

Ventilation

■ **Le dossier pilote des tunnels est composé de six documents :**

1. Présentation synthèse (à paraître)
2. Géométrie (décembre 1990)
3. Génie civil (novembre 1998)
4. Equipements
5. Environnement (décembre 1990)
6. Coûts (à paraître)

■ **Le document Equipements auquel appartient le présent fascicule est composé des sections suivantes :**

- 4.1. Ventilation (novembre 2003)
- 4.2. Eclairage (novembre 2000)
- 4.3. Alimentation électrique (septembre 1994)
- 4.5. Exploitation (septembre 1994)

Responsable de la production : Pierre Carlotti - Cetu

Conception couverture - Edition : SEVEN Lyon

☎ 04 72 19 83 83 - ☎ 04 72 19 83 80

✉ seven-lyon@cogetefi.com

dossier pilote des tunnels équipements

section 4.1

Ventilation

novembre 2003

TABLE DES MATIÈRES

1	Enjeux de la ventilation	7
1.1	Rôles de la ventilation dans un tunnel	7
1.2	Les types de ventilation en tunnel	7
1.3	Importance de la ventilation dans la conception générale d'un tunnel	11
1.3.1	Encombrement des équipements de ventilation	11
1.3.2	Incidence sur le projet de tunnel	13
1.3.3	Articulation des études de ventilation avec les différentes étapes du projet	14
1.3.4	Ordre de grandeur des coûts	16
1.4	Textes de référence	17
1.4.1	Sécurité en tunnel	17
1.4.2	Qualité de l'air en tunnel en exploitation normale	18
1.4.3	Qualité de l'air et bruit au voisinage des tunnels	18
2	Désenfumage en cas d'incendie	19
2.1	Les incendies en tunnel	19
2.1.1	Risques d'incendie en tunnel	19
2.1.2	Les risques lors d'un incendie en tunnel	20
2.1.3	Incendies de dimensionnement	21
2.1.4	Place du désenfumage dans l'ensemble des équipements de sécurité . .	22
2.2	Notions sur le comportement des fumées	22
2.2.1	En l'absence de courant d'air longitudinal	22
2.2.2	Influence d'un courant d'air longitudinal	23
2.2.3	Effet de la pente	23
2.3	Les stratégies de désenfumage	24
2.3.1	Principes généraux	24
2.3.2	Cas où l'absence de dispositif de désenfumage est autorisée	25
2.3.3	Stratégie en ventilation longitudinale	25
2.3.4	Ventilation longitudinale avec extractions massives	27
2.3.5	Stratégie en ventilation transversale	28
2.4	Résumé des dispositions de ventilation	31
3	Besoins en ventilation sanitaire	33
3.1	Seuils admissibles de polluants en tunnel	33
3.1.1	Introduction	33
3.1.2	Les différents polluants	33
3.1.3	Niveaux admissibles en tunnel	35
3.1.4	Émissions de polluants par les véhicules	36

3.2	Air frais pour la ventilation sanitaire	38
3.2.1	La dilution des polluants	38
3.2.2	Calcul des débits d'air frais nécessaires	38
3.2.3	Le traitement de l'air en tunnel	39
3.3	Les niveaux de pollution en tunnel selon le système de ventilation	40
3.3.1	Introduction	40
3.3.2	Ventilation longitudinale	40
3.3.3	Ventilation semi-transversale	40
3.3.4	Ventilation transversale	42
3.3.5	Autres systèmes de ventilation	43
3.4	Vitesse de l'air en tunnel	44
3.5	Conclusion	44
4	Choix du système de ventilation	45
4.1	Introduction	45
4.2	Les critères de choix	45
4.2.1	Trafic empruntant l'itinéraire	46
4.2.2	Exploitation	46
4.2.3	Environnement	46
4.2.4	Autres données propres à l'ouvrage	47
4.2.5	Coûts	47
4.3	Avantages et inconvénients des systèmes de ventilation usuels	48
4.3.1	Ventilation naturelle	48
4.3.2	Ventilation longitudinale	48
4.3.3	Ventilation longitudinale avec extractions massives	48
4.3.4	Ventilation transversale	48
4.4	Choix habituellement retenus	49
4.4.1	Tunnels non urbains à trafic non faible	49
4.4.2	Tunnels non urbains à trafic faible	49
4.4.3	Tunnels urbains	50
5	Conception et dimensionnement de la ventilation	51
5.1	Introduction	51
5.2	Éléments de dimensionnement	51
5.2.1	Introduction	51
5.2.2	Pertes de charge en tunnel	51
5.2.3	Effet cheminée	53
5.2.4	L'entraînement de l'air par les véhicules : le pistonnement	53
5.2.5	Les contre-pressions atmosphériques	54
5.2.6	Caractéristiques de l'air	57
5.2.7	Données de trafic nécessaires	57
5.2.8	Nombre de véhicules susceptibles d'être bloqués dans le tunnel	60
5.2.9	Notion sur le bruit généré par la ventilation	61
5.2.10	Outils de dimensionnement	61
5.3	Conception et dimensionnement d'une ventilation longitudinale	62
5.3.1	Désenfumage en cas d'incendie	62
5.3.2	Calcul de la poussée nécessaire pour la ventilation sanitaire	66
5.3.3	Notions sur les accélérateurs	66

5.3.4	Limites de la ventilation longitudinale	68
5.3.5	Ventilation longitudinale avec extraction massive	68
5.4	Conception et dimensionnement d'une ventilation transversale	69
5.4.1	Introduction	69
5.4.2	Les principaux choix techniques	70
5.4.3	Méthodes de contrôle du courant d'air en cas d'incendie	74
5.4.4	Calcul des installations de soufflage d'air frais	76
5.4.5	Calcul des installations d'extraction d'air vicié et de fumées	79
5.4.6	Notions sur les ventilateurs utilisés en ventilation transversale	81
5.4.7	Contraintes de génie civil pour la ventilation transversale	82
5.4.8	Cas des puits de ventilation	84
5.4.9	Les stations de ventilation	84
5.5	Commande de la ventilation	87
5.5.1	Les capteurs contrôlant la ventilation	88
5.5.2	Exploitation normale	90
5.5.3	Réaction aux incidents	92
5.6	Ventilation des abris et galeries d'évacuation	93
5.6.1	Introduction	93
5.6.2	Dispositions particulières	94
5.6.3	Les clapets de décompression	96
	Bibliographie	99
	Annexes	101
A	Exemple de dimensionnement d'une installation de ventilation longitudinale	103
A.1	Présentation du tunnel	103
A.1.1	Caractéristiques de l'itinéraire et du trafic routier	103
A.1.2	Caractéristiques géométriques du tunnel	103
A.1.3	Contraintes d'environnement	103
A.1.4	Exploitation du tunnel	104
A.2	Système de ventilation retenu	104
A.3	Besoins à satisfaire	104
A.3.1	Désenfumage en cas d'incendie	104
A.3.2	Ventilation sanitaire	105
A.3.3	Extraction d'air vicié	106
A.4	Conception et dimensionnement de la ventilation	106
A.4.1	Éléments de dimensionnement	106
A.4.2	Détermination des poussées à installer	107
A.4.3	Dispositions pratiques	110
A.4.4	Commande de la ventilation	110
A.5	Ventilation des dispositifs d'évacuation	111
B	Exemple de dimensionnement d'une installation de ventilation longitudinale avec extraction massive	113
B.1	Présentation du tunnel	113
B.1.1	Caractéristiques de l'itinéraire et du trafic routier	113
B.1.2	Caractéristiques géométriques du tunnel	114
B.1.3	Contraintes d'environnement	114

B.1.4	Exploitation du tunnel	114
B.2	Système de ventilation retenu	114
B.3	Besoins à satisfaire	115
B.3.1	Désenfumage en cas d'incendie	115
B.3.2	Ventilation sanitaire	116
B.3.3	Extraction d'air vicié	116
B.4	Conception et dimensionnement de la ventilation	116
B.4.1	Éléments de dimensionnement	117
B.4.2	Détermination des poussées et des débits à installer	119
B.4.3	Dispositions pratiques	121
B.4.4	Commande de la ventilation	123
C	Exemple de dimensionnement d'une installation de ventilation transversale	127
C.1	Présentation de l'exemple	127
C.1.1	Caractéristiques de l'itinéraire et du trafic	127
C.1.2	Caractéristiques géométriques du tunnel	128
C.1.3	Contraintes d'environnement	128
C.1.4	Exploitation du tunnel	128
C.2	Système de ventilation retenu	130
C.3	Besoins à satisfaire	130
C.3.1	Désenfumage en cas d'incendie	130
C.3.2	Ventilation sanitaire	130
C.4	Conception et dimensionnement de la ventilation	133
C.4.1	Éléments de calculs aérauliques	133
C.4.2	Détermination des caractéristiques de l'installation	135
C.4.3	Débit et pression totale des ventilateurs	144
C.4.4	Puissance installée des moto-ventilateurs	147
C.4.5	Dispositions constructives pour les stations de tête	148
C.4.6	Commande de la ventilation	150
C.5	Ventilation des dispositifs d'évacuation	151
C.6	Variante en tunnel creusé au tunnelier	151

PRÉAMBULE

Le présent fascicule du dossier pilote des tunnels est un guide pour la conception de la ventilation des tunnels routiers depuis les études préliminaires jusqu'à l'avant-projet d'ouvrage d'art (APOA) ou projet d'ouvrage d'art (POA). Il n'aborde donc pas certains problèmes qui ne se posent que dans les phases ultérieures du projet de tunnel. Il s'adresse aussi aux maîtres d'ouvrage afin qu'ils comprennent les enjeux principaux de la ventilation des tunnels et la raison de certains choix.

Ce document présente d'abord les enjeux de la ventilation en tunnel. Il aborde ensuite les principes d'utilisation de la ventilation en cas d'incendie, la détermination des besoins en ventilation sanitaire, avant de traiter de la conception et du dimensionnement des installations de ventilation.

Dans un but pédagogique, le chapitre 1 présente une première fois brièvement des éléments expliqués plus en détail dans la suite du document. De plus, certains concepts sont exposés de façon simplifiée dans ce document, afin de ne pas nuire à sa lisibilité.

Chapitre 1

ENJEUX DE LA VENTILATION

1.1 *Rôles de la ventilation dans un tunnel*

La ventilation en tunnel a pour objectif, en situation normale d'exploitation, de maintenir la qualité de l'air au niveau requis. En cas d'incendie, elle a pour rôle de mettre les usagers à l'abri des fumées pour qu'ils puissent évacuer le tunnel et, dans un second temps, de permettre l'intervention des services de secours et de lutte contre l'incendie. La ventilation d'un tunnel constitue un système complexe, car il est dépendant du comportement aéraulique de l'ouvrage. Un tunnel est un tout, et tous ses éléments peuvent avoir une incidence sur les choix en matière de ventilation. En particulier, la longueur, le type de trafic, la façon dont est assurée l'exploitation ont une influence déterminante.

D'un point de vue aéraulique, un tunnel se distingue d'un bâtiment essentiellement du fait de l'existence de courants d'air longitudinaux et parce que les débits de renouvellement d'air y sont très grands, de l'ordre de la centaine de mètres cubes d'air par seconde, soit 10 à 100 fois plus que dans la plupart des locaux à usage d'habitation ou industriel.

1.2 *Les types de ventilation en tunnel*

Certains tunnels ne nécessitent pas de ventilation mécanique (on parle alors de ventilation naturelle). Il s'agit de tunnels courts ou à faible trafic. Quand une ventilation mécanique est nécessaire, plusieurs choix sont possibles.

En situation normale d'exploitation, la méthode retenue pour faire baisser les niveaux de pollution dans un tunnel ventilé est la dilution des polluants. La terminologie traditionnelle distingue deux systèmes de ventilation, basés sur l'usage de la ventilation en situation d'exploitation normale (dans les deux cas celle-ci procède par dilution) :

- le système *longitudinal*, pour lequel des ventilateurs (généralement appelés accélérateurs ou ventilateurs de jet) poussent la masse d'air du tunnel, sans apport d'air frais ni sortie d'air vicié autrement que par les têtes ;
- le système *transversal*, pour lequel on injecte et/ou extrait de l'air à intervalles réguliers dans le tunnel au moyen de gaines de ventilation ; selon les cas, on parlera de système transversal pur (le débit extrait est égal au débit insufflé), de système semi-transversal (il n'y a pas d'extraction d'air vicié) ou de système transversal partiel (le débit d'extraction est plus faible que le débit d'insufflation).

Ces systèmes de ventilation sont schématisés sur la figure 1.1.

En cas d'incendie, le but de la ventilation est dans un premier temps de protéger les usagers des fumées pour qu'ils puissent évacuer le tunnel, et dans un second temps de permettre aux services de secours et de lutte contre l'incendie d'intervenir. Pour ce faire, la stratégie est :

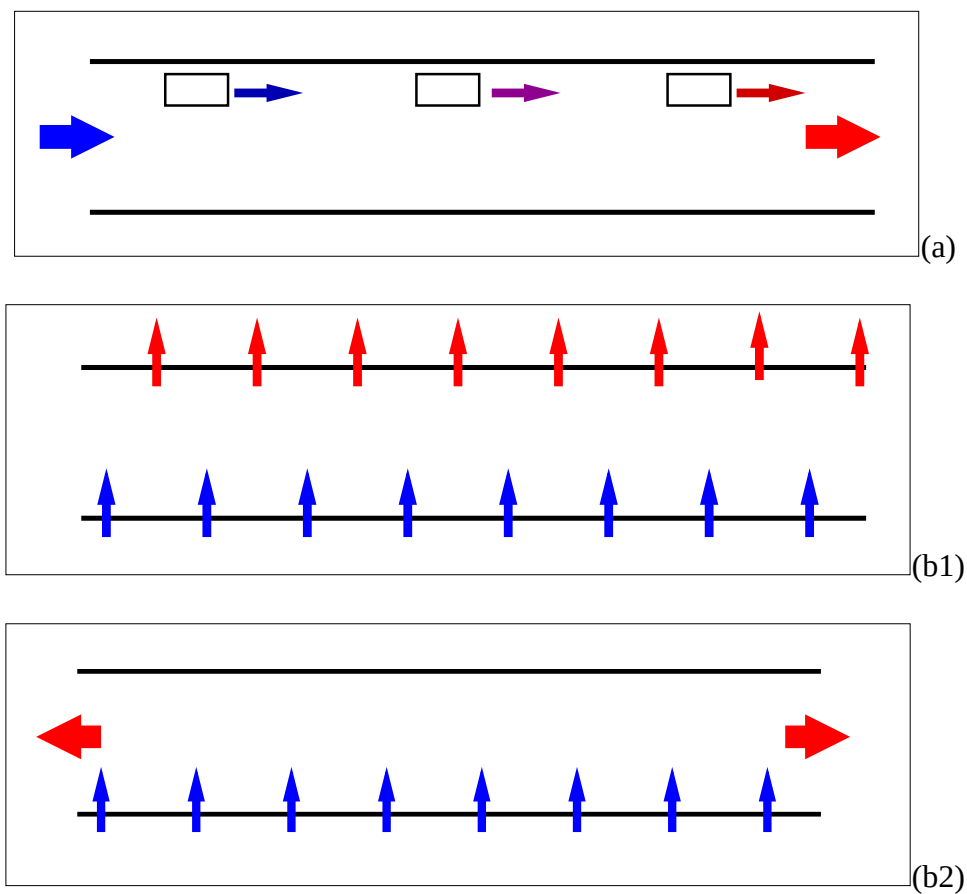


FIG. 1.1 – Schéma des différents systèmes de ventilation en situation normale d'exploitation ; les flèches représentent le mouvement de l'air (air frais en bleu, air vicié en rouge) ; (a) : système longitudinal ; (b) système transversal : (b1) transversal pur ou partiel ; (b2) : semi-transversal.

- de pousser les fumées vers une zone où il n’y a pas d’usagers,
- ou de maintenir autant que faire se peut la stratification des fumées et d’extraire celles-ci en plafond ; il est nécessaire dans ce cas que la vitesse longitudinale de l’air soit faible au droit de l’incendie (on parle de *contrôle du courant d’air*).

Le système longitudinal se prête bien à la première stratégie. Dans un certain nombre de cas (cf. section 2.3.3), si une stratégie de désenfumage longitudinale est adoptée, il est nécessaire de prévoir des extractions massives de fumée. Par ailleurs, par le jeu des insufflations et extractions d’air, on peut piloter un tunnel ventilé transversalement de manière à appliquer la stratégie longitudinale. La seconde stratégie nécessite un système transversal. Ces points sont résumés sur la figure 1.2. Pour assurer le contrôle du courant d’air dans la seconde stratégie, on joue en général sur les débits d’insufflation et d’extraction des différents cantons¹. Dans certains cas, il peut être nécessaire de mettre en place des ventilateurs spécifiques pour assurer le contrôle du courant d’air. Il est à noter que cette seconde stratégie n’est pas adaptée aux tunnels de gabarit inférieur à 2,70 m.

Dans certains cas où le tunnel est équipé de ventilation longitudinale (et donc n’a pas de gaine d’extraction d’air vicié) mais où il y a un risque que la stratégie consistant à pousser les fumées dans une direction mette en danger des usagers (cas des tunnels bidirectionnels ou unidirectionnels congestionnés), on s’efforce dans un premier temps de limiter le courant d’air longitudinal afin de favoriser la stratification des fumées et de permettre aux usagers d’évacuer. Dans un second temps, pour l’intervention des services de secours et de lutte contre l’incendie, on applique la stratégie qui consiste à pousser les fumées dans une direction.

Dans le présent dossier pilote, on adopte la terminologie suivante² :

- système longitudinal : système de ventilation dans lequel on pousse l’air longitudinalement dans le tunnel ;
- système semi-transversal : système de ventilation comportant un réseau de soufflage permettant de distribuer de l’air frais sur toute la longueur de l’ouvrage ; ce système est en principe exclu car il n’offre aucune possibilité d’extraction ;
- système semi-transversal réversible : système semi-transversal dans lequel le réseau de soufflage peut, en tout ou partie, être transformé en réseau d’extraction pour le désenfumage par inversion du sens d’écoulement de l’air dans les conduits de ventilation ;
- système transversal : système de ventilation comportant à la fois un réseau d’insufflation d’air frais et un réseau d’extraction d’air vicié ou des fumées d’incendie, que ce réseau soit utilisé en exploitation normale ou pas³.

Les contraintes qui déterminent le choix du système de ventilation sont les impératifs de sécurité incendie et les besoins d’air frais pour la dilution des polluants en tunnel. Dans certains cas, l’impact environnemental des rejets d’air à l’extérieur du tunnel et la vitesse maximale acceptable pour le courant d’air peuvent influencer sur le choix. Pour la sécurité incendie, les longueurs maximales admissibles avec un système de ventilation donné sont fixées par l’instruction technique annexée à la circulaire 2000-63 [17], mais plusieurs systèmes sont souvent possibles.

¹ Un canton de ventilation est un tronçon de tunnel ventilé transversalement dans lequel on peut régler indépendamment des autres tronçons les régimes d’insufflation et d’extraction d’air, voir chapitre 5.

² La classification des systèmes de ventilation par l’AIPCR [11] est différente, car elle repose sur la manière dont est utilisée la ventilation en exploitation normale, alors que dans le cadre du présent dossier pilote, la classification retenue est fondée sur les possibilités du système et non sur son emploi effectif.

Par exemple, elle conduit à appeler semi-transversal tout système dénommé ici semi-transversal, semi-transversal réversible et transversal dans le cas où les gaines d’extraction ne sont utilisées qu’en cas d’incendie.

³ Les systèmes transversal pur, transversal partiel et semi-transversal avec gaine d’extraction de fumées en cas d’incendie sont donc tous les trois qualifiés de *transversaux* dans le présent document.

