Cette longueur de 10 mètres permet d'intégrer de façon très simplifiée la dynamique du rejet. La largeur est adaptée au profil en travers de la voie.

6.3.4 Forme des résultats du calcul de dispersion

Le calcul de dispersion doit fournir un champ des concentrations en polluant selon un maillage suffisamment dense pour bien prendre en compte la décroissance des niveaux de pollution à proximité des têtes du tunnel. Cela signifie que suffisamment de points de calcul sont retenus dans une zone d'une centaine de mètres autour de la tête. Au-delà, le maillage peut être moins dense.

6.3.5 Type de modélisation possible : méthode de dispersion gaussienne « sophistiquée »

Lors de cette phase de comparaison des variantes débouchant sur un indicateur chiffré d'exposition, la prise en compte de la dilution de la pollution selon la méthode exposée pour les études d'opportunité n'est plus possible. Un calcul de dispersion est nécessaire pour prendre en compte les spécificités du site et du projet.

La méthode doit néanmoins rester suffisamment simple, à la fois en temps de construction du modèle et en temps de calcul, car les variantes à étudier peuvent être nombreuses. La complexité du modèle ne doit par ailleurs pas dépasser le niveau de définition du projet, encore sommaire à ce stade. Compte tenu de ces éléments et des principes donnés au 4.3, une méthode de dispersion gaussienne bénéficiant d'améliorations et de compléments par rapport à la méthode gaussienne stricte, est la mieux adaptée.

Les données à prendre en compte et la façon de les modéliser sont décrites dans les paragraphes qui suivent et dans l'exemple traité au 6.5.

6.4 CALCUL DE L'INDICATEUR D'EXPOSITION DE LA POPULATION À LA POLLUTION GAZEUSE (IPP)

Ce paragraphe expose la façon de passer du champ de concentration moyenne à l'indice d'exposition de la population. L'utilisation d'un logiciel de système d'information géographique (SIG) est recommandée pour traiter cette partie des calculs, afin de pouvoir prendre en compte à la fois la géométrie du projet, le relief, l'occupation des sols (bâti et rugosité), etc.

6.4.1 Calcul des courbes d'iso-concentration

A partir du champ de concentration moyen donné par le calcul de dispersion, un calcul d'interpolation permet de construire des courbes d'iso-concentration qui permettront d'associer un niveau de concentration à chaque point ou maille de l'aire d'étude.

6.4.2 Prise en compte de la population

Cette deuxième étape consiste à décompter la population présente dans les zones où les calculs d'iso-concentration menés lors de l'étape précédente montrent que le projet aura un effet non négligeable. Lors de cette opération, il faut attribuer à toute population identifiée le niveau de concentration correspondant à la zone (point, maille ou iso-surface) où elle se trouve.

6.4.3 Calcul de l'indice d'exposition de la population (IPP) propre à une variante

L'indice d'exposition de la population à la pollution IPP pour une variante donnée est de la forme :

$$IPP = \sum_{P_i} (N_i . C_i)$$

Cette formule signifie que l'indice d'exposition IPP est la somme, étendue à tous les secteurs P_i de la zone d'influence, du produit du nombre N_i de personnes présentes dans le secteur P_i par la concentration C_i en polluant associée au secteur P_i.

La concentration C_i en polluant associée à chaque point P_i est donnée par le calcul de dispersion. L'indice d'exposition est donné en (nombre d'habitants) x (µg/m³ de polluant) pour une heure moyenne de l'année.

6.4.4 Comparaison des variantes

La composante d'IPP ainsi calculée pour un tunnel doit ensuite être intégrée à l'IPP global sur l'aire d'étude.

Une fois l'IPP calculé pour chacune des variantes, ces dernières peuvent être classées par ordre croissant d'IPP. La variante ayant l'IPP le plus faible est celle qui minimise l'impact du projet vis-à-vis des effets directs de la pollution gazeuse sur la santé humaine.

Comme il l'a été exposé au début de ce chapitre, la méthode est comparative et n'a pas pour but de fournir une évaluation absolue des risques en termes de morbidité ou de mortalité.

6.5 EXEMPLE D'APPLICATION

6.5.1 Présentation du projet

Considérons un projet autoroutier qui traverse une zone vallonnée composée en grande partie de terrains agricoles. Ce projet supportera un trafic de 39 400 véhicules par jour, dont 10 % de poids lourds. Le projet étant relativement long, il est segmenté en plusieurs sections.

Sur l'une des sections du projet, deux variantes sont étudiées, chacune comportant un tunnel à deux tubes unidirectionnels.

Ces deux variantes (A et B) sont présentées sur l'illustration 21.

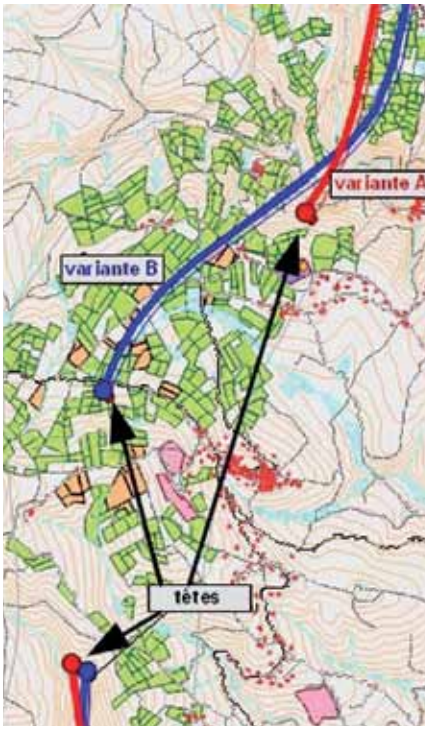


Illustration 21 - Vue en plan du tracé des variantes A et B

L'objectif est d'identifier la variante qui minimise l'impact du projet vis-à-vis des effets directs de la pollution gazeuse sur la santé humaine.