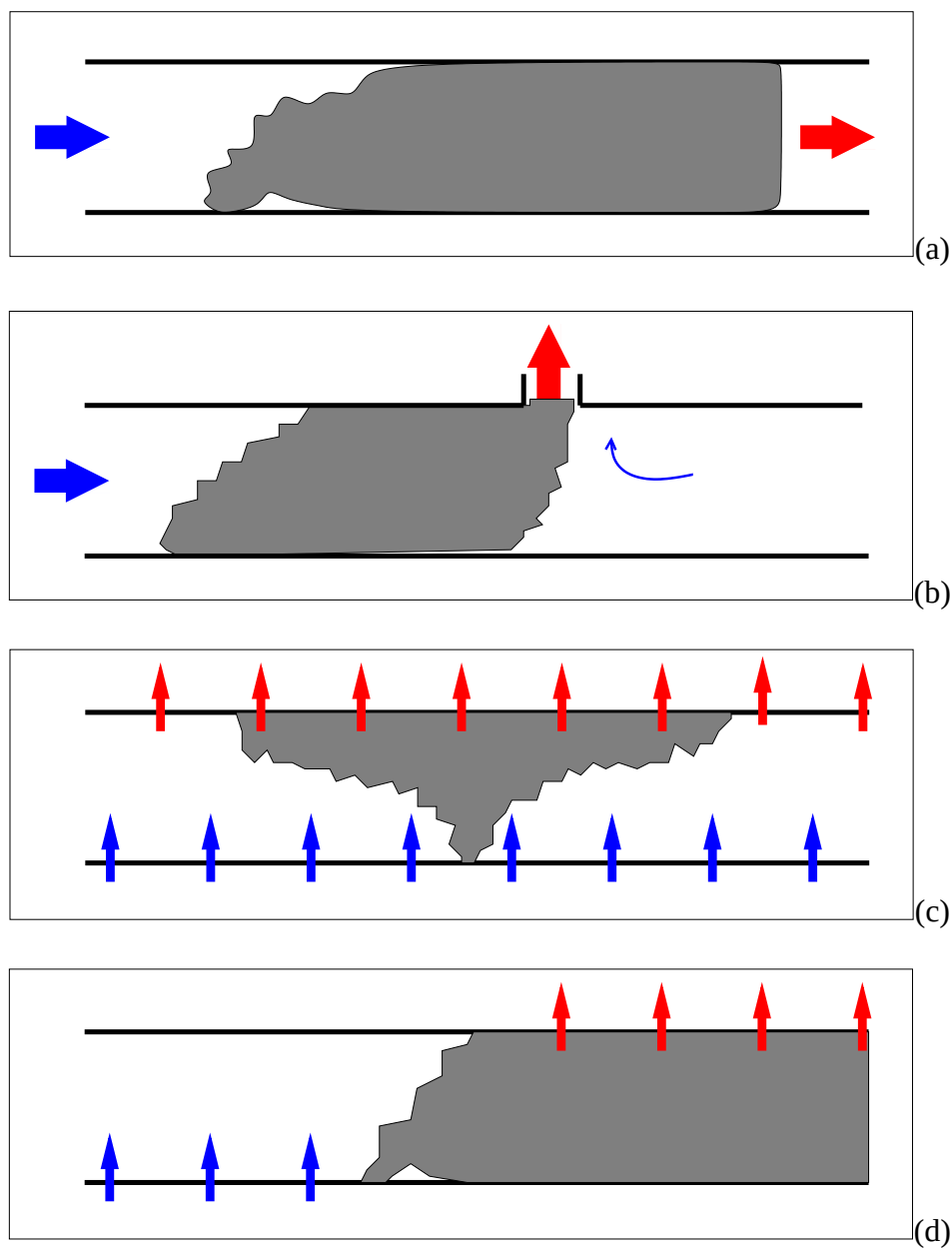


FIG. 1.2 – Emploi de la ventilation en cas d'incendie : (a) ventilation longitudinale ; (b) ventilation longitudinale avec extraction massive ; (c) ventilation transversale ; (d) ventilation transversale employée en stratégie longitudinale.

La ventilation longitudinale, plus simple, est en général bien adaptée aux tunnels unidirectionnels sans congestion récurrente. La ventilation transversale est utilisée en général pour les tunnels bidirectionnels ou unidirectionnels avec congestion récurrente. Dans le cas d'un tunnel conçu avec la construction différée d'un second tube (phasage), cela peut conduire à des choix différents dans le premier et le second tube (voir par exemple l'annexe C).

Enfin, l'instruction technique [17] prévoit que les prescriptions qu'elle formule pourront ne pas être toujours appliquées de façon stricte s'il est démontré que les dispositions proposées assurent un niveau de sécurité au moins équivalent. Le choix du système de ventilation sanitaire et de la stratégie de désenfumage est traité dans le chapitre 4. Le fonctionnement des différents systèmes est détaillé au chapitre 5.

1.3 Importance de la ventilation dans la conception générale d'un tunnel

1.3.1 Encombrement des équipements de ventilation

Selon le système de ventilation, mais aussi le type d'ouvrage (géométrie voûtée ou rectangulaire), les contraintes d'installation des équipements de ventilation sont différentes. Cela peut impliquer des travaux de génie civil importants, qui peuvent avoir une grande incidence sur le coût d'un tunnel.

Ventilation longitudinale d'un tunnel voûté

En ventilation longitudinale, le courant d'air est en général créé par des accélérateurs. Quand le tunnel est voûté, la meilleure implantation des ventilateurs est en sous-face de la voûte et ne nécessite généralement pas de sur-excavation (voir figure 1.3). Dans le cas où une

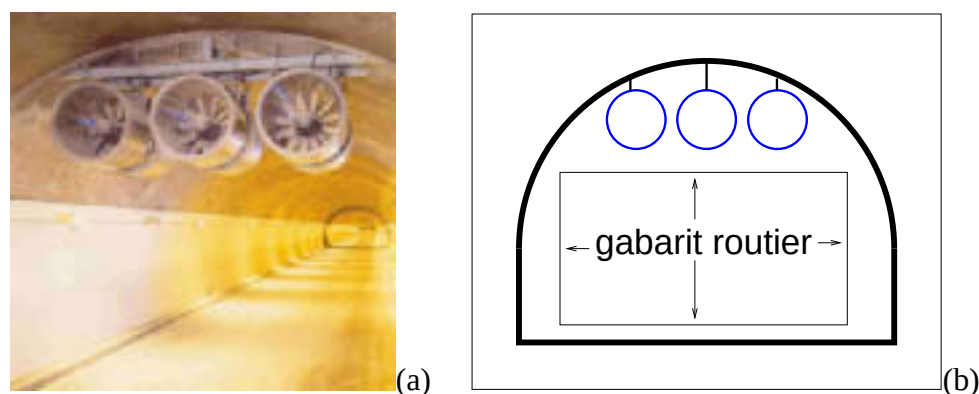


FIG. 1.3 – Implantation de ventilateurs en voûte de tunnel

extraction massive est nécessaire, il faut prévoir l'implantation d'une station de ventilation (très grossièrement, entre 1 000 et 5 000 m³) à localiser à proximité du point d'extraction. Cette station doit être reliée à l'extérieur pour permettre la sortie des fumées en cas d'incendie. Cela peut conduire, le cas échéant, à construire des puits ou des galeries de transit pour le passage de l'air.

Ventilation longitudinale d'un tunnel à section rectangulaire

Dans le cas d'un tunnel à section rectangulaire, on ne peut pas utiliser l'espace qui serait libéré par la voûte au dessus du gabarit routier. Il est donc nécessaire de prévoir un sur-gabarit pour l'implantation des ventilateurs (figure 1.4(a)). Cela peut être fait sur toute la longueur de l'ouvrage ou localement au droit des ventilateurs, au moyen d'un bossage (figure 1.4(c)). Une solution possible mais déconseillée pour des raisons d'efficacité aéraulique est d'implanter les accélérateurs latéralement (cela permet parfois d'intégrer une tranchée couverte dans des sites où il est impossible d'augmenter le gabarit vertical de l'ouvrage sans un surcoût considérable, voir figure 1.4(b)).

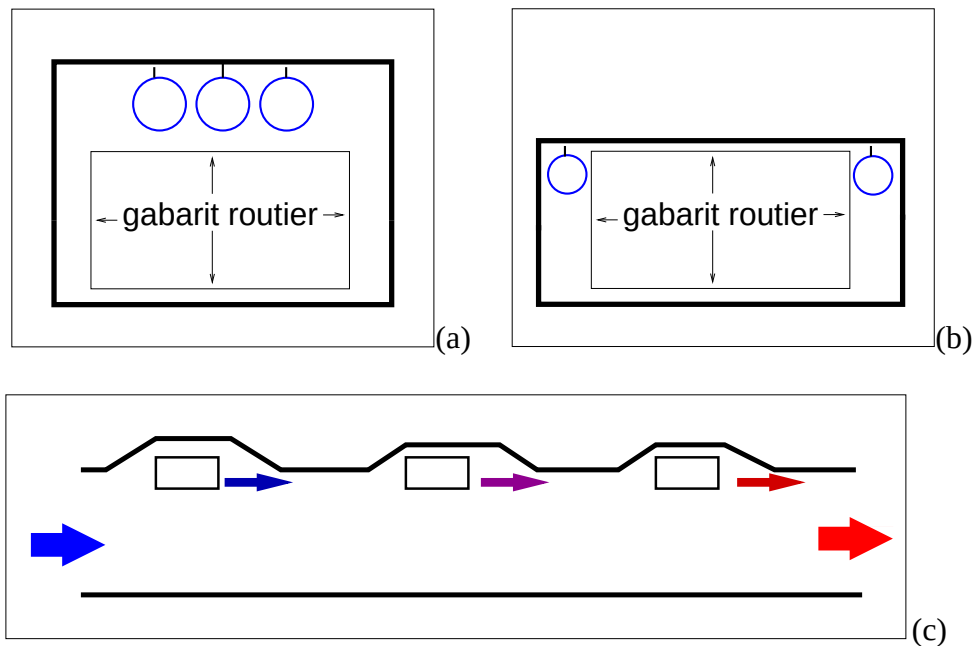


FIG. 1.4 – Exemples d'implantation de ventilateurs pour un tunnel à section rectangulaire ((a) et (b) : coupe en travers ; (c) profil en long ; la solution (b) n'est pas recommandée.

Ventilation transversale d'un tunnel voûté

Pour la ventilation transversale d'un tunnel voûté, il est généralement nécessaire d'implanter des gaines de ventilation pour le soufflage d'air frais et pour l'extraction d'air vicié ou de fumées. Dans la plupart des cas, les gaines sont implantées à l'intérieur du tube principal. Si la section du tube est en fer à cheval, on fait en général passer les gaines en plafond (figure 1.5(a) et (b)). En cas d'incendie, selon les caractéristiques du tunnel, il peut être nécessaire d'insuffler de l'air frais en bas de la section (voir section 5.4). On aménage alors des carreaux d'amenée d'air frais depuis les gaines jusqu'au niveau de la chaussée. Si la section du tube est circulaire, on fait en général passer l'air frais sous la chaussée et l'air vicié ou les fumées en plafond (figure 1.5(c)). Selon la largeur du tunnel, on peut être amené à insuffler de l'air frais des deux côtés de la chaussée.

On cherche, dans la mesure du possible, à permettre une circulation piétonne dans les gaines pour faciliter l'exploitation de l'ouvrage. L'encombrement des stations de ventilation peut être du même ordre que les stations d'extraction massive en ventilation longitudinale. En fonction des contraintes d'implantation, on peut mettre en place ou bien de nombreuses petites stations (qui permettent des gaines de faible section) ou bien un nombre plus faible de grosses stations (qui nécessitent des gaines de section importante). Les stations de ventilation peuvent être souterraines ou construites à l'air libre.

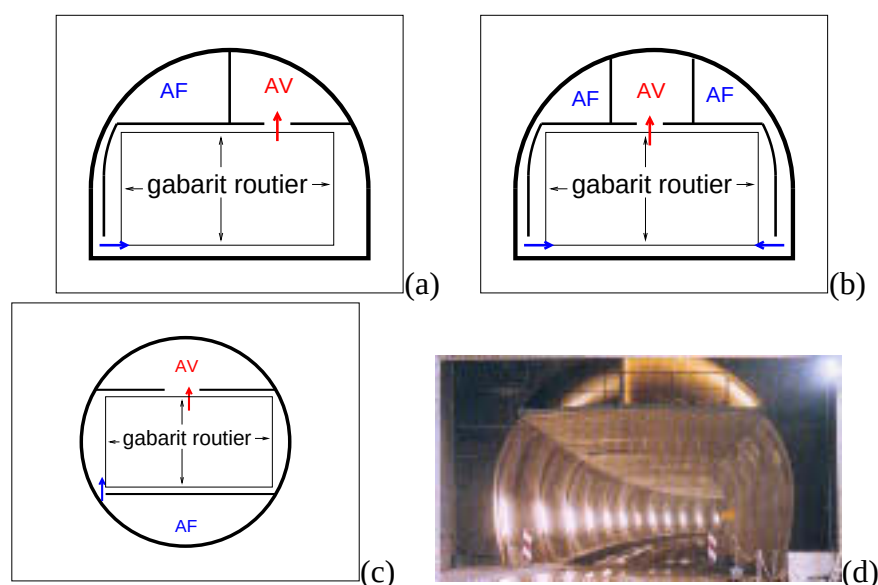


FIG. 1.5 – Exemples de configurations de gaines de ventilation en tunnel voûté ; AV est mis pour la gaine d'air vicié et AF pour la gaine d'air frais.

Ventilation transversale d'un tunnel à section rectangulaire

Dans le cas d'un tunnel à section rectangulaire, on n'a plus l'espace dégagé par la forme de voûte de l'ouvrage pour mettre en place les gaines de ventilation. Dans ce cas, il est souhaitable de conserver les bouches d'extraction en plafond et le soufflage en bas de piédroit s'il est nécessaire en cas d'incendie (voir section 2.3.5). Quelques solutions possibles sont schématisées sur la figure 1.6.

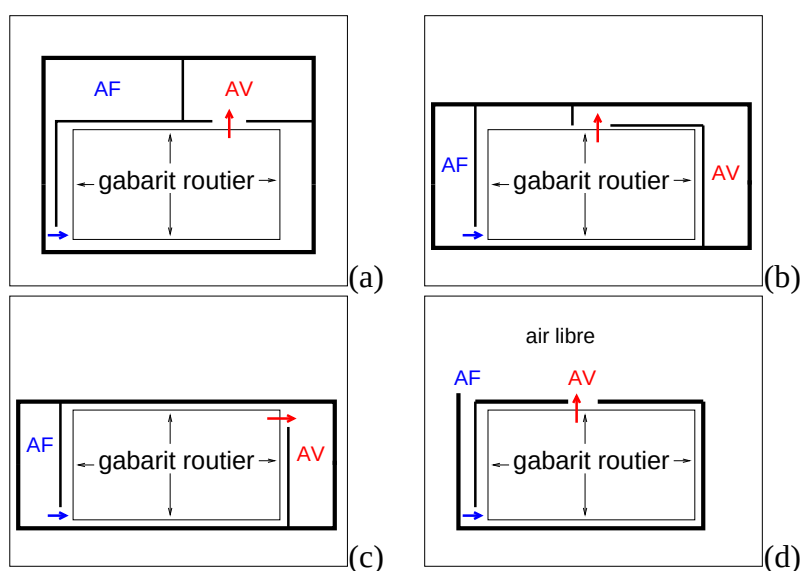


FIG. 1.6 – Exemples de configurations de gaines de ventilation en tranchée couverte ; AV est mis pour la gaine d'air vicié et AF pour la gaine d'air frais ; (c) est à éviter car peu efficace ; (d) nécessite des ventilateurs insufflateurs et extracteurs répartis sur toute la longueur de l'ouvrage.

1.3.2 Incidence sur le projet de tunnel

Comme on l'a vu, le système de ventilation peut prendre des formes assez différentes. Il peut conditionner la section transversale du tunnel, poser des problèmes d'implantation des stations (et de liaison de ces stations avec le tunnel ou avec l'air libre). Enfin, il faut considérer l'incidence du système de ventilation sur l'environnement des points de rejet (têtes comprises).

Une étude de ventilation peut intervenir soit pour un projet de tunnel neuf, soit pour une mise à niveau de tunnel existant. Dans le cas de la réfection d'un tunnel existant, les contraintes géométriques sont fixées et il s'agit donc d'optimiser la ventilation pour cette géométrie, à moins de réaliser de très importants travaux de génie civil (création d'une galerie parallèle au tunnel par exemple).

En revanche, pour les ouvrages neufs, il importe de se préoccuper des questions de ventilation le plus en amont possible dans l'étude, afin d'examiner l'incidence du parti général sur les solutions de ventilation. Par exemple, pour un projet de tranchée couverte, il peut être intéressant d'envisager la solution de tranchées courtes alternées avec des zones ouvertes (recouvertes ou non de damiers phoniques), simplifiant par là même considérablement la question du désenfumage en cas d'incendie et de la dilution des polluants⁴. Par ailleurs, le fait de mettre en place une ventilation mécanique impose une alimentation électrique de puissance sécurisée (voir l'instruction technique [17] et le *Dossier pilote des tunnels : alimentation électrique* [2]).

1.3.3 Articulation des études de ventilation avec les différentes étapes du projet

Les études de ventilation interviennent dès les premières analyses pouvant conduire à la réalisation d'un tunnel. Les études peuvent être subdivisées en trois principales étapes :

- premières études, dont le but est d'examiner la faisabilité et de faire une estimation financière grossière pour permettre de déclencher ou non la phase d'avant projet ;
- phase d'avant projet, dont l'objectif est d'aboutir au choix d'une solution et à l'enquête d'utilité publique correspondante ;
- phase de projet proprement dit, qui intervient après la déclaration d'utilité publique, et dont l'objectif est la définition précise du futur ouvrage en vue de sa réalisation.

Le tableau 1.1 rappelle la correspondance entre les phases d'étude et la terminologie pour les routes nationales non concédées et pour les autoroutes concédées.

	réseau national non concédé	autoroutes concédées
premières études	étude de faisabilité	APS 1 ^{er} stade
préparation de l'enquête publique	EPOA	APS 2 ^{ème} stade EPOA
phase de projet	POA	APOA

TAB. 1.1 – Résumé des trois phases d'étude pour des ouvrages sur le réseau national non concédé et sur des autoroutes concédées.

⁴ Il faut néanmoins dans ce cas prendre garde à éviter la recirculation d'air pollué ou de fumées d'incendie d'un tube à l'autre ou d'un ouvrage à l'autre (cette recirculation est aussi appelée recyclage).

Selon les cas, l'incidence de la ventilation sur les autres parties des études est très variable. Elle est par exemple faible quand un tunnel voûté est ventilé longitudinalement sans extraction massive, car dans ce cas la ventilation ne consiste qu'en des équipements rapportés, et forte quand il faut mettre en place des gaines et des stations de ventilation.

Premières études

Les premières études doivent analyser la pertinence de l'ouvrage. En effet, un tunnel est un investissement lourd, et n'est réalisé que s'il est réellement nécessaire. A ce titre, les premières études commencent par analyser la nature de l'itinéraire, le trafic à plusieurs horizons temporels, les contraintes géologiques, géotechniques et d'environnement. Cela permet de commencer à préciser la géométrie de l'ouvrage, et en particulier si ce sera un ouvrage bi-tube ou mono-tube. A ce stade, la décision est prise de ventiler ou non le futur ouvrage. Si c'est le cas, on analyse la possibilité de réaliser un système longitudinal avec ou sans puits intermédiaire, ou s'il est nécessaire d'installer un système transversal (qui nécessite des gaines de ventilation). On fait aussi une estimation grossière des nuisances susceptibles d'être causées par les têtes de tunnel et le cas échéant par les stations de ventilation. Plusieurs variantes restent presque toujours analysées, ou bien sur plusieurs tracés, ou bien sur un même tracé avec des systèmes de ventilation différents, ou bien les deux. Pour chacune de ces variantes, on procède à une estimation des coûts tant à l'investissement qu'à l'exploitation. L'incidence de la ventilation sur ces coûts est très variable, mais peut être très forte en ventilation transversale.

Pour un tunnel, ces premières études comprennent des études de faisabilité propres à l'ouvrage, étape qui n'est pas fixée très précisément dans les différents documents de référence, mais rendue nécessaire par la complexité d'une étude de tunnel.

Avant-projet : préparation de l'enquête d'utilité publique

Cette phase d'étude a pour but de permettre au maître d'ouvrage d'évaluer le coût, de choisir un parti parmi les variantes et de fournir les éléments nécessaires à l'enquête d'utilité publique. Les études d'avant projet comportent donc des études de variantes et l'étude de la solution choisie par le maître d'ouvrage.

Pour l'étude des variantes, on analyse de manière plus fine chacune des variantes retenues lors de la phase précédente. En particulier, on réalise pour chacune des variantes :

- une étude de trafic détaillée, donnant le trafic aux heures de pointe à plusieurs horizons temporels,
- une étude des conditions géologiques et géotechniques pour le creusement et des caractéristiques géométriques (profils en long, profils en travers, ...),
- un examen des contraintes imposées par la ventilation sur le génie civil de l'ouvrage,
- un examen de la sécurité de l'ouvrage,
- une étude des impacts environnementaux,
- une estimation financière plus précise.