Les étapes successives d'étude sont présentées dans les paragraphes qui suivent.

Le polluant retenu pour le calcul de l'indice d'exposition de la population à la pollution gazeuse est le benzène, conformément à la *note méthodologique [3]*.

6.5.2 Calcul des émissions polluantes

Les méthodes de calcul des émissions sont celles utilisées traditionnellement à ce stade des études.

Il faut noter que les tunnels projetés sont des bi-tubes unidirectionnels ventilés longitudinalement. On fait donc l'hypothèse que les rejets de benzène se partagent pour moitié entre les deux têtes du tunnel, à la sortie de chaque tube.

A l'intérieur des deux tubes la somme des émissions moyennes annuelles, calculée selon la méthodologie COPERT, est la suivante (*tableau 12*) :

		benzène
variante A	tube 1 (g/j)	34 955
	tube 2 (g/j)	34 955
	2 tubes (g/j)	**69 910**
variante B	tube 1 (g/j)	16 556
	tube 2 (g/j)	16 556
	2 tubes (g/j)	**33 112**

Tableau 12

6.5.3 Calculs de dispersion des polluants gazeux

6.5.3.1 Choix des paramètres de modélisation

Les paramètres utilisés pour la modélisation de la dispersion des émissions polluantes sont les conditions météorologiques du site, la stabilité de l'atmosphère et la pollution de fond.

La situation météorologique moyenne est reconstituée à partir de 72 situations (18 directions et 4 forces de vent) pondérées en fonction de leur fréquence d'apparition au cours de l'année.

Cette répartition est donnée par la rose des vents de la station météorologique la plus proche.

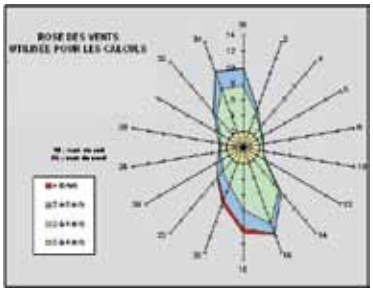


Illustration 22 - Rose des vents utilisée pour le calcul de dispersion

En ce qui concerne les conditions de stabilité de l'atmosphère, c'est une situation neutre qui est choisie, décrite par :

- un flux de chaleur échangé nul, $\Phi(\theta_0) = 0$ W/m²,
- une hauteur de la couche de mélange fixée à 800 mètres.

Une rugosité du sol uniforme de 0,3 mètres est retenue. Il s'agit de la valeur représentative des zones cultivées.

Le niveau de pollution de fond en benzène est celui mesuré lors d'une campagne par tubes passifs. Il est égal à 2 µg/m³.

6.5.4 Résultats du calcul de dispersion : sur-concentrations en benzène dues au projet

Les résultats du calcul de dispersion [22] sont présentés sur les cartes qui suivent, pour chacune des deux variantes.

La représentation cartographique ne fait apparaître que les sur-concentrations dues au projet, sous forme de courbes d'iso-concentration, tracées pour trois niveaux de valeurs :

- la courbe de valeurs égales à 0,5 µg/m³, en bleu clair
- la courbe de valeurs égales à 1 µg/m³, en bleu
- la courbe de valeurs égales à 2 µg/m³, en bleu foncé.

6.5.5 Indice d'exposition de la population (IPP)

La formule utilisée pour le calcul de l'IPP a été expliquée dans le chapitre précédent. La formule est rappelée ci dessous :

$$IPP = \sum_{P_i} (N_i . C_i)$$

La population exposée aux sur-concentrations ainsi que le niveau de sur-concentration sont déterminés à l'aide d'outils SIG [23]. Ces informations ainsi que les IPP des deux variantes sont regroupés dans le *tableau 13*.

	population exposée (en habitants)	niveau de pollution (µg/m³)	IPP partiel	IPP
variante A	28	1	28	50
	11	2	22	
variante B	15	1	15	15

Tableau 13 - Résultats des calculs d'IPP

On constate que l'indice d'exposition de la variante A est plus élevé, à la fois car la population concernée est plus nombreuse et car les niveaux atteints sont plus élevés.

Illustration 23
Sur-concentrations en benzène – variante A

Illustration 24
Sur-concentrations en benzène – variante B

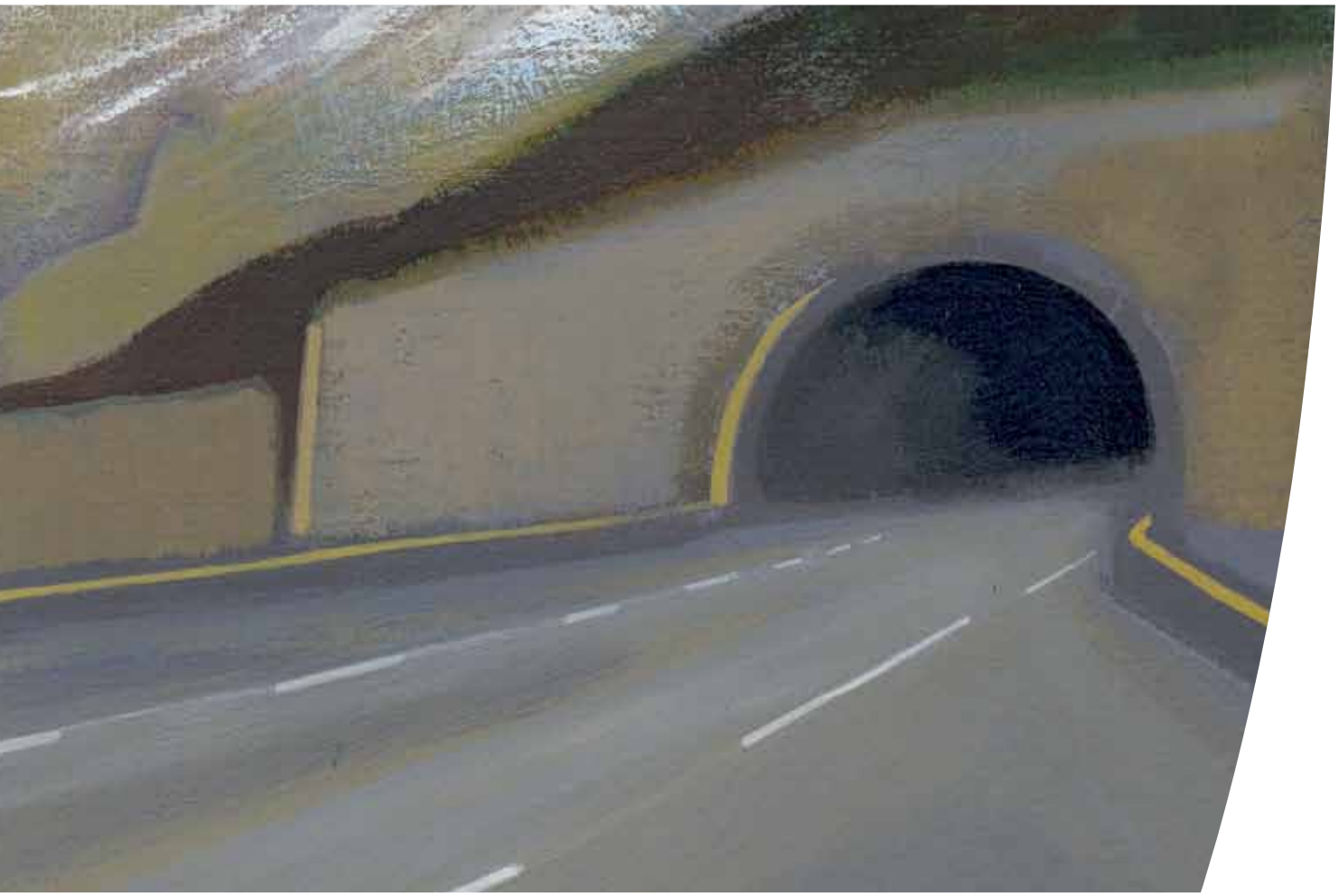
(22) pour cet exemple, les calculs ont été effectués avec le logiciel ADMS

(23) systèmes d'information géographique

6.6 CONCLUSION

Parmi les deux variantes de tracé étudiées, c'est la variante B, avec le tunnel long, qui est la meilleure du point de vue de la qualité de l'air, car elle conduit à un indice d'exposition de la population plus faible.

7. LE CONTENU DES ÉTUDES PRÉLIMINAIRES - ÉTUDE DE LA VARIANTE PROPOSÉE



Du point de vue environnemental, au stade de l'avant-projet sommaire, l'étude de la variante proposée implique une évaluation des effets du projet au regard des directives, recommandations et guides en vigueur. Les effets positifs du projet doivent être exposés, ainsi que des mesures destinées à remédier à ses effets négatifs.

De ce fait, et à la différence de la phase d'étude précédente, il n'est plus possible de s'appuyer sur une méthode comparative.

Il est éventuellement nécessaire de calculer, selon le niveau d'étude, des niveaux de pollution absolus (concentrations) et des risques sanitaires.

7.1 PRISE EN COMPTE DU NIVEAU D'ÉTUDE

La méthode à mettre en œuvre pour l'étude de la variante proposée dépend du niveau d'étude au sens de la *note méthodologique [3]*.

Pour les études de niveaux III et IV, pour lesquels une simple information concernant les effets de la pollution atmosphérique sur la santé et aucun calcul de dispersion n'est nécessaire, la présence d'un tunnel n'entraîne pas d'étude particulière.

Pour les études de niveau II, qui requièrent une étude simplifiée des effets sur la santé et un calcul de dispersion dans la bande d'étude, peu de compléments seront à apporter par rapport à la phase de comparaison des variantes exposée au chapitre précédent. Quelques éléments sont toutefois donnés au paragraphe suivant.

Au niveau I, l'étude menée lors de la comparaison des variantes devra être complétée par une démarche d'évaluation des risques sanitaires.

Les compléments à apporter par rapport à la phase de comparaison des variantes sont exposés au paragraphe suivant.

7.2 PRINCIPES D'ÉVALUATION

7.2.1 Calcul des concentrations

Dans le but d'estimer les concentrations susceptibles d'être atteintes en présence du projet, et de les comparer aux seuils fixés par la loi sur l'air, il est nécessaire de mener un calcul de dispersion pour les études de niveaux I et II.

Les calculs pourront être menés en utilisant une méthode similaire à celle qui a été présentée au chapitre précédent pour la dispersion du benzène dans le calcul de l'IPP. Les seules différences seront la nécessaire prise en compte de la pollution de fond pour obtenir un niveau absolu de concentration, et le fait que le calcul ne devra pas seulement porter sur le benzène, mais sur la liste des polluants cités au 3.4.

Il faut rappeler que dans la mesure où c'est le dioxyde d'azote qui est réglementé, et non pas les oxydes d'azote, l'utilisation de modèles permettant de prendre en compte les réactions chimiques est très souhaitable.

Lorsque l'architecture des têtes et leur position sont bien connues, la modélisation sur maquette ou à l'aide d'un logiciel de CFD (cf. 4.3.4) pourra être envisagée. Il s'agira notamment des cas de couverture de voiries existantes.

7.2.2 Évaluation des risques sanitaires

Une démarche d'évaluation des risques sanitaires est obligatoire pour les études de niveau I. Cette étude doit être menée selon les prescriptions rappelées au 4.4.3. Les niveaux de concentration en polluant utiles à l'étude sanitaire sont obtenus lors du calcul des concentrations exposé au paragraphe précédent.

7.3 CONCLUSIONS

Même si lors de la phase d'étude de la solution proposée il ne s'agit plus de raisonner de façon uniquement comparative, mais d'évaluer les impacts absolus du projet à ses abords, il faut garder à l'esprit que l'impact d'un tunnel ne constitue qu'une partie d'un impact global, et que tous les autres effets du projet, positifs ou négatifs, devront être pris en compte dans l'interprétation des résultats.