Cette étude des variantes doit permettre au maître d'ouvrage de choisir une solution à proposer à l'enquête publique. Pour cette solution, une analyse plus détaillée est faite. En particulier, c'est à ce stade que l'on fixe le système de ventilation et que l'on réalise les plans de principe de la ventilation. Ce dossier s'appelle 'étude préliminaire d'ouvrage d'art' (EPOA) pour les tunnels du réseau national. Le dossier d'étude d'impact entre aussi dans la préparation de l'enquête publique.

La conclusion de cette phase est la réalisation de l'enquête d'utilité publique, qui doit conduire à la déclaration d'utilité publique (DUP).

Phase de projet

Une fois l'ouvrage déclaré d'utilité publique commencent les études de projet proprement dites. Les études de projet reprennent et précisent les hypothèses formulées lors des phases précédentes. La définition précise des équipements est faite, avec en particulier :

- les caractéristiques générales de la ventilation (en longitudinal : nombre et performance des accélérateurs, alimentation électrique ; en transversal : implantation précise des stations, géométrie des gaines de ventilation et des bouches de soufflage et d'extraction, nombre et performance des ventilateurs ; dans les deux cas : puissance appelée),
- les réservations exactes nécessaires dans le génie civil (stations de ventilation, gaines, bouches, prises d'air frais, rejet d'air vicié et cheminées éventuelles),
- l'étude détaillée des impacts environnementaux (avec le cas échéant la réalisation d'une maquette pour modéliser la dispersion des polluants),
- l'estimation détaillée des coûts à l'investissement et en exploitation,
- les principes généraux de la commande de la ventilation en rapport avec le choix du degré de permanence et surveillance (choix du mode de commande, du type d'automatisme, du type et du nombre de capteurs à mettre en place).

Ces études constituent, dans le cas du réseau national non concédé, des éléments du 'projet d'ouvrage d'art' (POA) et, dans le cas du réseau national concédé, des éléments de 'l'avant projet d'ouvrage d'art' (APOA).

Dans la plupart des cas, ces études sont suffisamment détaillées pour constituer le mémoire technique du dossier de consultation des entreprises (DCE) pour la réalisation des équipements de ventilation. Si ce n'est pas le cas, il peut être nécessaire de réaliser des études complémentaires.

Le génie civil d'un tunnel est bien évidemment réalisé avant ses équipements. Lors de la réalisation du génie civil, il se peut qu'il faille modifier le projet, avec une incidence sur les équipements.

1.3.4 Ordre de grandeur des coûts

Les coûts induits par la ventilation à la construction sont essentiellement dus au génie civil de ventilation. Pour ce qui est du coût des équipements de ventilation eux-mêmes et du coût d'exploitation, on peut donner les ordres de grandeur suivants :

- l'ensemble des équipements et du génie civil lié à ces équipements représente très approximativement entre 0 et un 30% du coût total de construction d'un tunnel. Pour un tunnel court, il s'agit essentiellement d'équipements d'éclairage ; pour un tunnel long, les équipements de ventilation ont un poids relatif plus important.
- Le coût d'exploitation annuel est d'environ un dixième du coût des équipements, dont un tiers pour le personnel d'exploitation, un tiers pour la maintenance et un tiers pour la consommation électrique. En général, la part de la ventilation dans ce coût est faible, sauf pour certains tunnels très longs.

1.4 Textes de référence

1.4.1 Sécurité en tunnel

La loi 2002-3 du 3 janvier 2002 relative à la sécurité des infrastructures de transport prévoit dans son article 2 des dispositions pour les ouvrages du réseau routier dont l'exploitation présente des risques particuliers pour la sécurité des personnes, dans des conditions à fixer par des décrets non encore parus. En particulier, un décret en conseil d'Etat doit fixer les catégories d'ouvrages auxquelles s'appliquent ces dispositions. Les tunnels routiers seront certainement inclus dans cette liste. Cette loi s'applique aux infrastructures de transport quel qu'en soit le maître d'ouvrage.

Pour les tunnels du réseau national concédé et non concédé, la circulaire 2000-63 du 25 août 2000 contient des dispositions supplémentaires. Son annexe 2 est une instruction technique [17] qui définit les dispositions de sécurité applicables aux tunnels neufs. Son annexe 1 définit les procédures à respecter dans les projets de tunnel. Quelques prescriptions importantes de l'instruction technique [17] et les principes sous-jacents qui en ont déterminé la rédaction sont brièvement exposés ci dessous.

En cas de blocage accidentel de la circulation qui n'oblige pas à l'évacuation immédiate des usagers, l'instruction technique [17] fixe les valeurs de polluants à ne pas dépasser comme suit :

- la concentration de monoxyde de carbone doit être inférieure à 150 ppm ;
- le coefficient d'absorption par unité de longueur doit être inférieur à 9.10^{-3} m^{-1} .

De plus amples précisions sont données au chapitre 3 sur ces valeurs.

Des dispositions de désenfumage en cas d'incendie sont nécessaires pour les tunnels au delà d'une longueur qui dépend du trafic et du risque d'engorgement de la circulation dans l'ouvrage. En effet, pour un tunnel urbain, même si des mesures sont normalement prises pour limiter le risque de blocage de la circulation, le nombre d'usagers présents en tunnel en cas d'incident peut être élevé, et il est alors important de garantir un désenfumage même pour des longueurs relativement courtes. Enfin, des aménagements renforcés d'évacuation et de protection des usagers peuvent faciliter la mise hors danger des usagers et compenser un désenfumage inexistant ou insuffisant (voir [17]).

Plus précisément, l'instruction technique [17] 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 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 une 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 fréquente.

Un *tunnel à faible trafic* est défini comme un tunnel non urbain 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 5 véhicules.

1.4.2 Qualité de l'air en tunnel en exploitation normale

La réglementation des niveaux de pollution à l'intérieur des tunnels est basée sur la circulaire 99.329 du ministère de l'emploi et de la solidarité du 8 juin 1999 qui a transmis aux préfets un avis du conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF) comportant des recommandations pour les tunnels routiers. Par ailleurs, l'opacité, qui n'est pas un polluant réglementé, doit être contrôlée. Les modalités d'application de la circulaire et les niveaux d'opacité admissibles sont détaillés dans le chapitre 3.

1.4.3 Qualité de l'air et bruit au voisinage des tunnels

Les questions de la dispersion de polluants et du bruit à l'extérieur des tunnels sont analysées par ailleurs, dans le *Dossier pilote des tunnels : environnement* [1]. Le *guide pour la prise en compte de la qualité de l'air au voisinage des tunnels routiers* [7] donne la démarche à suivre pour les études de qualité de l'air pendant les phase projets.

La question de la qualité de l'air au voisinage des tunnels n'est pas abordée dans le présent document, même si elle peut avoir une incidence sur le système de ventilation ou son exploitation.

Chapitre 2

DÉSENFUMAGE EN CAS D'INCENDIE

2.1 *Les incendies en tunnel*

2.1.1 Risques d'incendie en tunnel

Les sources potentielles d'incendie en tunnel sont les véhicules présents en tunnel et les matériaux et installations de l'espace de circulation lui-même ou des locaux techniques.

Pour les installations du tunnel présentes dans le tube lui-même, en raison des dispositions prises en matière de réaction au feu des matériaux (cf. instruction technique [17]), les puissances calorifiques sont faibles et un éventuel incendie ne risque pas de se propager. Dans le seul cas de l'inflammation de la chaussée causée par un incendie de véhicule, la contribution à la puissance thermique peut atteindre un niveau important, mais uniquement quand l'incendie de véhicule dégage lui-même une très forte puissance, et relativement tard dans le développement de l'incendie.

L'incendie d'installations situées en locaux techniques peut atteindre des puissances plus élevées. Quand ces locaux techniques sont situés hors du tunnel lui-même, il faut leur appliquer les règles prévues pour les locaux industriels. Quand ces locaux techniques sont à côté, en dessous ou au dessus du tunnel, l'instruction technique [17] § 4.3.2.b prévoit que pour limiter les conséquences d'un incendie survenant dans le local, les parois du local doivent être coupe-feu de niveau N1 ou N2. Ces locaux étant fermés, la dynamique de l'incendie est très différente. Un incendie se développe en général suffisamment lentement pour ne pas mettre en danger les usagers. On se contente donc pour limiter les effets des incendies en locaux techniques des méthodes classiques de détection et de lutte contre l'incendie.

Les incendies en tunnel qui sont dangereux pour les usagers sont donc les incendies de véhicules présents dans le tunnel. L'incendie peut se produire en tout endroit du tunnel avec tout type de véhicule et de chargement du véhicule. Les caractéristiques de l'incendie seront fortement variables d'un cas à l'autre. La puissance thermique d'un incendie de véhicule varie entre moins de 2 MW (petit incendie de véhicule de tourisme) et 200 MW (incendie d'une citerne d'hydrocarbures).

La plupart de ces incendies sont causés par une inflammation spontanée des véhicules par défaillance technique (échauffement anormal, court-circuit, ...). En revanche, la quasi totalité des incendies ayant entraîné des décès est consécutive à un accident (à l'exception notable du dramatique incendie de mars 1999 dans le tunnel du Mont-Blanc).

L'ordre de grandeur des taux d'incendie est donné dans la table 2.1. Les incendies sont dits importants quand il s'agit d'incendies de poids lourds qui n'ont pas pu être éteints par les usagers et dont la puissance a dépassé 10 à 20 MW. Bien sûr, ce ne sont que des ordres de

type de véhicule	VL	PL	PL (incendies importants)
taux (pour 10 ⁸ véh.km)	2	7	1

TAB. 2.1 – ordre de grandeur des taux d'incendie selon les types de véhicule

grandeur, le taux réel dépendant du type d'itinéraire. De plus, le nombre d'incendies importants est trop faible pour garantir la précision du chiffre donné dans ce cas.

2.1.2 Les risques lors d'un incendie en tunnel

Les incendies peuvent causer des dommages aux personnes, aux biens et à l'ouvrage. L'ordre d'apparition des dangers est en général le suivant :

- le premier effet est l'arrivée des fumées, qui sont très opaques et gênent considérablement l'évacuation des usagers,
- dans un second temps, les usagers qui n'ont pas pu évacuer le tunnel à cause du manque de visibilité sont incommodés voire asphyxiés par les fumées dégagées par l'incendie, dont le niveau de toxicité augmente progressivement,
- enfin, la chaleur dégagée par l'incendie provoque de fortes élévations de température, pouvant mettre en danger directement des personnes (par convection ou par rayonnement), mais aussi détruire ou endommager des véhicules ou des composants du tunnel parfois indispensables à la sécurité des usagers (éclairage, ventilation, systèmes de communications, faux plafonds, ...) ou provoquer la chute d'objets lourds fixés en plafond (signalisation, ventilateurs, ...). C'est pourquoi l'instruction technique [17, chapitre 4] prévoit des dispositions de résistance au feu des structures et des équipements de tunnels. Ce risque concerne essentiellement les services de lutte contre l'incendie qui peuvent pénétrer dans le tunnel munis d'appareils respiratoires.

Les ordres de grandeur des conditions ambiantes critiques pour les usagers sont une visibilité de moins de 10 m⁽¹⁾, une température entre 50 et 80°C selon l'humidité de l'air, et un rayonnement de l'ordre de 2 kW/m². La toxicité reste en général acceptable tant que les conditions minimum de visibilité décrites ci-dessus sont assurées. C'est donc bien la perte de visibilité qui est le danger fondamental, car sans visibilité, il devient impossible d'évacuer l'espace enfumé, ce qui conduit à devoir respirer un air chargé en substances toxiques pendant un temps trop long pour permettre la survie.

Pour les services de lutte contre le feu munis d'équipements adaptés (en particulier des appareils respiratoires), la température critique est de l'ordre de 100°C et le rayonnement critique de 5 kW/m².

Il convient d'évoquer brièvement le risque d'explosion en tunnel. Un tunnel est un espace confiné dans lequel toute explosion a des conséquences dramatiques (formation d'une onde de choc puissante qui est mortelle sur toute la longueur du tunnel et dangereuse à l'extérieur à proximité immédiate des têtes). Priver complètement d'air un incendie en tunnel est donc dangereux, car cela peut conduire à la formation de poches de gaz explosives.

¹ Le lien entre la distance de visibilité et les mesures d'absorption optique est donné dans le chapitre 3.

2.1.3 Incendies de dimensionnement

Pour prendre en compte le risque d'incendie dans le dimensionnement des installations de ventilation, l'instruction technique [17] définit des incendies de dimensionnement dont les caractéristiques sont précisées dans le tableau 2.2. Ces incendies ont été choisis car ils recouvrent l'immense majorité des cas d'incendie. Ce ne sont pas cependant les incendies les pires qui puissent arriver. En particulier, l'incendie de poids lourd pour les tunnels de gabarit supérieur à 3,50 m interdits aux marchandises dangereuses est fixé à 30 MW. On sait que, dans des circonstances exceptionnelles, on peut atteindre des puissances de l'ordre de 100 MW, voire plus, avec des poids lourds chargés de matières combustibles non classées marchandises dangereuses. Cela étant, le risque de développement d'un incendie de puissance élevée est extrêmement faible (en France, le seul incendie de poids lourd ne transportant pas de marchandises dangereuses ayant dépassé 30 MW est celui du 24 mars 1999 dans le tunnel du Mont-Blanc). Le surcoût pour concevoir une installation de ventilation (surtout en transversal) adaptée à un incendie supérieur à 30 MW est très important. En outre, les connaissances actuelles ne permettent pas d'affirmer qu'une installation transversale dimensionnée plus largement permettrait de faire face efficacement à un incendie dépassant fortement 30 MW. Comme des incendies supérieurs à 30 MW sont très rares, il est plus efficace de porter l'effort sur d'autres installations de sécurité visant à mieux alerter et évacuer les usagers².

En revanche, la résistance au feu des éléments vitaux d'un tunnel prend en compte des incendies plus importants que les incendies de dimensionnement de la ventilation.

type de tunnel	définition de l'incendie de dimensionnement	puissance totale	débit de fumées (*)
gabarit < 2 m	2 ou 3 véhicules légers	8 MW	—
2 m < gabarit < 3,5 m	un fourgon	15 MW	50 m ³ /s
gabarit > 3,5 m	gros incendie de poids lourd poids lourd chargé d'hydrocarbures (**)	30 MW	80 m ³ /s
• sans TMD • avec TMD		200 MW	> 300 m ³ /s

TAB. 2.2 – Incendies de dimensionnement retenus par l'instruction technique [17]; TMD : transport de marchandises dangereuses ; (*) ce débit représente la somme des débits des produits de combustion et des gaz entraînés dans le panache de l'incendie, pour une géométrie correspondant au gabarit considéré et en supposant les fumées stratifiées ; il est mesuré à la température des fumées ; (**) cet incendie de dimensionnement n'est pas utilisé en pratique en ventilation transversale pour les raisons exposées dans le texte.

² De plus, l'étude spécifique des dangers instituée par la circulaire 2000-63 a pour but d'évaluer les conséquences d'un incendie supérieur à l'incendie de dimensionnement, en tenant compte des dispositions de sécurité prises par ailleurs ; la ventilation doit permettre dans ce cas d'assurer un désenfumage au démarrage de l'incendie, pendant une durée permettant aux usagers d'évacuer le tunnel (cf. le guide sur les études spécifiques des dangers [10]).

2.1.4 Place du désenfumage dans l'ensemble des équipements de sécurité

Le système de désenfumage fait partie d'un ensemble d'éléments visant à minimiser les conséquences d'un incendie. Les objectifs fondamentaux de ces dispositifs spécifiques en cas d'incident ou d'accident sont :

- détecter les situations anormales et assurer la communication avec les usagers (moyens de surveillance et de détection, signalisation, postes téléphoniques d'appel d'urgence, etc.) ;
- permettre la protection et l'évacuation des usagers et l'accès des secours (issues de secours, abris, garages, éclairage de sécurité, ventilation, etc.) ;
- se prémunir et lutter contre l'incendie (réaction et résistance au feu, moyens d'extinction, moyens de communication des services de secours, désenfumage, etc.).

Ainsi, si un bon système de désenfumage est indispensable, il doit être conçu dans le cadre d'un ensemble de dispositions, y compris l'exploitation.

2.2 Notions sur le comportement des fumées

Un incendie produit des fumées chaudes qui tendent à se plaquer en sous-face de la voûte ou du plafond du tunnel. Selon le courant d'air longitudinal, mais aussi selon la pente du tunnel, le comportement des fumées est différent.

2.2.1 En l'absence de courant d'air longitudinal

En l'absence de courant d'air longitudinal, les fumées se maintiennent en partie haute du tunnel sur d'assez longues distances (voir par exemple figure 2.1). Si le tunnel n'est pas en pente, les fumées se propagent de façon symétrique dans les deux directions à une vitesse de l'ordre de 1 à 2 m/s pour un incendie de véhicule léger, et vraisemblablement à plus de 4 m/s pour une citerne d'essence (figure 2.2(a)). Au fur et à mesure de sa progression, la couche de fumées se refroidit et sa vitesse diminue. Une couche d'air frais se maintient sous la couche de fumée sur plusieurs centaines de mètres ; elle est entraînée en direction de l'incendie.

En continuant de s'éloigner, les fumées se rapprochent du sol et sont susceptibles d'être renvoyées vers le feu par le courant d'air contraire. Elles occupent alors tout l'espace du tunnel (figure 2.2(b)).



FIG. 2.1 – Exemple de nappe de fumée stratifiée.

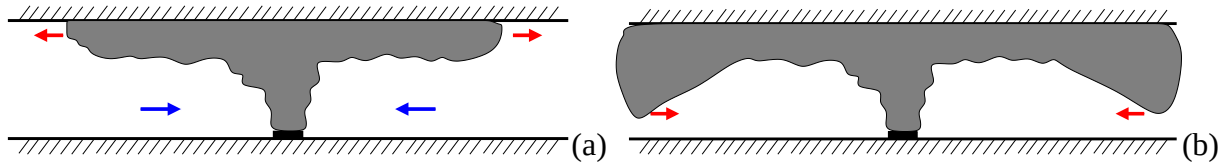


FIG. 2.2 – Comportement des fumées en l'absence de pente et de courant d'air ; (a) développement initial ; (b) comportement après un certain temps (dans ce schéma, comme dans tous les schémas montrant le mouvement des fumées, les échelles verticales sont très dilatées par rapport aux échelles horizontales).

2.2.2 Influence d'un courant d'air longitudinal

En présence d'un courant d'air longitudinal suffisant, toujours en l'absence de pente, l'ensemble des fumées est poussé d'un seul côté par le courant d'air. On appelle vitesse critique (notée ici V_C) la vitesse de l'air (en moyenne sur une section au vent du foyer³) à partir de laquelle toutes les fumées sont repoussées d'un seul côté. Les figures 2.3(a) et (b) montrent la situation quand la vitesse de l'air est inférieure à V_C . On y voit en particulier le phénomène de nappe de retour (*backlayering* en anglais), qui consiste en une couche stable de fumées au vent du foyer. La figure 2.3(c) montre la situation quand la vitesse de l'air est nettement supérieure à V_C . La vitesse critique V_C est de l'ordre de 1 à 2 m/s pour un incendie de véhicule léger, de 2 à 3 m/s pour un incendie de poids lourd, et ne dépasse pas 4 m/s pour un incendie de citerne d'essence.

On définit la vitesse de déstratification V_d , telle que si la vitesse du courant d'air (en moyenne sur une section au vent du foyer et hors d'une éventuelle nappe de retour) est inférieure à V_d alors l'écoulement reste stratifié, et si elle est supérieure à V_d il devient déstratifié (cas b et c de la figure 2.3). La définition précise de V_d , dans l'état actuel des connaissances, est délicate, car la fumée peut être stratifiée à proximité du foyer et se déstratifier plus loin (voir figure 2.3(b)), et cette stratification dépend de la présence d'obstacles dans le tunnel. Pour des incendies de plus de quelques MW, et de façon sécuritive, on peut retenir $V_d \leq V_C$.

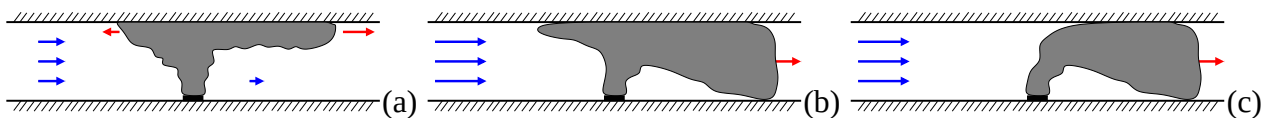
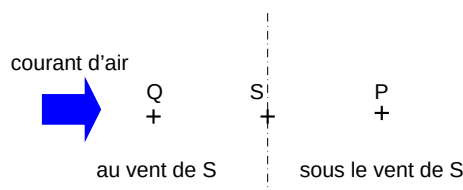


FIG. 2.3 – Comportement des fumées en l'absence de pente et en présence de courant d'air ; (a) $V < V_d$; (b) $V_d < V < V_C$; (c) $V > V_C$.

Le tableau 2.3 donne des ordres de grandeur des températures atteintes en voûte pour une vitesse de courant d'air de l'ordre de V_C .

³ En présence d'un courant d'air, on dira qu'un point P est *sous le vent* d'un point S si le vent va de S vers P, et qu'un point Q est *au vent* du point S si le vent va de Q vers S. Il est préférable d'utiliser ces expressions plutôt que les mots 'amont' et 'aval' qui peuvent prêter à confusion.



distance au foyer	10 m	100 m	200 m	400 m
véhicule léger	250°C	80°C	40°C	30°C
poids lourd	700°C	250°C	120°C	60°C
citerne d'essence	>1000°C	400°C	200°C	100°C

TAB. 2.3 – Ordre de grandeur des températures des fumées en voûte sous le vent du foyer pour une vitesse du courant d'air de l'ordre de la vitesse critique.

2.2.3 Effet de la pente

L'éventuelle déclivité longitudinale du tunnel a pour conséquence de modifier le mouvement des fumées, à cause de la poussée d'Archimède exercée sur les fumées chaudes (*effet cheminée*). De même que dans le cas où la déclivité est nulle, selon la valeur du courant d'air, les fumées restent stratifiées ou non, comme illustré sur la figure 2.4. En toute rigueur la vitesse de déstratification V_d et la vitesse critique V_C dépendent de la pente. Compte tenu des ordres de grandeur des pentes (inférieures à 10 %), on ne tient pas toujours compte de cette dépendance.

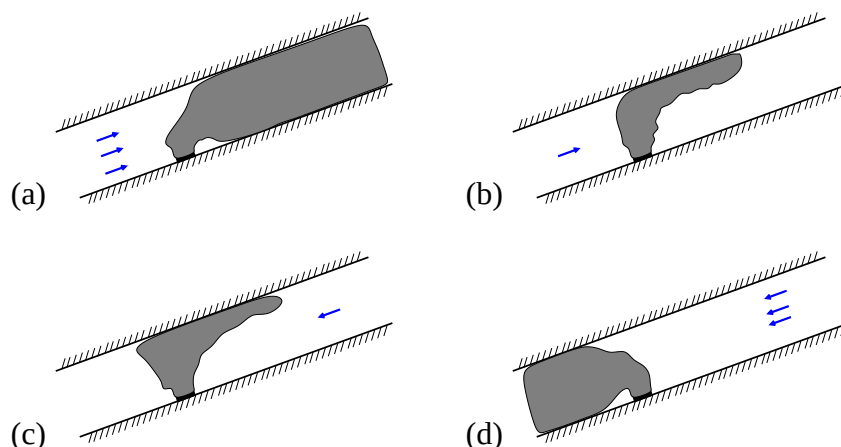


FIG. 2.4 – Comportement des fumées dans un tunnel en pente ; (a) courant d'air ascendant fort ; (b) courant d'air ascendant modéré ; (c) courant d'air descendant modéré ; (d) courant d'air descendant fort.

2.3 Les stratégies de désenfumage

2.3.1 Principes généraux

Deux démarches sont a priori envisageables :

- ou bien chercher à avoir un courant d'air longitudinal suffisamment fort pour pousser toutes les fumées vers l'un des côtés du tunnel, à condition que ce côté ait pu être évacué,
- ou bien chercher à limiter le courant d'air longitudinal pour conserver la stratification des fumées et les aspirer en plafond.

La première démarche correspond à une stratégie de ventilation longitudinale, la seconde à une stratégie de ventilation transversale.

Dans certains cas, il peut être utile de distinguer la phase d'évacuation, pendant laquelle il peut y avoir des usagers de deux côtés de l'incendie, et donc pendant laquelle il faut conserver la stratification des fumées, de la phase de lutte contre l'incendie, pendant laquelle il peut être avantageux de repousser les fumées d'un côté de l'incendie seulement pour permettre un accès dégagé de fumées de l'autre côté de l'incendie.

2.3.2 Cas où l'absence de dispositif de désenfumage est autorisée

En l'absence de dispositif de désenfumage, les fumées s'échappent par les têtes du tunnel ou par des ouvertures en plafond sous l'action de la poussée d'Archimède et du courant d'air existant naturellement dans l'ouvrage.

Dans l'instruction technique [17], des ouvertures en plafond doivent être comprises comme un "dispositif pour assurer le désenfumage". L'absence de dispositif de désenfumage n'est autorisée que dans certains cas spécifiques, comme précisé dans le tableau 2.4. Dans les cas où il n'existe pas de solution de désenfumage bien adaptée, il est possible de déroger à ces limites, sous réserve de mesures compensatoires portant notamment sur les aménagements d'évacuation et de protection des usagers. Ceci s'applique plus particulièrement aux tunnels à trafic faible.

type de tunnel	absence de dispositif spécifique autorisée
urbain de longueur inférieure à 300 m de longueur supérieure à 300 m	oui non
non urbain à un ou deux tubes à trafic non faible de longueur inférieure à 500 m de longueur comprise entre 500 et 800 m de longueur supérieure à 800 m	oui selon les cas (a) non
non urbain à un tube bidirectionnel à trafic faible de longueur inférieure à 1000 m de longueur supérieure à 1000 m	oui non (b)

TAB. 2.4 – Cas pour lesquels l'absence de dispositif de désenfumage est autorisée pour les tunnels de gabarit supérieur à 3,5 m ; (a) : l'absence de dispositif de désenfumage est autorisée si elle est accompagnée d'une augmentation du nombre des issues de secours ; (b) : sauf dans les cas où il n'existe pas de solution de désenfumage bien adaptée, sous réserve de mesures compensatoires portant notamment sur les issues de secours.

2.3.3 Stratégie en ventilation longitudinale

En ventilation longitudinale, l'objectif est de repousser toutes les fumées d'un même côté du foyer à une vitesse suffisante pour éviter tout backlayering. Comme on l'a vu, les fumées sont donc déstratifiées sous le vent du foyer. La fonction de désenfumage ne peut dans ce cas être valablement assurée dans un tunnel où cohabitent les deux sens de circulation (dans ce cas, des véhicules peuvent être bloqués de part et d'autre du foyer, et le nuage de fumées déstratifiées atteindra nécessairement les uns ou les autres). En revanche, dans un tube unidirectionnel

non congestionné, une action très efficace est obtenue en poussant l'air. Les usagers bloqués au vent du foyer sont protégés par le courant d'air, alors que les véhicules situés sous le vent du foyer peuvent poursuivre leur route librement vers la sortie du tunnel. Les services de secours peuvent accéder à l'incendie par le côté libre de fumées (ainsi que par les issues de secours). Ce raisonnement est mis en défaut si la circulation est bloquée ou fortement congestionnée⁴, ce qui est fréquent dans les tunnels urbains ; il faut alors limiter les longueurs désenfumées en stratégie longitudinale à des valeurs bien inférieures à la longueur maximale possible en ventilation longitudinale pour la seule dilution des polluants. On peut dans ce cas installer des extractions massives distantes de moins de 500 ou 800 m selon la stratégie de mise en oeuvre du désenfumage (voir section 2.3.4). Le tableau 2.5 résume les cas où l'instruction technique [17] autorise la ventilation longitudinale pour les tunnels de gabarit supérieur à 3,50 m. Pour les tunnels de gabarit inférieur à 3,50 m, il convient de mettre en place systématiquement des extractions massives.

type de tunnel	ventilation longitudinale autorisée	
	sans extraction massive	avec extraction massive
• urbain unidirectionnel de longueur inférieure à 500 m de longueur comprise entre 500 et 800 m de longueur supérieure à 800 m	oui oui (a) non	— oui oui
• urbain bidirectionnel	non	non
• non urbain unidirectionnel à trafic non faible de longueur inférieure à 5000 m de longueur supérieure à 5000 m	oui non	— oui
• non urbain bidirectionnel à trafic non faible de longueur inférieure à 1000 m de longueur supérieure à 1000 m	oui (b) non	— non
• non urbain bidirectionnel à trafic faible de longueur inférieure à 1500 m de longueur supérieure à 1500 m	oui non (c)	— non

TAB. 2.5 – Cas pour lesquels la ventilation longitudinale est autorisée pour les tunnels de gabarit supérieur à 3,5 m ; (a) : oui s'il est possible de contrôler le courant d'air longitudinal ; (b) : sous réserve d'augmenter le nombre des issues de secours ; (c) : sauf si toutes les autres solutions sont pires et que des aménagements compensatoires sont réalisés.

Dans le cas d'un tunnel

– bidirectionnel

– ou unidirectionnel urbain de plus de 500 m sans extractions massives

– ou unidirectionnel urbain avec des extractions massives distantes de plus de 500 m,

on vise à maintenir la stratification des fumées en limitant le courant d'air à des valeurs inférieures à 1 à 2 m/s tant que des usagers sont susceptibles d'être présents dans la zone vers laquelle seront poussées les fumées. De plus, s'il s'agit d'un tunnel unidirectionnel, on s'efforce d'avoir ce courant d'air dans le sens de la circulation. Ce n'est que quand les usagers

⁴ Voir note 15 page 93.

situés sous le vent de l'incendie ont évacué que l'on peut mettre en route le désenfumage au régime nominal. La limitation du courant d'air en ventilation longitudinale est difficile à mettre en oeuvre et nécessite un niveau d'équipement et d'exploitation suffisant. Dans un tunnel de pente nulle et en l'absence de contre-pressions atmosphériques fortes, cette limitation peut se faire en arrêtant tous les accélérateurs. En revanche, dans un tunnel en pente ou avec de fortes contre-pressions, il peut être nécessaire de mettre en marche certains accélérateurs, ce qui ne peut se voir que par une analyse du comportement des fumées en fonction de la position de l'incendie dans le tunnel. Dans tous les cas, cette limitation doit pouvoir se faire au moyen de scénarios préprogrammés.

Le tableau 2.6 résume les incendies de dimensionnement à considérer et les vitesses minimales de courant d'air à assurer selon le type de tunnel d'après les prescriptions de l'instruction technique [17]. On notera que par mesure de sécurité, les valeurs de vitesse de courant d'air prescrites sont légèrement supérieures aux vitesses critiques.

type de tunnel	puissance de l'incendie de dimensionnement	vitesse du courant d'air
gabarit < 2 m	8 MW	2 m/s
2 m < gabarit < 3,5 m	15 MW	2,5 m/s
gabarit > 3,5 m		
• sans TMD	30 MW	3 m/s
• avec TMD	200 MW	4 m/s

TAB. 2.6 – Prescriptions pour la ventilation longitudinale.

Cas des tunnels autorisés aux transports de marchandises dangereuses

Pour les tunnels autorisés aux transports de marchandises dangereuses, l'échauffement progressif des parois peut rendre impossible le maintien d'un courant d'air de 4 m/s pendant 2 heures. Dans ce cas, on s'efforce de garantir un courant d'air de 4 m/s le plus longtemps possible, et en tout état de cause pendant au moins les 15 premières minutes de l'incendie, et supérieur à 3 m/s pendant au moins les 45 minutes suivantes.

2.3.4 Ventilation longitudinale avec extractions massives

Dans le cas de la ventilation longitudinale, au delà d'une certaine longueur de tunnel, il est nécessaire d'installer des stations d'extraction massive⁵. Dans les tunnels urbains, ces stations doivent être réparties tous les 500 m (5000 m pour les tunnels non urbains). Pour un tunnel urbain, si le contrôle du courant d'air est assuré, l'interdistance entre les extractions massives peut être portée à 800 m.

Les extractions massives doivent être dimensionnées afin de pouvoir aspirer la totalité du débit d'air provenant de la direction de l'incendie ainsi que l'air provenant de l'autre direction à la vitesse minimale de 1 m/s et le débit Q_d dû à la dilatation causée par la puissance thermique de l'incendie (voir section 5.3.5). Il peut être nécessaire d'extraire un débit supérieur au débit total ainsi déterminé si le courant d'air n'est pas contrôlé avec une précision suffisante⁶. Le

⁵ Les extractions massives doivent être mécanisées, car de simples transparences aérauliques n'ont pas des surfaces suffisantes pour assurer l'extraction de toutes les fumées.

⁶ Par exemple, pour un tunnel de 60 m² de section autorisé aux poids lourds mais interdit aux transports de marchandises dangereuses, on peut estimer $Q_d = 60 \text{ m}^3/\text{s}$ (voir section 5.3.5). Le débit d'extraction de chaque station d'extraction massive doit être au moins de $60 + 3 \times 60 + 1 \times 60 = 300 \text{ m}^3/\text{s}$. On peut noter que cette valeur est nettement supérieure aux débits nécessaires en ventilation transversale (voir section 2.3.5.e).

principe d'un système à extraction massive est indiqué fig. 2.5⁷.

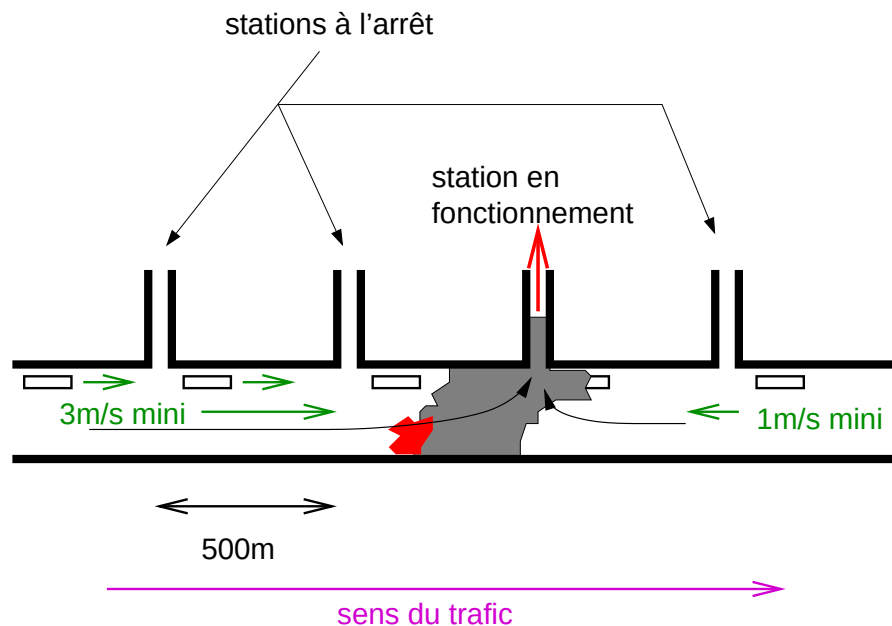


FIG. 2.5 – Principe d'une ventilation longitudinale avec extraction massive.

2.3.5 Stratégie en ventilation transversale

Principes

En ventilation transversale, la stratégie est de préserver la stratification des fumées et de les aspirer au plafond du tunnel en conservant une couche d'air frais sous la couche de fumée. La ventilation transversale peut donc être employée dans des cas où la ventilation longitudinale serait dangereuse, en particulier :

- les tunnels bidirectionnels, où il y a a priori des véhicules bloqués de chaque côté de l'incendie,
- et les tunnels unidirectionnels avec forte congestion fréquente du trafic, pour lesquels les véhicules situés en aval de l'incendie (dans le sens de la circulation) risquent de ne pas pouvoir s'échapper du fait de cette congestion.

Elle ne s'applique cependant pas aux tunnels de gabarit inférieur à 2,70 m.

Comme on l'a vu à la section 2.2.2, pour assurer la stratification des fumées, la vitesse du courant d'air doit être inférieure à une valeur limite de déstratification V_d . Cette vitesse est de l'ordre de 1,5 à 2 m/s pour un incendie de poids lourd. Or en ventilation transversale la vitesse de l'air n'est pas constante le long du tunnel, car on souffle et on extrait de l'air et de la fumée en divers endroits dans le tunnel. Pour garantir une vitesse faible de l'air à proximité de l'incendie, il est donc nécessaire de localiser l'incendie avec précision, puis d'agir sur le système de ventilation pour réduire la vitesse de l'air au droit de l'incendie.

Aspiration des fumées

Pour un débit d'extraction donné, l'extraction est d'autant plus efficace qu'elle sera concentrée au droit de l'incendie, car cela assure de n'aspirer qu'à l'endroit où des fumées sont effectivement présentes et d'éviter leur propagation. Pour des raisons pratiques, on préfère ne

⁷ Une variante de ce système est le système longitudinal avec injecteurs Saccardo et extractions massives couplés, qui peut être utile dans certaines circonstances.

pas concentrer l'extraction sur une seule trappe, et on retient une extraction concentrée sur une longueur de 400 m (tunnels urbains de gabarit supérieur à 3,50 m), 600 m (tunnels non urbains de gabarit supérieur à 3,50 m) ou 200 m (tunnel de gabarit compris entre 2,70 m et 3,5 m).

Pour assurer l'extraction, la disposition recommandée est de mettre en place des trappes d'extraction à ouverture télécommandée. Dans certains cas, on peut avoir recours à des bouches ouvertes en permanence, mais tributaires de cantons de courte longueur (pour un tunnel de gabarit supérieur à 3,50 m, 400 m en urbain et 600 m en non urbain ; pour un tunnel de gabarit compris entre 2,70 m et 3,5 m, 200 m) commandés indépendamment ; on parle encore dans ce cas d'extraction concentrée. En général, les trappes d'extraction télécommandées ont une section de l'ordre de 1 à quelques mètres carrés (cf. fig. 2.6a) et sont espacées de 50 m (tunnels urbains) ou 100 m (tunnels non urbains).

Pour pouvoir faire fonctionner une extraction concentrée, il est nécessaire de disposer en permanence de moyens humains permettant une commande rapide et précise du système retenu. Si ce n'est pas le cas, il faut en général renoncer à concentrer l'extraction au droit de l'incendie. Toutes les bouches d'extraction doivent alors être ouvertes en permanence.

Les bouches ouvertes en permanence peuvent ou bien avoir les mêmes tailles et répartition que les trappes télécommandées, ou bien être nettement plus petites (de l'ordre de $0,2 \text{ m}^2$) mais beaucoup plus nombreuses. Dans le cas des tranchées couvertes, on peut remplacer les trappes télécommandées par des ouvertures en plafond équipées individuellement de ventilateurs.

Dans tous les cas, il faut limiter la vitesse moyenne de l'air aspiré par les bouches ou les trappes à moins de 15 m/s pour éviter une perte d'efficacité de l'extraction de fumées (par le poinçonnement de la couche de fumées chaudes).

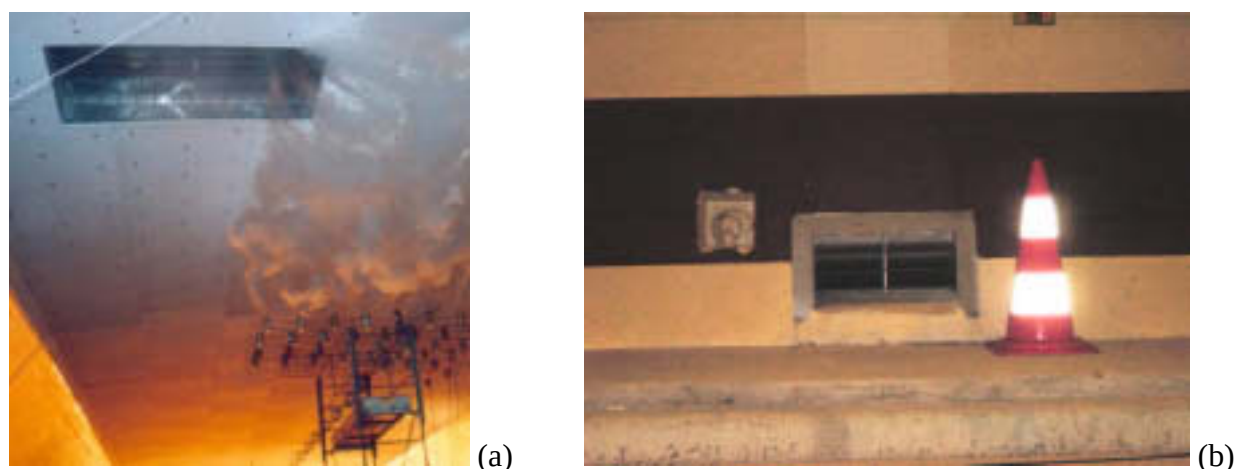


FIG. 2.6 – (a) Photo d'une trappe de désenfumage télécommandée ; (b) photo d'une bouche d'insufflation d'air frais.