Toutefois, s'il apparaît que le tunnel risque d'entraîner une dégradation de la qualité de l'air inacceptable aux abords de l'une de ses têtes, il pourra être envisagé des mesures réductrices de son impact.

La première mesure est de chercher à déplacer l'implantation de la tête posant problème vers une zone moins sensible du point de vue de la qualité de l'air.

Une autre mesure possible est d'étudier le gain que l'on pourrait obtenir en améliorant les moyens de ventilation du tunnel, afin de réduire la concentration initiale du rejet.

On pourra aussi envisager le recours à une cheminée d'extraction, utilisée en exploitation courante pour diminuer la quantité de polluants rejetée par les têtes. A ce stade d'étude, il conviendra de vérifier la faisabilité de la mise en place d'une cheminée d'extraction (possibilité de trouver un lieu d'implantation, ordre de grandeur des quantités à extraire pour revenir à un impact acceptable) mais pas d'effectuer l'étude approfondie, qui interviendra plus tard, au stade du projet, lorsque le tracé est bien défini. Pour cette étude précise, on utilisera un modèle fin capable de prendre en compte des effets très locaux (cf. 4.3).

GLOSSAIRE ET LISTE DES ACRONYMES

DOMAINE « TUNNELS »

Canton de ventilation

Un canton de ventilation est un tronçon de tunnel ventilé transversalement dans lequel on peut régler les régimes d'insufflation et d'extraction d'air, indépendamment des autres tronçons.

Galeries de ventilation

Les galeries de ventilation sont des conduites qui servent à faire transiter l'air, frais ou vicié. L'air circule dans ces galeries grâce à l'accélération fournie par les ventilateurs de l'usine de ventilation. Il existe deux sortes de galeries de ventilation :

- celles qui servent à relier les points d'insufflation d'air frais (AF) ou d'extraction d'air vicié (AV) en tunnel à une station de ventilation ;
- et celles qui permettent de relier une station de ventilation à l'extérieur du tunnel, pour y capter de l'air frais ou y rejeter l'air vicié. Dans le cas de la ventilation transversale, deux galeries de ventilation sur toute la longueur de l'ouvrage sont nécessaires : l'une pour l'air frais et l'autre pour l'air vicié. La position des galeries de ventilation, en plafond ou sous chaussée, varie en fonction des cas de figure, et notamment de la géométrie de l'excavation du tunnel.

Station (ou usine) de ventilation

Une station (ou usine) de ventilation est un ensemble de moyens mécaniques constitué d'un ou plusieurs moteurs actionnant un ou plusieurs ventilateurs ayant pour but d'accélérer l'air.

Une station de ventilation est le plus souvent nécessaire lorsque le système de ventilation est transversal (transversal partiel, semi-transversal ou transversal pur) ou que sont présentes des extractions massives. Il y a alors en général plusieurs stations de ventilation par tunnel ; elles peuvent être souterraines ou à l'air libre. Dans le cas des extractions massives en ventilation longitudinale, la station de ventilation sera a priori localisée à proximité du point d'extraction.

Une station de ventilation doit être reliée à l'extérieur par l'intermédiaire de galeries de ventilation, soit pour y capter de l'air frais (AF), soit pour y rejeter l'air vicié (AV). Lorsque la présence d'une station de rejet d'air vicié est prévisible dans un projet, son implantation devra être analysée du point de vue environnemental.

Tunnel urbain

L'instruction technique du 25 août 2000 [13] définit un tunnel urbain comme un tunnel situé à l'intérieur d'une unité urbaine de plus de 20 000 habitants (selon la définition de l'INSEE) et remplissant au moins l'une des conditions suivantes :

- trafic prévisible d'un sens supérieur à 1 000 véhicules par voie de circulation à l'heure de pointe quotidienne, dix ans après la mise en service ;
- risque de remontée de queue en tunnel lié à la présence d'un carrefour non dénivelé peu après la sortie de l'ouvrage, ou à toute autre disposition à caractère permanent (traversée de zone construite dense, etc.) ;
- existence en tunnel d'échangeurs, d'aménagements destinés aux piétons, aux transports en commun ou liés à la desserte (par exemple, entrée de parking ou d'immeuble située dans le tunnel), etc.

Sont aussi considérés comme urbains les tunnels situés dans des unités urbaines de moins de 20 000 habitants dans lesquels il existe un risque de congestion fréquent.

Dans ce document le terme de « tunnel urbain » est utilisé selon cette définition.

Tunnel non urbain

Un tunnel non urbain au sens de *l'instruction technique du 25 août 2000 [13]* est un tunnel ne satisfaisant pas aux conditions permettant de le considérer comme urbain.

Tunnel à faible trafic

Un tunnel à faible trafic au sens de *l'instruction technique du 25 août 2000 [13]* est un tunnel dont le trafic prévisible de chaque sens, dix ans après la mise en service, est inférieur à la fois à 2 000 véhicules par jour en moyenne annuelle et à 400 véhicules par heure à l'heure de pointe (définie comme la trentième heure la plus chargée de l'année). Pour l'application de ce critère, un poids lourd compte pour cinq véhicules.

DOMAINE « SANTÉ »

Concentration admissible dans l'air (CAA)

La concentration admissible dans l'air est la valeur toxicologique de référence (VTR) utilisée pour les effets toxiques à seuil quand l'exposition a lieu par voie respiratoire. Elle s'exprime en mg ou en µg/m^3 (milligramme ou microgramme de substance chimique par mètre cube d'air ambiant). La CAA définit, pour une durée d'exposition spécifiée, la teneur maximale théorique de l'air ambiant en agent toxique qu'un individu, issu d'un groupe sensible ou non, peut inhaler sans que survienne un effet nuisible à sa santé.