Soufflage de l'air frais

En ventilation transversale, on vise à maintenir une couche d'air frais dans tout le tunnel au niveau du sol. L'air frais dans la couche basse peut ou bien arriver des zones du tunnel libres de fumées (on parle d'apport longitudinal d'air frais) ou bien être insufflé par des bouches situées en partie basse du tunnel (on parle d'apport transversal d'air frais). Si les cantons de soufflage d'air frais ont une longueur supérieure à 800 m, il faut ménager la possibilité d'insuffler de l'air frais en partie basse de tunnel en toutes circonstances.

L'insufflation d'air frais dans le tunnel pendant l'incendie est un problème délicat. D'un côté, il faut apporter de l'air frais aux usagers et aux services de secours présents dans le

tunnel, mais d'un autre côté, un soufflage d'air frais trop important a un effet déstabilisant sur la couche de fumées. Par ailleurs, le soufflage d'air frais dans les zones qui ne sont pas envahies par les fumées peut être utilisé pour la maîtrise du courant d'air longitudinal.

On considère en général qu'un débit de 5 à 10 m³/s/km est approprié. Cet air frais doit être insufflé par des bouches réparties (interdistance de 3 à 12 m environ) au niveau des trottoirs (cf. fig. 2.6b) avec une vitesse de jet maximale de l'ordre de 2 à 3 m/s. S'il n'est pas possible d'apporter l'air frais au niveau des trottoirs, il ne faut pas insuffler d'air frais dans la zone envahie par les fumées.

Prescriptions pour le contrôle du courant d'air

On définit V_A la vitesse du courant d'air dans la zone de l'incendie, positive dans le sens du trafic pour les tunnels unidirectionnels et de signe arbitraire pour les tunnels bidirectionnels. Pour le calcul de V_A , il faut prendre en compte l'effet des contre-pressions atmosphériques et de la poussée d'Archimède. Les prescriptions de contrôle du courant d'air portent sur les valeurs limites admises pour V_A . Le tableau 2.7 reprend les prescriptions en matière de contrôle du courant d'air pour les tunnels de gabarit supérieur à 3,50 m. Pour les tunnels bidirectionnels de gabarit compris entre 2,70 m et 3,50 m et ventilés transversalement, le contrôle du courant d'air est obligatoire dans tous les cas.

type de tunnel	contrôle du courant d'air	V_A
urbain unidirectionnel de longueur inférieure à 1500 m de longueur comprise entre 1500 m et 3000 m de longueur supérieure à 3000 m	non obligatoire souhaitable obligatoire	— $0 \leq V_A \leq 2 \text{ m/s (a)}$ $0 \leq V_A \leq 2 \text{ m/s (a)}$
urbain bidirectionnel de longueur inférieure à 1500 m de longueur comprise entre 1500 m et 3000 m de longueur supérieure à 3000 m	non obligatoire souhaitable obligatoire	— $-1,5 \text{ m/s} \leq V_A \leq 1,5 \text{ m/s}$ $-1,5 \text{ m/s} \leq V_A \leq 1,5 \text{ m/s}$
non urbain unidirectionnel de longueur inférieure à 3000 m de longueur supérieure à 3000 m	non obligatoire obligatoire	— $0 \leq V_A$
non urbain bidirectionnel de longueur inférieure à 3000 m de longueur supérieure à 3000 m	non obligatoire obligatoire	— $-1,5 \text{ m/s} \leq V_A \leq 1,5 \text{ m/s}$

TAB. 2.7 – Critères de contrôle du courant d'air en ventilation transversale pour les tunnels de gabarit supérieur à 3,5 m ; (a) 1,5 m/s si possible.

Contrôle du courant d'air et débit d'extraction

En stratégie de désenfumage transversale, on recherche le maintien de la stratification. On a vu que pour un courant d'air supérieur (en valeur absolue) à V_d , cela n'est plus possible. Il faut donc s'assurer que la vitesse de l'air au droit du foyer est inférieure à cette valeur limite. Les effets qui influencent le courant d'air sont multiples : la différence de pression entre les têtes, l'effet cheminée, le pistonnement par les véhicules et les installations de ventilation proprement dites. La différence de pression entre les têtes dépend de la situation météorologique, l'effet cheminée de la position de l'incendie et de la pente du tunnel, et le pistonnement de

la circulation. Les différentes méthodes de contrôle du courant d'air sont présentées dans la section 5.4.3.

Cas de l'extraction concentrée. Quand le courant d'air est contrôlé, le débit d'aspiration des fumées doit être égal au débit des fumées ($80 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un tunnel de gabarit supérieur à 3,50 m) majoré d'un tiers, soit $110 \text{ m}^3/\text{s}$. Pour les tunnels de gabarit compris entre 2,70 et 3,50 m, on retiendra $50 \text{ m}^3/\text{s}$ majoré d'un tiers, soit $70 \text{ m}^3/\text{s}$. Si les trappes ne sont pas situées en plafond mais latéralement, une majoration supplémentaire doit être effectuée (voir section 5.4.2).

Lorsque l'installation de ventilation ne satisfait pas les critères de contrôle du courant d'air, on surdimensionne les débits d'extraction à titre de compensation. Le débit d'extraction doit être au minimum égal au débit de dimensionnement ($80 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un tunnel de gabarit supérieur à 3,50 m – rappelons que le contrôle du courant d'air est obligatoire pour les tunnels ventilés transversalement de gabarit compris entre 2,70 m et 3,50 m) augmenté d'un débit correspondant à une vitesse longitudinale de 1,5 m/s. Par exemple, pour un tunnel de 50 m^2 de section, le débit à extraire sera de $80 + 1,5 \times 50 = 155 \text{ m}^3/\text{s}$.

Cas de l'extraction non concentrée. Lorsque l'ouverture des bouches n'est pas télécommandée et ne permet donc pas une extraction concentrée, il faut disposer de débits d'extraction supérieurs. L'instruction technique [17] impose de disposer sur toute longueur de 400 m en tunnel urbain ou de 600 m en tunnel non urbain du débit qui serait nécessaire pour une installation à extraction concentrée (soit $110 \text{ m}^3/\text{s}$ si le courant d'air longitudinal est contrôlé, et dans le cas contraire le débit de dimensionnement ($80 \text{ m}^3/\text{s}$) augmenté d'un débit correspondant à une vitesse longitudinale de 1,5 m/s).

L'extraction non concentrée est interdite pour les tunnels ventilés transversalement de gabarit compris entre 2,70 m et 3,50 m.

On ne doit avoir recours à l'extraction non concentrée que lorsque le tunnel ne dispose pas de moyens d'exploitation suffisants.

2.4 Résumé des dispositions de ventilation

Les prescriptions des sections précédentes sont résumées dans le tableau de synthèse 2.8. Les mesures compensatoires à envisager le cas échéant ne sont en général pas du ressort de la ventilation. Le système de ventilation doit être choisi en tenant compte de ces prescriptions, voir chapitre 4.

Tunnels urbains unidirectionnels			
longueur	absence de ventil.	ventil. longitudinale	ventil. transversale
300 m < L < 500 m	interdit	possible	possible
500 m < L < 1500 m	interdit	possible (1)	possible
1500 m < L < 3000 m	interdit	possible (1)	possible (2)
3000 m < L	interdit	possible (1)	possible (2')
Tunnels urbains bidirectionnels			
longueur	absence de ventil.	ventil. longitudinale	ventil. transversale
300 m < L < 1500 m	interdit	interdit	possible
1500 m < L < 3000 m	interdit	interdit	possible (2)
3000 m < L	interdit	interdit	possible (2')
Tunnels non urbains unidirectionnels à trafic non faible			
longueur	absence de ventil.	ventil. longitudinale	ventil. transversale
300 m < L < 500 m	possible	possible	possible
500 m < L < 800 m	interdit (3)	recommandé	possible
800 m < L < 3000 m	interdit	recommandé	possible
3000 m < L < 5000 m	interdit	recommandé	possible (2')
5000 m < L	interdit	recommandé (1)	possible (2')
Tunnels non urbains bidirectionnels à trafic non faible			
longueur	absence de ventil.	ventil. longitudinale	ventil. transversale
300 m < L < 500 m	possible	possible	possible
500 m < L < 800 m	interdit (3)	possible (1')	possible
800 m < L < 1000 m	interdit	possible (1')	possible
1000 m < L < 3000 m	interdit	interdit	possible
3000 m < L	interdit	interdit	possible (2')
Tunnels non urbains bidirectionnels à trafic faible			
longueur	absence de ventil.	ventil. longitudinale	ventil. transversale
300 m < L < 1000 m	possible	possible	possible
1000 m < L < 1500 m	interdit	possible	possible
1500 m < L < 3000 m	interdit	interdit (4)	possible
3000 m < L	interdit	interdit (4)	possible (2')

TAB. 2.8 – Tableau de synthèse des dispositions de l'instruction technique annexée à la circulaire 2000-63 pour les tunnels de longueur supérieure à 300 m ; (1) extraction massive ; (1') mesures compensatoires (cf. texte) ; (2) contrôle du courant d'air souhaitable ; (2') contrôle du courant d'air obligatoire ; (3) sauf mesures compensatoires ; (4) sauf s'il n'est pas possible de faire mieux (c'est à dire si le système transversal n'est pas efficace).

Chapitre 3

BESOINS EN VENTILATION SANITAIRE

3.1 *Seuils admissibles de polluants en tunnel*

3.1.1 Introduction

Les gaz d'échappement émis par les véhicules peuvent avoir plusieurs types d'effets pour les personnes présentes en tunnel :

- des effets sur la santé à court et à long terme dus à la toxicité des polluants,
- des effets sur la sécurité liés à la visibilité et à la distance d'arrêt en fonction de la vitesse autorisée,
- des effets sur le stress des usagers, liés à la transparence de l'air et aux odeurs.

Les taux limites de pollution fixés pour la détermination des débits d'air frais et le fonctionnement de la ventilation ne se réfèrent explicitement qu'à la toxicité et à la visibilité. Toutefois, ils incluent des marges par rapport à ce qui serait strictement nécessaire pour respecter ces deux critères afin de tenir compte des effets de synergie avec d'autres polluants non spécifiquement désignés ainsi que de la notion de confort (stress). Les taux de pollution jugés admissibles ont progressivement diminué au fil des années pour faire bénéficier les usagers des réductions d'émission de polluants des nouveaux véhicules et pour aller vers un meilleur niveau de service.

3.1.2 Les différents polluants

Le premier gaz utilisé comme traceur de la toxicité des émissions des véhicules a été le monoxyde de carbone (CO). C'est un polluant facile à contrôler et dont les effets sur la santé sont assez bien connus en particulier pour des durées limitées d'exposition. Du fait de la baisse très importante des émissions de CO depuis la généralisation des pots catalytiques, ce polluant n'est généralement plus dimensionnant. Les oxydes d'azote (NO_x) et parmi eux le plus toxique le dioxyde d'azote (NO_2) apparaissent comme le critère principal de dimensionnement de la ventilation. Les émissions de NO_x (traduites en NO_2) décroissent également du fait des réglementations qui régissent la réception des moteurs neufs, mais moins vite que le CO et surtout elles sont plus élevées pour les moteurs diesel, qui constituent une part importante du parc de véhicules légers français. Pour les fumées, la décroissance est plus récente, mais suit la même tendance.

D'autres polluants réglementés au niveau des émissions ainsi que dans l'environnement, comme les composés organiques volatiles (COV) ou les hydrocarbures (HC) dont le benzène, également les particules fines en suspension (PS ou PM) ne sont pas des critères utilisables

pour la régulation de la ventilation des tunnels. Ils sont contrôlés indirectement, en considérant le monoxyde de carbone, l'opacité et les oxydes d'azote comme traceurs vis à vis de ces autres polluants.

Dans les tunnels, les concentrations admissibles en gaz toxiques sont habituellement mesurées en volume et exprimées en ppm (parties par million). On peut aussi les exprimer en masse par unité de volume. On a la correspondance suivante :

$$\left\{ \begin{array}{lll} \text{monoxyde de carbone} & 10^{-3} \text{ ppm} & \leftrightarrow 1,14 \mu\text{g}/\text{m}^3 \\ \text{monoxyde d'azote} & 10^{-3} \text{ ppm} & \leftrightarrow 1,23 \mu\text{g}/\text{m}^3 \\ \text{dioxyde d'azote} & 10^{-3} \text{ ppm} & \leftrightarrow 1,88 \mu\text{g}/\text{m}^3 \end{array} \right.$$

Ces correspondances sont données pour une température ambiante de 25°C sous une pression totale d'une atmosphère. La grandeur physique utilisée pour caractériser la transparence de l'air (ou l'opacité) est le coefficient d'extinction de la lumière K défini ci-dessous.

Effets toxiques du CO

En présence d'oxygène, le monoxyde de carbone réagit avec l'hémoglobine du sang pour donner la carboxyhémoglobine (HbCO). Les effets sur l'être humain rapportés au taux de HbCO dans le sang, qui dépend à la fois de la concentration et de la durée d'exposition, sont assez bien connus. La figure 3.1, qui ne prend en compte que l'action isolée du CO sur un individu et pour un taux d'activité moyen, illustre ces effets toxiques. La toxicité du CO est une toxicité à court terme non cumulative.

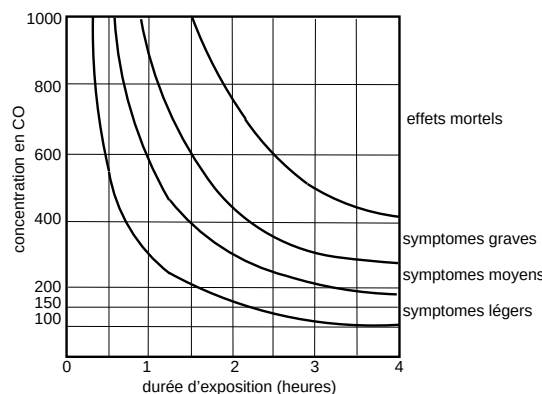


FIG. 3.1 – Effets toxiques du CO pris isolément

Effets des fumées sur la visibilité

Leur présence diminue la transparence de l'air. Cette diminution conduit à une perte de visibilité, qui peut être dangereuse. Le sentiment de confort et de sécurité des usagers (stress) dépend aussi de la présence des fumées.

Le coefficient d'extinction¹ K représente la perte relative de flux lumineux par unité de longueur. Il est défini par la relation :

$$\frac{d\Phi}{\Phi} = -Kd\ell$$

où $d\Phi$ représente la perte d'un flux lumineux Φ traversant le milieu considéré sur une distance $d\ell$. Par intégration, on obtient la valeur Φ du flux initial Φ_0 après traversée du milieu absorbant

¹ aussi appelé coefficient d'absorption optique

sur une longueur L :

$$\Phi = \Phi_0 e^{-KL}, \quad \text{soit} \quad K = -\frac{1}{L} \ln \frac{\Phi}{\Phi_0}.$$

Le coefficient K s'exprime en m^{-1} sur la base des logarithmes népériens. Si on définit $T_L = \Phi/\Phi_0$ le coefficient (ou facteur) de transmission sur la distance L , on obtient $T_L = e^{-KL}$.

La distance de visibilité d est inversement proportionnelle à K , soit $d = C/K$, où C est un coefficient qui dépend des conditions d'éclairement et de l'objet à voir (C vaut en général entre 2 et 6). Le coefficient K est donc un bon indicateur de l'effet des fumées sur l'opacité. Dans les conditions habituelles rencontrées en tunnel, on constate qu'un doublement du coefficient K correspond à un doublement de la concentration en particules de fumée (exprimée en kg/m^3). On en déduit que la stratégie de dilution des polluants est aussi pertinente pour les fumées et que les mesures d'opacité et de masse de particules par m^3 d'air sont équivalentes, avec le facteur de conversion

$$1\text{m}^{-1} \leftrightarrow 0,21\text{g}/\text{m}^3 \text{ PM}_{10}.$$

Le facteur de conversion ci-dessus vaut pour la masse totale de particules (PM_{10}). La conversion entre opacité et PM_{10} (masse des particules de taille inférieure à $10 \mu\text{m}$) est extrêmement complexe, puisqu'elle dépend de la répartition des tailles de particules. Quand toutes les particules sont issues de l'échappement des véhicules, on peut raisonnablement supposer que toutes les particules sont des PM_{10} et donc que le facteur de conversion ci-dessus s'applique. Quand des particules sont mises en suspension par le roulement des véhicules, ce n'est plus le cas. Des mesures menées par le Cetu dans deux tunnels alpins ont montré un facteur de conversion de l'ordre de 1 m^{-1} pour $0,1 \text{ g}/\text{m}^3$ de PM_{10} .

Puisque la concentration en fumée peut s'exprimer en m^{-1} , c'est à dire en m^2/m^3 , on peut considérer qu'une unité pertinente pour la mesure de la quantité d'opacité est le m^2 . Le débit d'opacité (appelé en général 'débit de fumée') émis par un véhicule s'exprime lui en m^2/h ou m^2/s .

Effets toxiques des NO_x

Le terme NO_x désigne l'ensemble constitué par le monoxyde d'azote NO et le dioxyde NO_2 . L'état d'équilibre de ces deux composés dépend d'un grand nombre de paramètres, et en particulier de l'oxydation photochimique du NO , qui est inhibée en tunnel. En général en tunnel, la concentration de NO_2 en volume est égale à un dixième de la concentration en NO_x en volume. Le polluant le plus toxique est le NO_2 . Il est difficile d'évaluer sa toxicité réelle.

Les taux de NO et de NO_2 présents en tunnel sont très inférieurs aux niveaux toxiques à court terme. Seuls les effets à long terme sont pris en compte (cf. section 3.1.3).

3.1.3 Niveaux admissibles en tunnel

Valeurs moyennes et valeurs maximales

En tunnel, on peut définir les niveaux de pollution selon des valeurs ponctuelles et instantanées (en pratique, cela signifie que la résolution temporelle est donnée par l'inertie des appareils de mesure), ou selon des valeurs moyennes en temps ou en espace. Les oxydes d'azote étant nocifs principalement pour leurs effets à long terme, il est logique de considérer leur valeur moyenne sur l'ensemble de l'ouvrage. En revanche, en cas d'accident, il est important de contrôler les niveaux maximaux dans le tunnel de CO et d'opacité, et il est donc logique de considérer les valeurs ponctuelles.

Contexte réglementaire

La seule réglementation pour les niveaux admissibles en tunnel en situation d'exploitation normale est la circulaire 99.329 du 8 juin 1999 (ministère de la santé) qui demande de suivre les recommandations du conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF) rendues le 14 décembre 1998 :

Les critères de qualité de l'air à respecter dans les tunnels routiers et les voiries souterraines fréquentées par les véhicules sont les suivants :

- les indicateurs de pollution à retenir sont le monoxyde de carbone CO et le dioxyde d'azote NO₂ ;
- la teneur moyenne en CO sur toute la longueur de l'ouvrage ne doit pas dépasser les valeurs de 50 ppm sur toute période de 30 minutes et de 90 ppm sur toute période de 15 minutes ;
- la teneur moyenne en NO₂ sur toute la longueur de l'ouvrage ne doit pas dépasser 0,4 ppm sur toute période de 15 minutes.

De plus l'instruction technique [17] prévoit qu'en cas d'accident en tunnel, le taux maximal de CO doit être limité à 150 ppm et l'opacité maximale à 9.10^{-3} m^{-1} en tout point du tunnel et en tout instant.

Valeurs de dimensionnement

Afin d'obtenir les valeurs limites données ci-dessus en exploitation, on se basera sur les valeurs de dimensionnement détaillées ci-dessous, qui sont données pour une situation de trafic établi en valeur horaire. Ces recommandations se basent sur celles éditées par le Cetu dans le passé, et tiennent compte des recommandations du CSHPF.

En situation non-exceptionnelle, le taux de CO ne doit pas dépasser 50 ppm en valeur moyenne sur la longueur du tunnel, le taux de NO₂ ne doit pas dépasser en valeur moyenne sur la longueur du tunnel la valeur donnée dans le tableau 3.1 ci-dessous et l'opacité ne doit pas dépasser 5.10^{-3} m^{-1} en tout point du tunnel. Les seuils pour le NO₂ visent une application progressive de la circulaire 99.329 (ministère de la santé).

En situation exceptionnelle, le taux de CO ne doit pas dépasser 150 ppm en tout point du tunnel et l'opacité ne doit pas dépasser 9.10^{-3} m^{-1} en tout point du tunnel.

année	seuil de dimensionnement pour le NO ₂
2003	0,8 ppm
2005	0,6 ppm
2007	0,5 ppm
2010 et au-delà	0,4 ppm

TAB. 3.1 – *Seuils de dimensionnement pour le NO₂*

On entend par 'conditions de trafic exceptionnelles' des événements extrêmement rares ; par exemple, les situations suivantes sont des conditions de trafic exceptionnelles :

- congestion dans un tunnel en rase campagne quand cette congestion n'est pas susceptible de survenir plus de quelques fois par an ;
- blocage consécutif à un accident.

Les congestions récurrentes en tunnel urbain sont à l'évidence non-exceptionnelles.

Le lien entre concentrations moyennes sur la longueur du tunnel et concentration maximale dépend du système de ventilation et des conditions atmosphériques (voir section 3.3).

3.1.4 Émissions de polluants par les véhicules

La détermination des émissions de polluants par les véhicules est abordée dans la note *Calcul des émissions de polluants des véhicules automobiles en tunnel* [8] éditée par le Cetu en 2002. Elle est brièvement résumée ici sans les données chiffrées. Il est recommandé de se procurer cette note auprès du Cetu pour les données chiffrées et tout détail complémentaire.

Parc automobile

Pour déterminer les quantités de polluants émis par les véhicules circulant en tunnel, il est indispensable de commencer par caractériser la composition du parc. En particulier, la proportion de poids lourds, mais aussi de véhicules légers diesel est à connaître. Mais il faut aussi tenir compte de l'évolution de la réglementation sur les émissions individuelles.

Véhicules légers – Dans la plupart des documents sur le parc automobile, on distingue véhicules particuliers et véhicules utilitaires. Cette distinction n'a que peu d'intérêt pour le calcul des émissions, car l'appellation véhicule utilitaire correspond à la fois à des véhicules semblables aux véhicules particuliers et aux ensembles routiers lourds. Le Cetu recommande donc d'utiliser la distinction entre véhicules légers (VL) et poids lourds (PL). Les véhicules légers rassemblent les véhicules de tourisme et assimilés et les petits fourgons jusqu'à 3,5 t. Les poids lourds rassemblent tous les véhicules de poids total roulant autorisé supérieur à 3,5 t.

L'évolution de la réglementation a été rapide. Il y a 5 phases qui nous concernent dans un futur proche :

- Pré-Euro (ou Euro 0) jusqu'en 1992 ;
- Euro 1 de 1992 à 1996 ;
- Euro 2 de 1996 à 2000 ;
- Euro 3 de 2000 à 2005 ;
- Euro 4 après 2005.

Une étape Euro 5 apparaîtra en 2008, mais sera peu différente de Euro 4. Ces réglementations ont un volet pour les véhicules essence et un volet pour les véhicules diesel. Pour un projet de tunnel, il faudrait donc, à une échéance donnée, connaître la distribution du parc roulant entre chacune des étapes de la réglementation. Malheureusement, seul le parc statique (c'est à dire le parc de véhicules immatriculés) est connu pour les VL. On doit donc se contenter de ce parc statique. Dans la suite, on note α_i la proportion de véhicules Euro i , $i = 0$ à 4. Les valeurs numériques de ces coefficients sont données dans la note [8] pour les véhicules essence et diesel.

Le taux de dieselisation α_{VLD} du parc est aussi un paramètre très important. Il a la particularité d'être beaucoup plus élevé en France que dans la plupart des pays voisins. Il est aussi donné dans la note [8].

Poids lourds – La réglementation des poids lourds suit le même rythme que celle des VL. On retrouve donc les mêmes étapes Euro i . Dans la suite, on note β_i la proportion de véhicules Euro i , $i = 0$ à 4. Dans un objectif de simplification, tous les poids lourds sont supposés être des diesel turbocompressés (l'erreur introduite par cette simplification est faible, car ils représentent effectivement une grande majorité des poids lourds).

Comme ce sont les poids lourds qui émettent la majeure partie des polluants, il est important de connaître avec précision leur parc roulant sur un itinéraire donné. La note [8] propose une distinction entre itinéraires urbains, interurbains et international, avec des données chiffrées pour chacun de ces itinéraires.

Calcul des émissions

Les règlements européens définissent des normes d'émission pour des moteurs montés sur banc d'essai, exprimés en g/kWh sur un cycle qui comprend 13 états stabilisés. Ces valeurs sont très difficilement convertibles en données utiles pour les projets de tunnel, et on se sert en pratique de résultats de programmes de recherche spécifiques (cf. [8] pour plus de détails). Cela permet d'avoir des émissions unitaires exprimées en litres par heure pour diverses vitesses de trafic et rampes de l'itinéraire. Ces émissions sont notées e_i , $i = 0$ à 4. Les valeurs de ces coefficients en fonction de la vitesse des véhicules et de la pente de l'itinéraire se trouvent dans la note [8]. On peut donc calculer les émissions d'un VL moyen e_{VL} :

$$e_{VL} = \sigma_{VL} \left[(1 - a_{VLD}) \sum_{i=0}^4 h_{iE} \cdot \alpha_{iE} \cdot e_{iE} + a_{VLD} \sum_{i=0}^4 h_{iD} \cdot \alpha_{iD} \cdot e_{iD} \right]$$

où σ_{VL} est un coefficient de sécurité (pris en général égal à 1) et h_i est un coefficient correctif fonction de l'altitude. De même, les émissions d'un PL moyen s'écrivent :

$$e_{PL} = h \cdot g \sum_{i=0}^4 \sigma_{PLi} \cdot \beta_i \cdot e_i$$

où σ_{PL} est un coefficient de sécurité (voir [8] pour les valeurs recommandées de σ_{PL}), h est un coefficient correctif fonction de l'altitude et g est un coefficient correctif qui dépend de la masse du PL moyen (elle-même fonction du type d'itinéraire, cf. [8]).

Ces émissions unitaires sont les données de base qui permettent de calculer les débits d'air nécessaires à la ventilation sanitaire des tunnels, comme expliqué dans la section 3.2.2.

3.2 Air frais pour la ventilation sanitaire

3.2.1 La dilution des polluants

La stratégie utilisée pour limiter les niveaux de polluants en tunnel est de les diluer avec de l'air extérieur le moins chargé possible en polluant (dit 'air frais').

En ventilation naturelle ou longitudinale, l'air frais pénètre par l'une des têtes et est rejeté à l'autre. En ventilation transversale, cet air est soufflé par des bouches de soufflage réparties sur toute la longueur du tunnel et aspiré par des bouches d'extraction réparties, et en semi-transversal, il est soufflé par des bouches de soufflage et rejeté aux têtes. Le système qui consisterait à aspirer de l'air du tunnel et à laisser l'air frais entrer par les têtes est déconseillé car il est peu efficace (cf. section 3.3.3).

3.2.2 Calcul des débits d'air frais nécessaires

A partir des émissions unitaires du véhicule moyen e (cf. § 3.1.4), des seuils de polluant à ne pas dépasser c (cf. aussi § 3.1.3) et du nombre n de véhicules par unité de longueur de tunnel, on peut calculer le débit d'air frais Q_{AF} nécessaire à la dilution des polluants par kilomètre de tunnel (c_0 est la concentration en polluant de l'air frais prélevé à l'extérieur du tunnel pour le soufflage) :

$$Q_{AF} = e \frac{n}{c - c_0}.$$

La concentration en polluants de l'air frais, c_0 , doit être estimée. En rase campagne, cette concentration est en général négligeable. En urbain, selon la localisation des prises d'air, on peut utiliser les données du réseau de surveillance de la qualité de l'air de l'agglomération concernée. Typiquement, si les prises d'air ne sont pas directement dans le trafic, on peut retenir les ordres de grandeur suivants : $c_0 \approx 0,05$ ppm pour le NO_2 , $c_0 \approx 0,15 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ pour l'opacité, et $c_0 \approx 2 - 5$ ppm pour le CO. Si l'air frais est prélevé directement dans le trafic, il importe de justifier les valeurs retenues en se servant des valeurs données par les stations du réseau de surveillance de qualité l'air. On peut retenir les ordres de grandeur suivants pour les stations trafic d'AIRPARIF : $c_0 \approx 0,05 - 0,10$ ppm pour le NO_2 , $c_0 \approx 0,3 - 0,4 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ pour l'opacité, et $c_0 \approx 5$ ppm pour le CO.

De plus, si Q_{AF} ainsi calculé est inférieur à 3 ou 4 renouvellements d'air du tunnel par heure, on retient une valeur de l'ordre de 3 ou 4 renouvellements d'air par heure pour le dimensionnement. La raison est que dans ce cas il s'agit d'un tunnel peu pollué, donc avec peu de trafic. Il faut donc une marge sur les débits d'air pour faire face au cas d'émission ponctuelle par un véhicule mal réglé et aux conditions de trafic exceptionnelles.

3.2.3 Le traitement de l'air en tunnel

Le traitement de l'air est une solution souvent évoquée en particulier pour des problèmes d'environnement des rejets de tunnel. C'est en effet une idée séduisante, dans le cadre général de la lutte contre la pollution due au transport, car on peut profiter du fait que les émissions sont canalisées par le tunnel pour envisager de les traiter. La finalité du traitement peut être :

- de limiter le besoin en air frais extérieur tout en conservant une bonne qualité de l'air à l'intérieur du tunnel, grâce au recyclage de cet air ;
- la qualité de l'air à l'extérieur des tunnels (ce point n'est pas traité dans le présent document, il relève du dossier pilote environnement).

On doit distinguer deux types de traitement en fonction de la nature des polluants :

- la pollution due aux particules en suspension et aux fumées, qui relève de la filtration,
- la pollution gazeuse constituée par les gaz considérés les plus nocifs parmi ceux contenus dans les émissions des véhicules.

La filtration des fumées en tunnel semble bien maîtrisée dans certains pays (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, qui connaît des problèmes particuliers de pollution particulaire du fait des pneus à clous qui sont très abrasifs), mais demeure une solution technique lourde et onéreuse à l'installation comme à l'entretien. Elle pourrait permettre de diminuer les débits d'air nécessaires à la dilution dans les tunnels très longs. L'efficacité et la pérennité des dispositifs de traitement des NO_x restent à prouver.

Une analyse détaillée des enjeux et des méthodes est présentée dans la note du Cetu [6].

3.3 Les niveaux de pollution en tunnel selon le système de ventilation

3.3.1 Introduction

On a vu que, selon les cas, il était nécessaire de contrôler des concentrations moyennes de polluants sur la longueur du tunnel ou des concentrations maximales ponctuelles. Il est donc important de savoir comment relier ces deux quantités selon le système de ventilation. Pour des raisons de simplicité de l'exposé, on néglige ici les effets locaux aux têtes, et on suppose que la concentration c_0 des polluants dans l'air frais est nulle. On suppose de plus que l'émission est uniforme le long du tunnel et que l'on est en régime établi.

3.3.2 Ventilation longitudinale

C'est en ventilation longitudinale que cette question est la plus simple à résoudre : étant donné qu'il n'y a ni extraction ni soufflage, l'air rentre propre à l'une des têtes du tunnel et en sort pollué par l'autre tête.

Si e est l'émission d'un certain polluant par véhicule (exprimée en quantité de polluant émise par seconde), n le nombre de véhicules par kilomètre de tunnel, V la vitesse de l'air (en mètres par seconde), S la section du tunnel et x la distance en kilomètre depuis la tête du tunnel par laquelle entre l'air frais, la concentration de polluant C , en quantité de polluant par mètre cube d'air est :

$$C = \frac{exn}{VS}$$

et V est constante le long du tunnel². Ces résultats sont schématisés sur la figure 3.2.

Dans le cas d'un tunnel ventilé longitudinalement, la concentration moyenne est donc égale à la moitié de la concentration maximale.

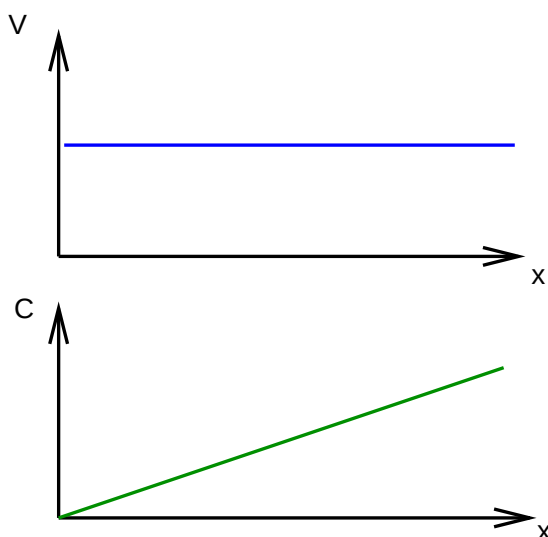


FIG. 3.2 – Évolution de la vitesse de l'air et de la concentration en polluants en fonction de la distance à la tête d'entrée en ventilation longitudinale

² en réalité, à proximité immédiate des têtes (quelques diamètres), la concentration peut être plus faible.

3.3.3 Ventilation semi-transversale

Dans une ventilation semi-transversale, de l'air frais est insufflé par des bouches réparties sur toute la longueur du tunnel, avec un débit insufflé mécaniquement égal à q en mètres cubes par seconde et par kilomètre de tunnel. Il n'y a aucun moyen d'assurer le contrôle du courant d'air longitudinal, et deux cas différents peuvent se présenter, selon les influences des contre-pressions atmosphériques et du pistonnement dû au trafic :

- la vitesse de l'air ne s'inverse pas dans le tunnel, et donc de l'air frais entre par une tête et de l'air pollué ressort par l'autre ;
- la vitesse de l'air s'inverse dans le tunnel, et donc de l'air vicié sort par les deux têtes du tunnel.

Ces deux cas sont analysés ci dessous.

Cas où la vitesse longitudinale de l'air ne s'inverse pas dans le tunnel

En notant V_0 la vitesse de l'air à la tête par laquelle entre l'air, on trouve que la vitesse de l'air et la concentration en polluants évoluent comme indiqué ci dessous :

$$V = V_0 + \frac{qx}{S} \quad , \quad C = \frac{en}{S(V_0 + qx/S)}.$$

Comme on le voit sur la figure 3.3, la concentration tend vers une valeur maximale égale à

$$C_{max} = \frac{en}{q} \quad ,$$

alors que la valeur moyenne, en notant L la longueur du tunnel en kilomètres, vaut :

$$C_{moy} = C_{max} \left(1 - \frac{SV_0}{qL} \ln(1 + qL/(SV_0)) \right),$$

qui est égale à C_{max} si $V_0 = 0$ et inférieure sinon ($\ln$ est le logarithme népérien).

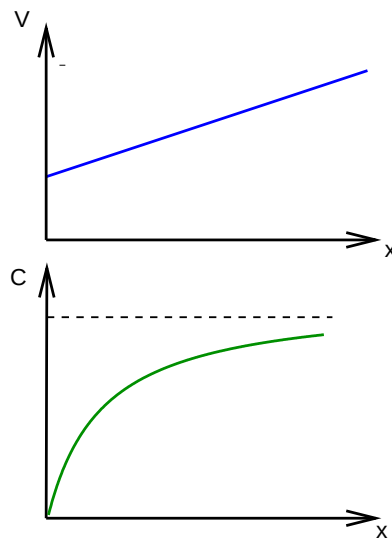


FIG. 3.3 – Évolution de la vitesse de l'air et de la concentration en polluants en fonction de la distance à la tête d'entrée en ventilation semi-transversale (cas où la vitesse ne s'annule pas dans le tunnel).

Cas où la vitesse longitudinale de l'air s'inverse dans le tunnel

On peut raisonner en assimilant le tunnel à deux ouvrages pour lesquels la vitesse à l'entrée est nulle, et il est alors facile de voir, en utilisant les résultats précédents, que la concentration dans le tunnel est constante (voir figure 3.4) :

$$C(x) = C_{max} = C_{moy} = \frac{en}{q} .$$

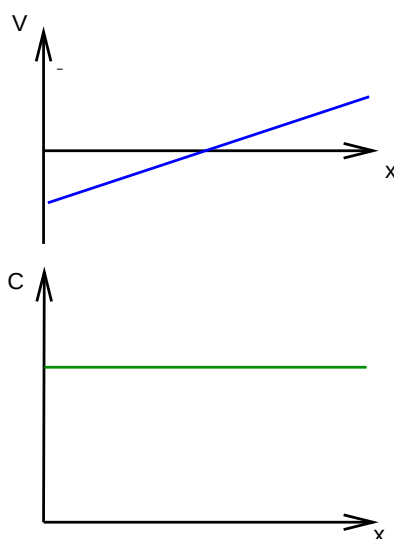


FIG. 3.4 – Évolution de la vitesse de l'air et de la concentration en polluants en fonction de la distance à la tête d'entrée en ventilation semi-transversale (cas où la vitesse s'annule dans le tunnel).

3.3.4 Ventilation transversale

Dans un système transversal pur, les débits d'insufflation d'air frais sont égaux aux débits d'extraction d'air vicié. La vitesse longitudinale de l'air dans le tunnel est donc constante.

Cas où la vitesse longitudinale de l'air est non nulle dans le tunnel

Le calcul de dilution des polluants montre alors que :

$$C = \frac{en}{q} \cdot (1 - e^{-\frac{qx}{SV}}).$$

Ce résultat est illustré figure 3.5. La concentration tend donc vers une valeur limite maximale égale à

$$C_{max} = \frac{en}{q},$$

et la valeur moyenne est :

$$C_{moy} = C_{max} \left[1 - \frac{SV}{qL} \left(1 - e^{-\frac{qL}{SV}} \right) \right].$$

Comme on le voit, l'extraction n'a qu'un effet limité sur la dilution. Son principal rôle est de modifier la vitesse du courant d'air.

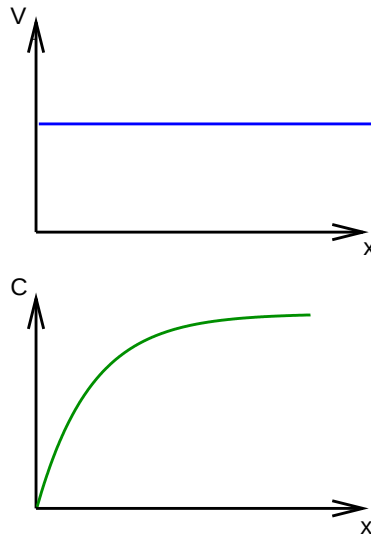


FIG. 3.5 – Évolution de la concentration de polluants en fonction de la distance à la tête d'entrée en ventilation transversale (cas où la vitesse de l'air n'est pas nulle).

Cas où la vitesse longitudinale de l'air est nulle dans le tunnel

Quand la vitesse longitudinale de l'air dans le tunnel est nulle, il est simple de voir que la concentration est constante dans le tunnel, et donc :

$$C(x) = C_{max} = C_{moy} = \frac{en}{q} .$$

Dans ce cas, l'extraction n'a aucun effet sur la dilution, son seul rôle est de limiter le courant d'air.

3.3.5 Autres systèmes de ventilation

Il est possible d'avoir d'autres systèmes de ventilation que ceux détaillés ci-dessus.

Un système employé dans certains pays consiste à se contenter d'extraire l'air vicié sans insuffler d'air frais. Dans un tel tunnel, il peut exister des zones de stagnation de l'air. Un calcul des courbes de pollution de la même façon que ci dessus montre que dans ces zones de stagnation, la concentration en polluant peut atteindre des valeurs très élevées (théoriquement infinies mais limitées par la diffusion). Ce système est donc très déconseillé.

Un autre système consiste en un courant d'air établi par des accélérateurs et des zones ponctuelles d'extraction et soufflage massifs. Cela peut s'interpréter comme une série de tunnels ventilés longitudinalement mis bout à bout mais qui ne peuvent pas être considérés comme indépendants, car un tel système ne peut fonctionner que s'il y a un courant d'air longitudinal entre les tronçons. Pour un tel système, il faut tracer des courbes de concentration prenant en compte ses spécificités afin de s'assurer que les concentrations moyennes et les concentrations maximales restent contrôlés.