Concentration moyenne dans l'air (CMA)

La concentration moyenne dans l'air est l'estimation de la concentration moyenne en agent toxique dans l'air ambiant prenant en compte les modalités de l'exposition. Elle s'exprime en même unité que la CAA.

Danger

Événement de santé indésirable tel qu'une maladie, un traumatisme, un handicap ou un décès. Par extension le danger désigne tout effet toxique, c'est à dire un dysfonctionnement organique ou cellulaire, lié à l'interaction entre un organisme vivant et un agent physique, chimique ou biologique.

Déterministe

Qualifie les effets toxiques dont la gravité est proportionnelle à la dose. Par convention, les effets déterministes ne surviennent que si un seuil est atteint et dépasse les capacités de détoxication, de réparation ou de compensation de l'organisme.

Détermination de la relation dose - réponse

Cette deuxième étape de l'évaluation des risques sanitaires est l'estimation des probabilités de survenue de ces dangers. Il s'agit de caractériser (qualifier et quantifier) le lien entre la dose (ou l'exposition) et l'effet. Jusqu'à présent, cette relation mathématique a souvent été extrapolée des résultats de l'expérimentation animale des hautes doses vers les basses doses (qui caractérisent les pollutions environnementales et pour lesquelles l'effet est plus difficile à mesurer). Le développement récent et important des connaissances épidémiologiques dans le domaine de la pollution atmosphérique permet aujourd'hui, au moins dans certains domaines, de réduire l'incertitude liée à l'extrapolation.

Dose

Quantité d'agent dangereux mise en contact avec un organisme vivant. Elle s'exprime en milligramme par kilo de poids corporel et par jour.

Effet aigu

Troubles liés à une exposition courte mais à forte dose. Généralement ils sont immédiats ou surviennent à court terme (quelques heures à quelques jours) et disparaissent spontanément quand cesse l'exposition, si celle-ci n'a pas occasionné des désordres irréversibles.

Effet chronique

Troubles en rapport avec une exposition faible mais prolongée. Ils surviennent en général avec un temps de latence qui peut atteindre plusieurs mois, voire des décennies, et sont habituellement irréversibles en l'absence de traitement.

Effet cancérogène ou cancérigène

Toxicité qui se manifeste par l'apparition de cancers.

Effet systémique

Toxicité d'un agent polluant se manifestant par une atteinte non cancéreuse d'un tissu ou d'une fonction.

Évaluation des expositions

Cette étape de la démarche d'évaluation des risques sanitaires a pour objet la quantification de l'exposition (à quelles concentrations et pendant combien de temps) à laquelle est soumise la population (qui et combien de personnes).

Excès de risque (ER)

Risque supplémentaire dû à une exposition spécifique par rapport au risque dans une population de référence (en général non exposée).

Excès de risque individuel (ERI)

Probabilité d'occurrence (de survenue d'un danger), au cours de la vie entière d'un individu, liée à une exposition à un agent cancérigène.

Excès de risque unitaire (ERU)

Estimation de l'ERI pour une exposition « vie entière » égale à une unité de dose d'agent dangereux. Cet indice est la valeur toxicologique de référence (VTR) pour les toxiques cancérigènes. Il représente en général la pente de la borne supérieure de l'intervalle de confiance de la courbe dose-réponse et s'exprime, pour une exposition respiratoire, en $(\mu g/m^3)^{-1}$.

Exemple : $ERU_{inhalation}$ du benzène = $6x10^{-6}$ (mg/m^3) : ce chiffre signifie qu'une exposition via l'inhalation d'un million de personnes pendant une vie entière (70 ans, 24 heures sur 24) à la concentration de 1 mg/m^3 de benzène est susceptible d'induire un excès de décès par leucémies de 6 cas.

Excès de risque collectif (ERC)

Appelé aussi « impact », il représente une estimation du nombre de cancers en excès, lié à une exposition étudiée, qui devrait survenir au cours de la vie de ce groupe d'individus.

Exposition

Désigne, dans le domaine sanitaire, le contact entre une situation ou un agent dangereux et un organisme vivant. L'exposition peut être considérée comme la concentration d'un agent dangereux dans le ou les milieux pollués mis en contact avec l'homme.

Exposition aiguë
Exposition de quelques secondes à quelques jours.

Exposition chronique
Exposition de quelques années à la vie entière.

Exposition sub-chronique
Exposition de quelques jours à quelques années.

Identification des dangers

Il s'agit de la détermination des effets néfastes des agents physiques, chimiques ou biologiques. Cette réponse repose sur l'interprétation des résultats de l'observation médicale, des études épidémiologiques et toxicologiques. Elle permet de dresser la liste des dangers possiblement liés à un polluant, assortie d'un jugement qualitatif sur la vraisemblance scientifique de l'effet. L'idéal est de disposer d'observations épidémiologiques chez l'homme. A défaut, des résultats expérimentaux (sur l'animal) peuvent être utilisés.

Quotient de danger

Rapport entre l'estimation d'une exposition (exprimée par une dose ou une concentration pour une période de temps spécifiée) et la VTR de l'agent dangereux pour la voie et la durée d'exposition correspondantes. Le QD (sans unité) n'est pas une probabilité et concerne uniquement les effets à seuil.

Risque

Probabilité de survenue d'un cancer.

Caractérisation du risque

Cette dernière étape de la démarche d'évaluation des risques sanitaires constitue l'étape de synthèse qui combine les données d'exposition et la relation dose-réponse. Elle comporte une estimation globale de l'excès de risque lié aux polluants (estimation de l'impact sanitaire), associée à une explication des incertitudes. L'analyse de risque consiste donc en une synthèse des connaissances scientifiques, une situation optimale des données disponibles et une modélisation permettant de guider les décisions dans une situation d'incertitude. Elle permet également d'identifier les domaines dans lesquels les connaissances où les données font le plus défaut. En termes quantitatifs, le risque s'exprime par un intervalle allant de 0 (représentant la certitude qu'aucun danger ne va apparaître) à 1 (représentant la certitude d'apparition d'un danger).

Seuil

La dose ou l'exposition en-dessous de laquelle aucun effet adverse n'est attendu. On distingue les substances à effet de seuil (à quelques exceptions, les toxiques systémiques) et les substances sans effet de seuil (les cancérogènes).

Stochastique

Qualifie un effet toxique dont la fréquence, mais non la gravité, est proportionnelle à la dose. Les effets stochastiques, cancers, mutations sont réputés pouvoir apparaître quelle que soit la dose non nulle reçue par l'organisme (absence de seuil).

VTR (Valeur toxicologique de référence)

Appellation générique regroupant tous les types d'indices toxicologiques qui permettent d'établir une relation entre une dose et un effet (toxique à seuil d'effet) ou entre une dose et une probabilité d'effets (toxiques sans seuil d'effet). Les VTR sont établies par des instances internationales (l'OMS ou le CIPR,par exemple) ou des structures nationales (US-EPA et ATSDR aux États-Unis, RIVM aux Pays-Bas, Health Canada, CSHPF en France…).

BIBLIOGRAPHIE THÉMATIQUE

Les références bibliographiques sont ici présentées selon quatre thématiques :

- « Environnement et qualité de l'air »,
- « Santé »,
- « Tunnels »,
- « Transport routier et élaboration de projets routiers ».

Pour cette raison, l'ordre de présentation est différent de l'ordre de numérotation.

ENVIRONNEMENT ET QUALITÉ DE L'AIR

[1] Circulaire n° 98-36 du 17 février 1998 relative à l'application de l'article 19 de la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie complétant le contenu des études d'impact des projets d'aménagement - Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement - 1998

[2] Guide pour la prise en compte de la qualité de l'air au voisinage des tunnels routiers - CETU - 2000

[3] Note méthodologique sur l'évaluation des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact routières - SETRA, CERTU - février 2005

[4] Annexe technique à la note méthodologique sur les études d'environnement dans les projets routiers « volet air » - SETRA, CERTU - juin 2001

[5] Loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie n° 96-1236 du 30 décembre 1996

[6] Décret n° 2003-767 du 1er août 2003 modifiant le décret n° 77-1141 du 12 octobre 1977 sur les études d'impact pris pour l'application de l'article 2 de la loi n° 76-629 du 10 juillet 1976 sur la protection de la nature et le décret n° 85-453 du 23 avril 1985 pris pour l'application de la loi du 12 juillet 1983 relative à la démocratisation des enquêtes publiques et à la protection de l'environnement -Ministère de l'écologie et du développement durable - 2003

[23] Loi n° 95-101 du 2 février 1995, dite loi Barnier, relative au renforcement de la protection de l'environnement-Ministère de l'Environnement - 1995

[26] Loi n° 76-629 du 10 juillet 1976 relative à la protection de la nature

[27] Décret n° 77-1141 du 12 octobre 1977 pris pour l'application de la loi n° 76-629 relative à la protection de la nature

[28] Décret n° 93-245 du 25 février 1993 relatif aux études d'impact et au champ d'application des enquêtes publiques

[29] Décret n° 96-388 du 10 mai 1996 relatif à la consultation du public et des associations en amont des décisions d'aménagement pris pour l'application de l'article 2 de la loi n° 95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement - Ministère de l'Environnement - 1996

[30] Code de l'environnement - Partie législative - Annexe à l'ordonnance n° 2000-914 du 18 septembre 2000 - Ministère de l'Environnement - 2000

[31] Décret n° 2002-213 du 15 février 2002 relatif à la surveillance de la qualité de l'air et de ses effets sur la santé et sur l'environnement, aux objectifs de qualité de l'air, aux seuils d'alerte et aux valeurs limites – Ministère de l'Environnement - 2002

[37] Guide méthodologique d'aide à l'établissement de l'état initial pour la thématique « air » - SETRA, CERTU - 2009

[38] Émissions de polluants et consommation liées à la circulation routière : paramètres déterminants et méthode de quantification - ADEME - janvier 1999

[43] Circulaire du 10 décembre 1999 relative aux sites et sols pollués et aux principes de fixation des objectifs de réhabilitation - Ministère de l'Environnement - 1999

SANTÉ

[7] Circulaire DGS/VS3/2000/61 du 3 février 2000 relative au guide de lecture et d'analyse du volet sanitaire des études d'impact - Ministère de la Santé - 2000

[8] Circulaire DGS n° 2001-185 du 11 avril 2001 relative à l'analyse des effets sur la santé dans les études d'impact - Ministère de la Santé - 2001

[32] Circulaire 99.329 du 8 juin 1999 - Ministère de la Santé - 1999

[33] Recommandations sur la qualité de l'air dans les ouvrages souterrains ou couverts - Conseil supérieur d'hygiène publique de France - 1998

[44] Évaluation des Risques Sanitaires dans les Études d'impact des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement-Substances chimiques - INERIS - 2003

[45] Guide pour l'analyse du volet sanitaire des études d'impact - InVS - 2000

[46] Sélection des agents dangereux à prendre en compte dans l'évaluation des risques sanitaires liés aux infrastructures routières – Direction Générale de la Santé, Institut de Veille Sanitaire, Direction des Routes, ADEME - 2004

[47] La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique : bilan de 15 ans de recherche internationale - Société Française de Santé Publique -1996

TUNNELS

[9] Dossier pilote des tunnels « Ventilation » - CETU - 2004

[10] Dossier pilote des tunnels « Génie civil » - CETU - 1998

[11] Dossier pilote des tunnels « Environnement » - CETU - 2011

[12] Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers, fascicules 1 à 5 - CETU - 2003

[13] Instruction technique du 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national - Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement - 2000

[16] Le traitement de l'air des tunnels routiers - État des connaissances sur les études et les réalisations - CETU - 1999