3.4 Vitesse de l'air en tunnel

On a vu qu'en longitudinal, la concentration croît avec la distance à la tête. Pour maintenir le niveau de polluant en dessous d'un certain seuil, la vitesse de l'air nécessaire croît donc elle aussi avec la longueur du tunnel. En ventilation semi-transversale, la concentration atteint une valeur limite, mais c'est la vitesse qui croît avec la distance à la tête ou au point de vitesse nulle (appelé point neutre). Dans un tunnel long, la vitesse peut donc atteindre des valeurs élevées.

Pour permettre la présence de piétons en toute sécurité sur la chaussée, et aussi afin de ne pas rendre impossible l'action des systèmes de désenfumage en cas d'incendie, il est nécessaire de limiter la vitesse de l'air en exploitation courante à des valeurs inférieures à 8 m/s en bidirectionnel et 10 m/s en unidirectionnel.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté les besoins en ventilation sanitaire des tunnels. Le moyen le plus efficace de garantir des niveaux de pollution inférieurs aux seuils à respecter est de diluer les polluants avec de l'air frais. Dans les tunnels longs, afin de limiter le courant d'air longitudinal, il est nécessaire d'extraire l'air vicié. Ces deux débits (air frais et air vicié) constituent l'une des deux bases du dimensionnement de la ventilation, l'autre étant les besoins de contrôle des fumées en cas d'incendie, comme expliqué chapitre 2.

Chapitre 4

CHOIX DU SYSTÈME DE VENTILATION

4.1 Introduction

Le choix du système de ventilation adapté à un projet de tunnel donné est fortement contraint par les prescriptions de l'instruction technique [17] (voir chapitre 2), mais il n'est que rarement impérativement imposé (voir tableau 2.8). Le présent chapitre rassemble les éléments de choix du système de ventilation.

4.2 Les critères de choix

Quand un tunnel est suffisamment court, il n'est pas nécessaire de le ventiler. Si un ouvrage est faiblement enterré, la création de zones non couvertes permet parfois de le subdiviser en plusieurs tunnels indépendants qu'il n'est pas nécessaire de ventiler, alors que la longueur totale de l'ouvrage n'aurait pas permis la ventilation naturelle s'il avait été couvert sur toute sa longueur¹.

Des solutions de couvertures partielles sont aussi à envisager lorsque c'est possible. Lorsque la surface d'ouverture d'une couverture partielle dépasse 1 m^2 par voie de circulation et par mètre linéaire, on considère que, du point de vue de la ventilation, l'ouvrage se comporte presque comme un ouvrage à l'air libre, et qu'aucune disposition particulière de ventilation n'est à prendre.

Une fois déterminées les caractéristiques géométriques du tunnel, il convient de commencer par analyser les possibilités laissées par l'application de l'instruction technique [17]. Cela permet de prendre en compte le risque d'incendie et conditionne une grande partie des choix. Le tableau 2.8, page 32, résume les options autorisées selon le type de tunnel et sa longueur. Dans tous les cas sauf les tunnels bidirectionnels urbains, non urbains à trafic non faible de plus de 1000 m, et non urbains à trafic faible de plus de 1500 m, l'instruction technique [17] laisse une latitude de choix pour le système de ventilation.

Après avoir sélectionné les possibilités laissées par l'instruction technique [17], cinq catégories de paramètres aident à choisir les grandes lignes du système de ventilation, et ce dès les études préalables :

- le trafic ;
- l'exploitation ;
- l'environnement ;

¹ Dans le cas d'une succession de tunnels de moins de 300 m de long, on considère en général qu'il sont indépendants sur le plan aéraulique lorsque la longueur non couverte entre deux couvertures est de l'ordre de la centaine de mètres.

- les autres données propres à l’ouvrage ;
- le coût.

Le choix du système de ventilation n’est pas toujours évident, étant donné que les différents paramètres peuvent prendre une importance relative très variable et peuvent éventuellement aboutir à des contradictions.

4.2.1 Trafic empruntant l’itinéraire

Un tunnel placé sur un itinéraire routier a pour fonction de livrer passage aux véhicules, si possible en continuité homogène avec le tracé à l’air libre. Pour les études de ventilation du souterrain, les hypothèses de trafic sont la première base de travail, et leur emploi est indispensable :

- pour le calcul des *besoins sanitaires de renouvellement d’air* en exploitation normale : le débit et la vitesse des véhicules permettent de calculer le nombre de véhicules présents dans l’ouvrage et la quantité totale de polluants émis à diluer par apport d’air frais soit naturel, soit artificiel ;
- pour le calcul de l’effet de *pistonement* des véhicules sur le courant d’air longitudinal ; cet effet est favorable lorsque les véhicules se déplacent plus vite que le courant d’air et induisent une force motrice “gratuite” mise à profit en réduisant d’autant le recours à la ventilation mécanique ; il est défavorable, dans certains cas, quand l’effet de pistonement devient contraire au flux d’air longitudinal souhaité, ou lorsque le trafic est arrêté et crée nécessairement des pertes de charge supplémentaires à l’écoulement de l’air dans le tube ;
- pour la définition des dispositions et des conditions de *désenfumage en cas d’incendie* car d’une part la nature uni ou bidirectionnelle du trafic modifie radicalement, comme on l’a vu, le choix du principe de contrôle des fumées et d’autre part le volume de trafic estimé à l’ouverture, ainsi que 10 ans plus tard, permet de classer, vis à vis de la sécurité et des exigences de désenfumage, l’ouvrage dans l’une des trois catégories prévues par l’instruction technique [17] : tunnel urbain, tunnel non urbain à trafic non faible, tunnel non urbain à trafic faible ; enfin, le nombre de véhicules susceptibles d’être bloqués et la longueur de tunnel occupée dépend du trafic existant au moment de l’incendie et des capacités du système d’exploitation à interrompre rapidement la circulation.

4.2.2 Exploitation

Les niveaux de permanence et de surveillance (voir § 5.1.1 de l’instruction technique [17]) conditionne la capacité à ajuster les régimes de ventilation aux événements qui peuvent se produire en tunnel. Par exemple, un système de ventilation nécessitant la localisation précise d’un éventuel incendie ne doit pas être envisagé si le niveau d’exploitation ne permet pas cette localisation. Un système dans lequel le mode de ventilation en cas de fort niveau de pollution est très différent du mode de désenfumage en cas d’incendie (en particulier un système longitudinal pour un tunnel bidirectionnel) doit être évité quand le niveau d’exploitation est insuffisant, sauf mesures compensatoires (de type détection incendie).

De plus, certains systèmes (notamment ceux qui sont très automatisés) sont plus faciles que d’autres à mettre en oeuvre en cas d’incendie. Cela limite les risques d’erreur humaine et engage donc moins la responsabilité de l’opérateur quand un incendie survient. En revanche, la maintenance de ces systèmes est en général plus complexe, ce qui engage d’autant la responsabilité de l’entité chargée de la maintenance.

4.2.3 Environnement

Des problèmes particuliers peuvent se poser en termes de rejet par les têtes ou les stations de ventilation. Par exemple, si un point sensible se trouve à proximité immédiate d'une tête, il peut être nécessaire d'installer une extraction d'air vicié afin d'éviter le rejet sur ce point sensible. Des éléments supplémentaires sur ce point sont donnés dans le dossier pilote des tunnels, section environnement [1].

4.2.4 Autres données propres à l'ouvrage

Les autres données devant conduire à un choix judicieux du système de ventilation sont propres à l'ouvrage, à savoir :

- les contraintes architecturales et urbanistiques qui parfois rendent très difficile la mise en place de bossages pour les accélérateurs, de stations d'extraction ou de gaines sur toute la longueur de l'ouvrage (cas des tranchées couvertes) ;
- les conditions géométriques particulières, par exemple la présence d'échangeurs dans l'ouvrage ;
- les niveaux des autres équipements de sécurité ; cela correspond à ce que l'instruction technique [17] appelle les 'mesures compensatoires', cf. tableau 2.8 ;
- le phasage envisagé dans le cas d'un tunnel bitube ;
- le profil en travers possible suivant le mode de construction (espace disponible sous chaussée, plafond en voûte, etc ...) ;
- les contraintes géologiques et géotechniques pour l'implantation éventuelle de stations de ventilation souterraines, puits ou galeries de transit.

D'autres données peuvent être utiles dans certains cas particuliers.

4.2.5 Coûts

Suivant le système retenu, l'incidence de la ventilation est plus ou moins importante sur les coûts d'investissement et d'exploitation. À titre indicatif, du point de vue des investissements, l'incidence globale de la ventilation (y compris sur le génie civil) est en général de 5 à 10 % du coût total de l'ouvrage en ventilation longitudinale et jusqu'à 30 % du coût total de l'ouvrage en ventilation transversale. En tout état de cause, une étude spécifique des coûts globaux est en général nécessaire pour choisir une solution.

Sur des itinéraires interurbains, pour lesquels le trafic croît en général avec le temps, il peut être envisagé d'adapter au fur et à mesure la ventilation au niveau de trafic. Les économies à attendre d'une telle démarche ne sont pas si importantes que l'on pourrait le croire. En effet, il est important de prendre en compte dès la première phase la mise en place ultérieure de la seconde, afin de minimiser les perturbations. Le génie civil intérieur de l'ouvrage, par exemple, est en général exécuté une fois pour toutes. En tout état de cause, un tel phasage, s'il est adopté, doit être l'objet d'une étude approfondie dès la première phase du projet.

Le mode de circulation (unidirectionnel ou bidirectionnel) définit pour la ventilation sanitaire deux classes d'ouvrages bien distinctes en raison de l'influence très différente de l'effet du pistonnement des véhicules (cumulatif dans un cas, contraire dans l'autre) sur l'écoulement naturel de l'air. Les tubes unidirectionnels bénéficient d'une ventilation naturelle en situation normale d'exploitation plus active, quand le trafic n'est pas congestionné, et donc les coûts de mise en oeuvre de la ventilation (consommation électrique) sont moindres. On aura donc intérêt, pour les tunnels unidirectionnels, à rechercher un système de ventilation qui utilise cette circulation naturelle de l'air en situation de trafic non congestionné.

4.3 Avantages et inconvénients des systèmes de ventilation usuels

4.3.1 Ventilation naturelle

La ventilation naturelle ne nécessite pas d'équipements spécifiques et a donc un coût d'investissement et d'exploitation nul. Elle n'est applicable qu'aux tunnels courts, car elle ne permet pas d'assurer la sécurité des usagers ni la dilution des polluants à partir d'une certaine longueur de tunnel.

4.3.2 Ventilation longitudinale

La ventilation longitudinale, dans le cas des tunnels de forme voûtée, a en général une incidence faible sur les coûts d'investissement, car il suffit de suspendre des accélérateurs sous la voûte. En revanche, pour les tunnels à section rectangulaire, elle peut rendre nécessaire un sur-gabarit qui peut être très pénalisant dans certains cas, en particulier pour les tranchées couvertes.

Pour un tunnel unidirectionnel, elle permet d'utiliser le pistonnement de l'air par les véhicules pour la dilution des polluants, et en général conduit donc à un coût de fonctionnement faible. Pour un tunnel bidirectionnel, cet avantage disparaît. La ventilation longitudinale peut alors avoir à lutter contre un pistonnement adverse si elle est actionnée dans une direction qui n'est pas celle du pistonnement moyen, ce qui conduit à une forte sur-consommation d'énergie.

En cas d'incendie, comme on l'a vu au chapitre 2, elle est surtout pertinente pour les tunnels unidirectionnels et son champ d'application est limité par la longueur des tunnels.

4.3.3 Ventilation longitudinale avec extractions massives

Les extractions massives permettent de ventiler longitudinalement des tunnels longs. Outre ce qui a été dit ci-dessus sur le système longitudinal, le système longitudinal avec extraction massive nécessite la construction de stations de ventilation en un ou plusieurs endroits le long du tunnel. De plus, la commande des régimes de ventilation en cas d'incendie est délicate (voir § 5.3.5).

4.3.4 Ventilation transversale

La ventilation transversale permet de ventiler des tunnels de toute longueur. Elle nécessite la construction de gaines de ventilation et de stations de ventilation, qui peuvent constituer une part non négligeable du coût du génie civil. Le coût d'exploitation peut être important s'il est nécessaire d'extraire l'air vicié.

4.4 Choix habituellement retenus

Les choix en général les plus pertinents, sauf circonstances particulières, sont résumés ci-dessous. Ces choix prennent en compte la réglementation pour le désenfumage, qui est résumée sur le tableau 2.8, page 32, et les contraintes d'exploitation courante (de type consommation électrique).

4.4.1 Tunnels non urbains à trafic non faible

Ces tunnels doivent être ventilés si leur longueur dépasse 500 m. Entre 500 et 800 m, on peut admettre de ne pas ventiler si l'absence de désenfumage est compensée par le renforcement des aménagements d'évacuation et de protection des usagers tels que prévus au paragraphe 2.2 de l'instruction technique [17].

Tunnels unidirectionnels

le système longitudinal simple (c'est à dire sans extraction massive) est en général le bon choix, sauf si :

- leur longueur dépasse 5000 m ; on retient alors en général un système longitudinal avec extractions massives tous les 5000 m maximum ;
- il n'est pas possible de mettre en place des accélérateurs pour des raisons de gabarit ; on retient alors un système transversal ;
- les contraintes environnementales à la tête de sortie interdisent de rejeter l'air pollué par cette tête en exploitation courante ; on retient alors de préférence un système longitudinal avec cheminée d'extraction d'air vicié en tête de tunnel ou un système transversal.

Tunnels bidirectionnels

on retient en général un système transversal, sauf si :

- la longueur du tunnel est inférieure à 1000 m et la ventilation n'est pas nécessaire en exploitation normale ; on renforce alors les équipements d'évacuation et de protection des usagers et on installe un système longitudinal commandé par un boîtier de commande manuelle placé aux têtes du tunnel ;
- la longueur est inférieure à 1000 m et la ventilation est nécessaire en exploitation normale ; on renforce alors les équipements d'évacuation et de protection des usagers et on installe un système longitudinal avec arrêt systématique des ventilateurs dès qu'un incendie est repéré (puis commande appropriée aux circonstances par le pupitre ou les services de secours) ; cela peut conduire à mettre en place des dispositifs automatiques de détection incendie lorsque le tunnel n'est pas surveillé, mais un niveau de surveillance suffisant est préférable.

4.4.2 Tunnels non urbains à trafic faible

Ces tunnels sont ventilés si leur longueur dépasse 1000 m.

Le choix dépend fortement du niveau d'exploitation possible. On cherchera des tracés routiers qui permettent d'éviter les passages en tunnel ou de fractionner les longueurs en tunnel. En tout état de cause, la mise en sécurité est basée sur la présence de dispositifs d'évacuation et de protection des usagers. On retient en général pour la ventilation un **système longitudinal avec arrêt des ventilateurs dès qu'un incendie est repéré**. Cela peut conduire à mettre en place des dispositifs automatiques de détection incendie.

4.4.3 Tunnels urbains

Ces tunnels sont ventilés dès que leur longueur dépasse 300 m.

Tunnels unidirectionnels

dans ce cas, il faut raisonner par classes de longueur².

- entre 300 et 500 m : on peut retenir un système longitudinal simple (c'est à dire sans extraction massive et commandé en un seul temps);
- entre 500 et 800 m : deux choix sont possibles : ou bien un système longitudinal sans extraction massive mais avec une exploitation en deux temps en cas d'incendie, ou bien un système longitudinal avec extraction massive tels que chacune des deux zones déterminées par la position du puits d'extraction massive fasse moins de 500 m de long.
- de plus de 800 m : trois choix sont possibles : ou bien un système longitudinal avec des extractions massives séparées de 800 m au maximum et une exploitation en deux temps en cas d'incendie, ou bien un système longitudinal avec des extractions massives séparées de 500 m au maximum, ou bien un système transversal.

Tunnels bidirectionnels

On retient systématiquement un système transversal.

² Dans la liste ci-dessous, on entend par 'mise en oeuvre en deux temps' la mise en oeuvre suivante :

- si le tunnel n'est pas congestionné, la ventilation doit être mise en oeuvre aussitôt que possible après la détection d'un incendie à un régime permettant d'obtenir au moins la valeur de dimensionnement du courant d'air ;
- si le tunnel est congestionné, la ventilation, dans un premier temps après la détection d'un incendie, doit autant que possible maintenir un courant d'air réduit de 1 à 2 m/s dans le sens du trafic (ce qui permet de maintenir une certaine stratification des fumées sous le vent de l'incendie) et dans un second temps, une fois que les usagers ont gagné les issues de secours, doit pouvoir être portée à un régime permettant d'obtenir au moins la valeur de dimensionnement du courant d'air ; dans les cas où les contre-pressions et la pente sont faibles, on admet que le premier temps peut être assuré par un arrêt des ventilateurs (du fait de l'inertie de la masse d'air).

Chapitre 5

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DE LA VENTILATION

5.1 Introduction

Dans le chapitre 2, on a vu les besoins en ventilation pour assurer la sécurité des usagers en cas d'incendie en fonction du système de ventilation, conduisant ou bien à des valeurs de courant d'air à respecter, ou bien à des débits d'insufflation et d'extraction à respecter, ou bien aux deux. Dans le chapitre 3, on a vu les besoins en ventilation sanitaire durant les phases normales d'exploitation, conduisant là aussi ou bien à des valeurs de courant d'air nécessaires ou bien à des débits d'air à insuffler, avec éventuellement des débits d'extraction à mettre en place. Le chapitre 4 a donné des éléments pour choisir le système de ventilation.

Le but du présent chapitre est de dimensionner les équipements qui sont chargés d'assurer ces fonctions. Il porte donc :

- en longitudinal, sur le calcul des poussées nécessaires pour les ventilateurs de jet,
- en transversal, sur le calcul des réseaux d'insufflation et d'extraction.

Avant d'aborder ces points, on commence par rappeler des éléments d'aéraulique.

5.2 Éléments de dimensionnement

5.2.1 Introduction

L'objectif de cette section est de présenter quelques éléments importants pour le dimensionnement des installations de ventilation des tunnels, communs à tous les systèmes de ventilation. Il s'agit essentiellement d'aéraulique. Le lecteur est supposé connaître la notion de perte de charge. Une introduction au dimensionnement des réseaux par la technique des pertes de charge peut être trouvée dans [18] et de nombreux abaques donnant les coefficients de perte de charge dans [16].

5.2.2 Pertes de charge en tunnel

L'air dans un tunnel se déplace en général à une vitesse suffisamment élevée pour que l'écoulement soit turbulent. La méthode de dimensionnement à partir des pertes de charge peut donc s'appliquer. Ces pertes de charges sont des pertes linéaires ou des pertes singulières. De

plus, en cas d'incendie, l'écoulement n'est pas isotherme, et il faut tenir compte de l'expansion de l'air avec la température.

Pertes de charge linéaires

On définit le coefficient de perte de charge linéique λ par :

$$\delta H = \lambda \cdot \frac{\rho W^2}{2} \cdot \frac{\delta \ell}{D_H}$$

où ρ est la masse volumique de l'air, W la vitesse moyenne de l'air, D_H le diamètre hydraulique¹, $\delta \ell$ la longueur de tunnel ou de gaine considérée, et δH la perte de charge sur cette longueur. Le coefficient λ est donné par l'abaque de Moody (cf. [18]) en fonction du nombre de Reynolds et de la rugosité relative. Cela étant, dans un tunnel, la rugosité relative est difficile à évaluer. On retient en général directement pour λ les ordres de grandeur donnés dans le tableau 5.1, qui tiennent compte non seulement de la rugosité de la paroi, mais aussi des pertes de charge supplémentaires apportées par les divers équipements répétitifs (câbles, luminaires, signalisation de police et de sécurité).

type de tunnel	λ
parois en béton	0,02
parois en rocher	0,04

TAB. 5.1 – Ordre de grandeur du coefficient de perte de charge en tunnel λ .

Pertes de charge singulières

Les changements brusques de forme de l'écoulement d'air (entrée du tunnel, sortie, changements de section) ou la présence d'obstacles de grandes dimensions (par exemple, signalisation directionnelle, panneaux à messages variables) conduisent à des pertes de charges singulières. La perte de charge au niveau de cet emplacement singulier s'exprime alors

$$\Delta H = \xi \frac{\rho W^2}{2}$$

où ξ est le coefficient de perte de charge singulière et W la vitesse de l'écoulement à un endroit précisé dans les abaques donnant ξ (cf. [18], [16]). A l'entrée du tunnel, on prend en général ξ_e entre 0,4 et 0,6 (W est la vitesse de l'air dans le tunnel), et en sortie, $\xi_s = 1$ (W est aussi la vitesse de l'air dans le tunnel).