[34] Tunnels routiers - Émissions des véhicules et besoins en air pour la ventilation - Comité des tunnels routiers de l'Association mondiale de la route (PIARC / AIPCR) - 2004

[35] Estimation de ratios moyens de NO_2/NOx au voisinage du débouché d'un tunnel en tranchée en milieu urbain - 2004 - 19 Stéphanie Lacour - CEREA - 2004

[36] Étude sur maquette d'un cas de dispersion en tête de tunnel - Rapport d'essai - F. Gourdol, CETU, École Centrale de Lyon - 2004

[39] Calcul des émissions de polluants des véhicules automobiles en tunnel - Centre d'Études des Tunnels - 2002

[40] Norwegian design guide for road tunnels - Norway Public Road Administration - 1990

[41] Dispersion de la pollution, Catalogue de cas - CETU - 1999

[42] Transport and dispersion of air pollutants in the vicinity of motorway tunnel exits - A. Burgi - Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne - Thesis - 1996

TRANSPORTS ROUTIERS ET ÉLABORATION DES PROJETS ROUTIERS

[14] Loi n° 2002-3 du 3 janvier 2002 relative à la sécurité des infrastructures et systèmes de transport - Ministère de l'Équipement - 2002

[15] Circulaire n°2000-82 du 30 novembre 2000 relative à la réglementation de la circulation des véhicules transportant des Marchandises Dangereuses dans les tunnels du réseau routier national - Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement - 2000

[17] Loi 85-704 du 12 Juillet 1985, dite loi MOP, relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée - Ministère de l'intérieur - 1985

[18] Circulaire du 7 janvier 2008 fixant les modalités d'élaboration, d'instruction, d'approbation et d'évaluation des opérations d'investissement sur le réseau routier national - Ministère de l'Écologie - 2008

[19] Guide des études - CETU - à paraître

[20] Circulaire n° 87-88 du 27 octobre 1987 pour la construction et l'aménagement des autoroutes concédées - Ministère de l'Équipement - 1987

[21] Circulaire n°94-56 du 5 mai 1994 définissant les modalités d'élaboration, d'instruction et d'approbation des opérations d'investissements sur le réseau routier national non concédé - Ministère de l'Équipement

[22] Circulaire de conduite des grands projets nationaux d'infrastructures du 15 décembre 1992 - Ministère de l'Équipement - 1992

[24] Circulaire n° 2004-63 du 22 novembre 2004 relative à la concertation entre les services de l'environnement et les services de l'équipement pour l'élaboration et l'instruction des projets routiers du réseau national - Ministère de l'Équipement et Ministère de l'Écologie - 2004

[25] Code de la voirie routière, partie législative, titre Ier, chapitre VIII, relatif à la sécurité des ouvrages du réseau routier dont l'exploitation présente des risques particuliers pour la sécurité des personnes - Ministère de l'Equipement - 2002

ANNEXE : MODÈLE SIMPLIFIÉ D'ESTIMATION DU RAPPORT NO_2/NOX

Cette annexe propose un résumé de la méthode de modélisation qui est décrite de façon détaillée dans le rapport 2004-19 *«Estimation de ratios moyens de NO_2/NOx au voisinage du débouché d'un tunnel en tranchée en milieu urbain » [35]*

La méthode mise en œuvre par le CEREA a consisté dans un premier temps à étudier les différentes situations de pollution rencontrées dans une ville, en s'appuyant sur des mesures réalisées en continu sur une longue période (base de données issue d'associations agréées de surveillance de la qualité de l'air). A l'issue de cette étude statistique, trois situations typiques de pollution urbaine ont été caractérisées :

- situations de type 1 : caractérisées par des teneurs en ozone élevées, alors que les concentrations pour les autres polluants sont nettement inférieures aux valeurs moyennes ;
- situations de type 2 : situations intermédiaires pour lesquelles les concentrations mesurées restent assez proches des valeurs moyennes ;
- situations de type 3 : caractérisées par des concentrations extrêmement élevées pour les polluants primaires et des teneurs en ozone très faibles.

A titre informatif, les concentrations de fond moyennes calculées pour ces trois situations typiques sont données dans les tableaux suivants, pour les deux cas de figure testés :

- tableau 14 : grande agglomération [24] ,
- tableau 15 : ville moyenne [25].

type de situation	type 1 : teneurs en O_3 élevées	type 2 : situations intermédiaires	type 3 : teneurs en O_3 faibles
NO fond	4 µg/m³	22 µg/m³	92 µg/m³
NO_2 fond	29 µg/m³	75 µg/m³	100 µg/m³
O_3 fond	59 µg/m³	20 µg/m³	9 µg/m³
NO_2/NOx fond	0,84	0,69	0,33

Tableau 14 - Estimation des concentrations de fond moyennes - grande agglomération

type de situation	type 1 : teneurs en O_3 élevées	type 2 : situations intermédiaires	type 3 : teneurs en O_3 faibles
NO fond	1 µg/m³	4 µg/m³	12 µg/m³
NO_2 fond	17 µg/m³	30 µg/m³	66 µg/m³
O_3 fond	69 µg/m³	41 µg/m³	20 µg/m³
NO_2/NOx fond	0,92	0,83	0,78

Tableau 14 - Estimation des concentrations de fond moyennes - ville moyenne

Compte tenu des fréquences d'occurrence des trois types de situations, le ratio moyen NO_2/NOx de fond s'établit à 0,76 pour la grande agglomération et à 0,89 pour la ville moyenne.

Une fois les trois situations caractéristiques définies, la méthode mise en œuvre par le CEREA a consisté à calculer le ratio NO_2/NOx pour des points soumis à l'influence du rejet. Le calcul a été mené pour chacune des trois situations, en appliquant un modèle réactif simplifié aux coefficients de dilution passive donnés dans le rapport d'essais *Étude sur maquette d'un cas de dispersion en tête de tunnel [36]* (voir aussi 5.4). Les résultats ont ensuite été pondérés par la fréquence d'occurrence des différentes situations de pollution.

Il en résulte que les valeurs obtenues permettent d'estimer un ordre de grandeur du rapport NO_2/NOx pour une situation moyenne. Elles ne peuvent en revanche pas être utilisées pour caractériser une situation particulière (situation particulièrement défavorable notamment).

L'évolution du rapport NO_2/NOx en fonction de l'éloignement par rapport à la tête de tunnel a été calculé pour les deux cas de figure testés :

- grande agglomération avec une forte pollution de fond en oxydes d'azote,
- ville moyenne avec une faible pollution en oxydes d'azote.

(24) le cas a été construit à partir de données mesurées en région parisienne (données AIRPARIF)
(25) le cas a été construit à partir de données mesurées à Orléans (données LIGAIR)

Les valeurs du rapport NO_2/NOx obtenues en un point situé à proximité du rejet sont donnés dans les tableaux qui suivent. Elles varient en fonction de la position du point par rapport à la tête du tunnel. Cette position est définie par l'angle *θ* et la distance *d*, *θ* donnant la direction dans laquelle se trouve le point par rapport à la direction du rejet, et *d* étant la distance entre le point et la tête du tunnel (voir illustration 25).

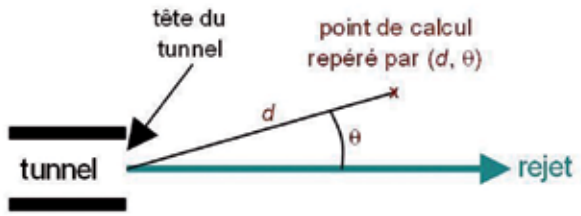


Illustration 25

On constate à la lecture des tableaux 16 et 17 que le rapport NO_2/NOx augmente rapidement lorsque l'on s'éloigne du rejet.

A 150 mètres de la tête, hormis dans l'axe du tunnel, l'influence du rejet ne se fait presque plus ressentir. A cette distance, le ratio est revenu à des valeurs proches du ratio NO_2/NOx de fond :

- à 0,7 environ dans le cas de la grande agglomération, où $(NO_2/NOx)_{[fond]} = 0,76$,
- à 0,85 environ dans le cas de la ville moyenne, où $(NO_2/NOx)_{[fond]} = 0,89$.

rapport NO_2/NOx	distance d à la tête du tunnel			
angle θ	25 m	50 m	100 m	150 m
0°	0,23	0,25	0,31	0,47
30°	0,29	0,48	0,64	0,71
60°	0,34	0,55	0,68	0,72
90°	0,34	0,55	0,67	0,72
120°	0,34	0,51	0,65	0,71
150°	0,28	0,43	0,60	0,71
180°	0,22	0,25	0,44	0,69

Tableau 16 - Estimation du rapport NO_2/NOx d'un rejet de tunnel cas d'une grande agglomération pour laquelle $NO_2/NOx_{[fond]moyen} = 0,76$

rapport NO_2/NOx	distance d à la tête du tunnel			
angle θ	25 m	50 m	100 m	150 m
0°	0,23	0,25	0,32	0,54
30°	0,31	0,56	0,78	0,85
60°	0,37	0,67	0,82	0,86
90°	0,37	0,67	0,82	0,86
120°	0,37	0,61	0,79	0,86
150°	0,29	0,48	0,74	0,85
180°	0,23	0,25	0,50	0,83

Tableau 17 - Estimation du rapport NO_2/NOx d'un rejet de tunnel cas d'une ville moyenne pour laquelle $NO_2/NOx_{[fond]moyen} = 0,89$

Les ratios NO_2/NOx utilisés ci-dessus sont issus des premiers résultats de l'étude engagée par le CEREA sur la dispersion réactive des oxydes d'azote à proximité des têtes de tunnel. Les recherches dans ce domaine vont être approfondies pour mieux valider les résultats actuels et les corriger si nécessaire. Les valeurs utilisées ici sont donc susceptibles d'être modifiées à l'avenir.

NOTES

NOTES

NOTES

CE GUIDE A ÉTÉ RÉDIGÉ AU SEIN DE PLUSIEURS GROUPES DE TRAVAIL DONT LES MEMBRES SONT INDIQUÉS CI-DESSOUS.

CETU – Pôle Ventilation et Environnement
25, avenue F. Mitterrand - case n°1 - 69674 BRON cedex
Cyrille BERNAGAUD, Sébastien BERTHAUD, Bruno BROUSSE, Jean-François BURKHART, Pierre CARLOTTI, Marie-Claude GABET, Franck GOURDOL, Jérôme SAURAT

CERTU – Département Environnement
9, rue J. Récamier - 69456 LYON cedex 06
Fabienne MARSEILLE, Jean-Pierre VINOT

SETRA
46, av. A. Briand - B.P. 100 - 92225 BAGNEUX cedex 5
Laurence PERIANIN

CETE de Lyon
46, rue St-Théobald - BP 128 - 38081 ISLE d'ABEAU cedex
Antonin RIVAT

ENPC - CEREA
6 - 8 Avenue Blaise Pascal, Cité Descartes,
77455 Champs sur Marne.
Stéphanie LACOUR

CETE Méditerranée
30 rue A. Einstein - BP 37000 - 13791
AIX-EN-PROVENCE cedex 3
Christelle BASSI

Ressources, territoires, habitats et logement
Énergies et climat
Développement durable
Prévention des risques
Infrastructures, transports et mer

Présent pour l'avenir

Centre d'Études des Tunnels
25 avenue François Mitterrand
Case n°1
69674 BRON - FRANCE
Tél. 33 (0)4 72 14 34 00
Fax. 33 (0)4 72 14 34 30
cetu@developpement-durable.gouv.fr

www.cetu.developpement-durable.gouv.fr

Crédits photos : CETU - Réalisation : PEMACO - Impression : VASSEL GRAPHIQUE