Perte de charge singulière au droit de l'incendie

Quand on considère le cas d'un incendie, il y a une perte de charge singulière supplémentaire due à l'expansion des fumées au droit de l'incendie, qui génère une constriction dans l'écoulement. Cette perte de charge dépend de la puissance thermique de l'incendie, de la forme de la section transversale du tunnel et de nombreux autres facteurs. Elle ne peut être déterminée qu'avec des modèles tridimensionnels. En analysant les résultats de quelques études de ce type réalisées au Cetu, dans lesquelles la vitesse de l'air varie entre 1,5 et 3,5 m/s, on trouve la formule approximative

$$\Delta H_{exp} = c \times \frac{\dot{Q}_a}{W_0 D_H^2}$$

¹ le diamètre hydraulique D_H d'un conduit est défini par $D_H = \frac{4S}{\chi}$ où S est la section droite du conduit et χ le périmètre mouillé.

où $\dot{Q}_a$ est la puissance convective de l'incendie et $c \approx 9 \times 10^{-5}$. Mis sous la forme du coefficient de pertes de charge ξ_{exp} , cela s'écrit :

$$\xi_{exp} = 1,8 \times 10^{-4} \frac{\dot{Q}_a}{\rho_0 W_0^3 D_H^2}.$$

Un exemple d'application est donné dans le tableau 5.2

$\dot{Q}_a$	D_H	W_0	ξ_{exp}	ΔH_{exp}
5,3 MW	4 m	2 m/s	6,3	15 Pa
10 MW	4 m	2,5 m/s	6	25 Pa
20 MW	8,5 m	3 m/s	1,5	10 Pa
130 MW	8,5 m	4 m/s	4	40 Pa

TAB. 5.2 – Exemple de pertes de charge dues à l'expansion des fumées au droit de l'incendie, pour un tunnel à gabarit réduit et un tunnel à gabarit normal, en prenant une puissance convectée $\dot{Q}_a$ égale au 2/3 de la puissance totale.

En ventilation transversale, l'objectif étant le contrôle du courant d'air, on pourra négliger l'effet de pertes de charge dû à l'expansion des fumées, cet effet allant dans le sens d'un meilleur contrôle du courant d'air. En ventilation longitudinale, un raisonnement itératif peut s'avérer nécessaire pour ne pas trop surévaluer cet effet.

5.2.3 Effet cheminée

On appelle 'effet cheminée' l'effet des forces d'Archimède sur les fumées chaudes lorsque le tunnel est en pente. Ces forces ont tendance à faire aller les gaz chauds, plus légers, vers le haut. Cet effet est similaire à celui qui cause le tirage d'une cheminée, d'où son nom. Pour un tronçon de tunnel de longueur $d\ell$ de pente γ (positive en montée, négative en descente), cet effet se traduit par une variation de charge qui peut être une perte ou un gain :

$$dH = \gamma \cdot (\rho_0 - \rho) g d\ell$$

où g est l'accélération de la pesanteur, ρ est la masse volumique du mélange air-fumée dans le tronçon considéré du tunnel, et ρ_0 la masse volumique de l'air à l'altitude du tunnel.

5.2.4 L'entraînement de l'air par les véhicules : le pistonnement

Les véhicules, en roulant, entraînent de l'air dans leur sillage. Cet effet peut se modéliser par une force que le véhicule exerce sur la masse d'air. Cette force est opposée à la traînée aérodynamique du véhicule (qui est la force que la masse d'air exerce sur le véhicule). Pour un véhicule en mouvement à la vitesse U dans de l'air au repos, cette force s'écrit

$$F = \frac{1}{2} C_x \Sigma \rho U^2.$$

où Σ est le maître-couple du véhicule, c'est à dire la section du véhicule projetée sur un plan perpendiculaire à l'écoulement, C_x le coefficient de traînée et ρ la masse volumique de l'air. Pour un tunnel de section S , la variation de charge s'exprime donc :

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{C_x \Sigma}{S} \rho U^2.$$

Enfin, quand la vitesse de l'air dans le tunnel n'est pas nulle, l'effet de ce véhicule peut être une perte ou un gain de charge, sous la forme :

$$\Delta H_{pisto} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_x \Sigma}{S} \rho (U - W) |U - W|.$$

En toute rigueur, le coefficient C_x n'est pas le même pour un véhicule à l'air libre et pour un véhicule en milieu confiné ; il n'est pas le même pour un véhicule isolé et pour un véhicule dans une file de véhicules ; il dépend du signe de $U - W$. En général, on néglige ces effets, et on prend un produit $C_x \Sigma$ moyen, qui prend en compte ces effets mais aussi l'hétérogénéité du parc. On peut retenir $C_x \Sigma = 0,9 \text{ m}^2$ pour les véhicules légers et $C_x \Sigma = 4,5 \text{ m}^2$ pour les poids lourds.

5.2.5 Les contre-pressions atmosphériques

On appelle contre-pression atmosphérique la différence entre les pressions P_1 et P_2 aux deux têtes d'un tunnel (ramenées à une altitude de référence),

$$\Delta P_a = P_1 - P_2.$$

Cette différence de pression est due aux effets météorologiques (voir ci-dessous) et elle varie en permanence. Elle doit donc être considérée comme aléatoire. Son influence sur la valeur et le sens du courant d'air peut être très grande. La contre-pression sera dite adverse si elle s'oppose à l'application de la stratégie de ventilation recherchée (en s'opposant à la création d'un courant d'air en ventilation longitudinale, ou au contraire en empêchant la limitation du courant d'air en ventilation transversale). Il importe d'en prévoir les effets lors du dimensionnement de la ventilation. La détermination des valeurs de contre-pression à prendre en compte doit donner lieu à des études spécifiques, car elles dépendent fortement du tunnel considéré. Les mesures de contre-pression sont délicates et il est illusoire de vouloir faire des estimations très précises.

Une fois le tunnel creusé (mais avant sa mise en exploitation), il est toujours souhaitable de mesurer les contre-pressions réelles. Pour ce faire, on peut ou bien mesurer la pression de part et d'autre d'une porte dans le tunnel (si les contraintes de construction permettent la mise en place d'une porte fermée dans le tunnel) ou bien mesurer la valeur du courant d'air naturel et en déduire la valeur des contre-pressions par un calcul aérodynamique.

Pour le dimensionnement des installations de désenfumage en cas d'incendie, on retient la contre-pression adverse non dépassée pendant 95 % du temps dans le cas des tunnels ventilés transversalement et dans le cas des tunnels ventilés longitudinalement et interdits aux transports de marchandises dangereuses². Pour le contrôle du courant d'air dans les tunnels ventilés transversalement, les contre-pressions adverses sont les contre-pressions fortes, quel que soit leur sens. Les 5 % du temps correspondant à des conditions exceptionnelles doivent donc être répartis entre les deux directions.

Pour la ventilation sanitaire, les contre-pressions ne peuvent gêner la ventilation que dans le cas de tunnels unidirectionnels ventilés longitudinalement quand elles induisent un courant d'air opposé à la direction de la circulation. Dans ce cas, on peut en général retenir la contre-pression adverse non dépassée pendant 95 % du temps, et faire une analyse de sensibilité aux

² Dans le cas des tunnels autorisés aux véhicules transportant des marchandises dangereuses ventilés longitudinalement, la ventilation doit permettre d'assurer un courant d'air de 4 m/s pour la contre-pression adverse non dépassée 90 % du temps, et un courant d'air de 3 m/s pour la contre-pression adverse non dépassée 95 % du temps.

valeurs de contre-pression (par exemple en refaisant le même calcul après avoir ajouté 10 Pa ou 20 Pa aux contre-pressions). En cas de contre-pressions extrêmes, il peut être envisagé pour les tunnels courts de laisser le courant d'air s'inverser pour assurer la dilution de la pollution par ventilation naturelle.

Les pressions aux têtes sont chacune la somme de deux composantes :

- une composante aérodynamique due à l'action locale du vent sur les têtes ;
- une composante barométrique liée aux gradients de pression à grande échelle.

En général, le terme dominant pour les tunnels à faible couverture est le terme aérodynamique, alors que pour les tunnels à forte couverture le terme barométrique l'emporte.

Cas où le terme aérodynamique l'emporte

Dans ce cas, on peut raisonner tête par tête. En notant P_i la surpression (positive ou négative) due au vent sur la tête i , on a :

$$P_i = \frac{1}{2} k_i \rho_0 V_a^2,$$

où $i = 1$ ou 2 , V_a la vitesse du vent à 10 mètres au dessus du sol en un point de référence proche du tunnel (par exemple à l'une des têtes) et k_i le coefficient de pression à la tête i . La valeur absolue de k_i vaut en général entre 0,2 et 1,2, et est plus grande quand la tête est exposée au vent. De plus, k_i est en général positif dans ce cas et négatif dans le cas contraire. On définit alors le coefficient de pression global $k_a = k_1 - k_2$.

Les coefficients k_1 , k_2 et k_a sont difficiles à évaluer (des abaques sont donnés dans le rapport [12], section 4). Ils peuvent être mesurés lors d'une étude sur maquette en fonction de la direction du vent. On profite en général de la maquette réalisée pour l'étude de dispersion de polluants.

En première approximation, on peut retenir :

$$\Delta P_a^{\text{aero}} = \frac{1}{2} \rho_0 V_{//}^2$$

où $V_{//}$ est la projection de la vitesse du vent à la hauteur du tunnel sur l'axe du tunnel. Le vent à la hauteur du tunnel est calculé à partir du vent à 10 m par la formule $U/U_{10} = (z/10)^{1/7}$, où U_{10} est le vent réel à 10 m et U est le vent à la hauteur z (exprimée en mètres) au dessus du sol (typiquement, 2 à 3 mètres). Il est à noter que, suivant que l'espace autour du tunnel est plus ou moins bâti, U_{10} est plus ou moins éloigné de la valeur de référence donnée aux stations météorologiques (qui correspondent au vent à 10 m d'altitude au dessus d'un terrain relativement lisse et dégagé), sans parler de l'effet du relief qui peut induire des différences supplémentaires importantes dans la force et la direction du vent. On utilise en général pour évaluer U_{10} la rose des vents à la station météorologique la plus proche, corrigée par des formules empiriques qui prennent en compte le type de bâti.

Cas où le terme barométrique l'emporte

Le terme barométrique est en général dominant pour les tunnels traversant les grands massifs montagneux. Il peut atteindre des valeurs très importantes (plusieurs centaines de pascals). Il faut le corriger de la différence d'altitude des têtes ³, voir figure 5.1.

³ En effet, la pression est différente à deux altitudes différentes du fait de l'équilibre hydrostatique, mais cela ne suffit pas à mettre en mouvement un écoulement (par exemple, un tuyau ouvert aux deux bouts et incliné dans une baignoire d'eau n'est pas le siège d'un écoulement). Ce sont les *écarts* à cet équilibre hydrostatique qu'il faut considérer. A ce titre, une erreur de 10 mètres sur l'altitude de l'un des points de mesure conduit à une incertitude de l'ordre de 100 Pa sur les contre-pressions quand on calcule l'écart à la situation hydrostatique, et

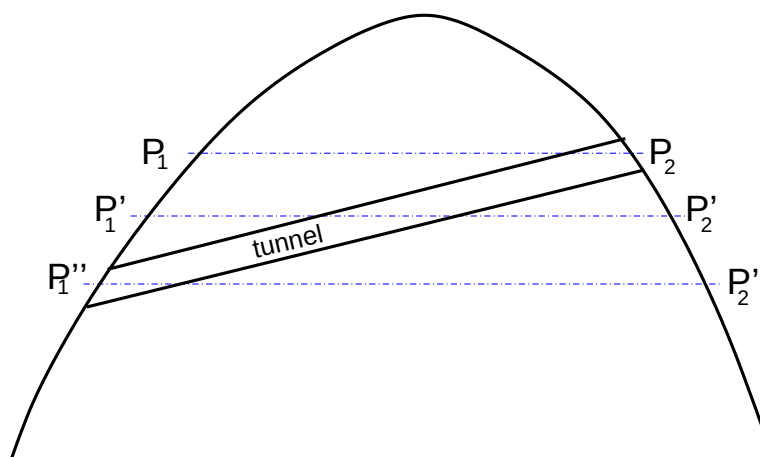


FIG. 5.1 – Principe de prise en compte des pressions barométriques par rapport à une altitude de référence : $\Delta P_a = P_1 - P_2 = P_1' - P_2' = P_1'' - P_2''$

A titre d'ordre de grandeur, pour déterminer la valeur maximale non dépassée pendant 95 % du temps, on peut utiliser la formule :

$$\Delta P_a^{95} \approx 0,4H$$

où P_a^{95} est exprimé en pascals et H est la hauteur en mètres de la barrière barométrique définie comme la hauteur moyenne par rapport à l'altitude du tunnel des lignes de crêtes projetées sur un plan vertical perpendiculaire à la direction du tunnel (voir figure 5.2). Cette formule a été établie empiriquement à partir d'expériences menées sur les tunnels du Fréjus, du Mont-Blanc et du Lioran.

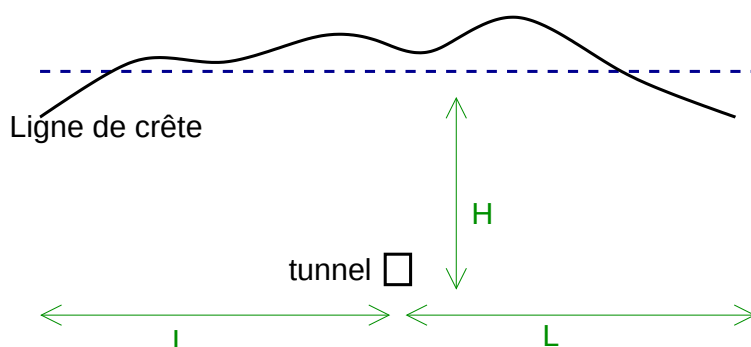


FIG. 5.2 – Méthode pour évaluer le paramètre H ; la figure représente la projection des lignes de crêtes sur un plan perpendiculaire à la direction générale du tunnel, dans une zone de longueur L de part et d'autre du tunnel, où L est la longueur du tunnel ; cette zone de longueur $2L$ est la zone d'influence barométrique pour le tunnel.

cette incertitude est supérieure en général à la grandeur à mesurer. L'altitude de référence doit être proche de l'altitude des têtes, par exemple on peut choisir l'altitude de l'une des deux têtes. Si du côté de la tête 1 on mesure la pression P_1 à l'altitude z_1 et du côté de la tête 2 on mesure la pression P_2 à l'altitude z_2 , et que de plus l'altitude de référence est z_r , on a en première approximation

$$\Delta P_a = [P_1 + \rho_1 g(z_1 - z_r)] - [P_2 + \rho_2 g(z_2 - z_r)]$$

où ρ_1 est la masse volumique de l'air du côté 1 et ρ_2 la masse volumique de l'air du côté 2. La masse volumique de l'air est fonction de la température et de l'humidité, mais pour simplifier on retient en général $\rho_1 = \rho_2$ et on prend la valeur donnée dans la section 5.2.6.

Lorsque l'on s'attend à de fortes valeurs, une estimation plus exacte doit être faite avec des baromètres de haute précision (même avec de tels baromètres, l'incertitude de mesure peut être grande). On peut profiter de telles mesures pour tenter de corrélérer la contre-pression barométrique avec la situation météorologique à l'échelle régionale, ce qui peut permettre d'une part d'utiliser les données de longue durée des stations du réseau synoptique de Météo-France, et d'autre part de prévoir en temps réel les contre-pressions en se servant des résultats des prévisions météorologiques.

5.2.6 Caractéristiques de l'air

Pour le dimensionnement des tunnels, on assimile l'air à un gaz parfait :

$$P = \rho r T$$

où P est la pression thermodynamique, ρ la masse volumique, T la température absolue et r une constante. Pour P exprimé en pascals, ρ en kg/m^3 et T en kelvins, $r = 286 \text{ m}^2/\text{s}^2/\text{K}$.

Afin de prendre en compte la variation de la pression de référence avec l'altitude, le tableau 5.3 donne les caractéristiques retenues pour 'l'atmosphère standard internationale'. Pour des températures différentes, on conserve la valeur de la pression de référence correspondant à l'altitude du projet et on utilise la loi des gaz parfaits pour calculer la masse volumique de l'air en fonction de sa température.

altitude (m)	P_{std} (hPa)	T_{std} (°C)	ρ_{std} (kg/m ³)
0	1013	15,0	1,23
200	989	13,7	1,20
400	966	12,4	1,18
600	943	11,1	1,16
800	921	9,9	1,13
1000	899	8,5	1,11
1200	877	7,2	1,09
1400	856	5,9	1,07
1600	835	4,6	1,05
1800	815	3,3	1,03
2000	794	2,0	1,01

TAB. 5.3 – valeurs de T_{std} , P_{std} et ρ_{std} en fonction de l'altitude pour l'atmosphère standard internationale.

La capacité thermique à pression constante C_p (dite aussi chaleur massique) et la viscosité cinématique moléculaire ν sont données dans le tableau 5.4 pour l'air sec en fonction de la température, sous une pression de 1000 hPa. De la lecture de ce tableau, on voit que l'on peut négliger la variation de la chaleur massique avec la température et prendre par exemple $C_p = 1010 \text{ J/kg/K}$ pour toutes les températures.

5.2.7 Données de trafic nécessaires

Les trafics sont en général donnés en nombre de véhicules par jour ou par heure avec l'indication de la proportion en véhicules légers (VL) et en poids lourds (PL). Ce qui importe pour la ventilation est de connaître le nombre, la vitesse et les caractéristiques des véhicules simultanément présents dans l'ouvrage. On se base sur le trafic horaire en utilisant les paramètres suivants :

T (°C)	C_p (J/kg/K)	v (m ² /s)
0	1006	$1,3 \cdot 10^{-5}$
20	1006	$1,5 \cdot 10^{-5}$
100	1011	$2,3 \cdot 10^{-5}$
200	1025	$3,5 \cdot 10^{-5}$
500	1093	$7,9 \cdot 10^{-5}$
1000	1184	$1,7 \cdot 10^{-4}$

TAB. 5.4 – valeur de C_p et v pour l'air sec en fonction de la température pour une pression de 10^5 Pa.

- trafic horaire par sens : N en véh/h,
- vitesse moyenne des véhicules : V en km/h,
- taux d'occupation : τ en véh/km ($\tau = N/V$),
- proportion du trafic en PL : p en %.

Selon la nature de l'itinéraire, la proportion du trafic en PL est susceptible de beaucoup varier selon le jour de la semaine (par exemple les week-ends) ou de l'heure du jour (par exemple, pointe de trafic VL aux heures de sorties de bureau) et on peut, pour un calcul précis de dimensionnement de la ventilation, tenir compte de cette non simultanéité des afflux de VL et de PL.

En raison de l'encombrement plus important des PL, de leur inertie, et de leur vitesse limitée par rapport aux VL, autant de facteurs conditionnant la capacité débitante des voies d'un tunnel, on introduit communément la notion de trafic équivalent en UVP (unité de voiture particulière), qui tient compte des déclivités. Un VL compte toujours pour 1 UVP. Pour les poids lourds, les équivalences sont données dans le tableau 5.5. Si l'on appelle e le coefficient d'équi-

déclivité en rampe ou en pente	UVP pour 1 PL
inférieure à 2 %	2,5
entre 2 et 3 %	3
entre 3 et 4 %	4
plus de 4 %	5
véhicules à l'arrêt	2

TAB. 5.5 – équivalence du trafic PL en UVP selon la pente.

valence des PL en UVP, on obtient la relation :

$$N(\text{UVP/h}) = N(\text{véh/h}) \times (1 + p(e - 1)/100)$$

La référence aux trafics en UVP/h permet essentiellement d'établir la limite de capacité des voies d'un tunnel en fonction de la vitesse de circulation. En l'absence de restriction éventuelle de capacité liée à une configuration particulière du débouché sur les voiries extérieures (par exemple, présence de feux tricolores, d'un échangeur, de bretelles...), la capacité d'une voie en tunnel à caractéristiques géométriques classiques peut s'établir en première approximation comme indiqué dans le tableau 5.6.

Les valeurs indiquées dans le tableau 5.6 sont des ordres de grandeur suffisants pour des études courantes. Des ajustements peuvent se révéler souhaitables, des différences pouvant être observées selon que le tunnel est urbain ou non, selon la géométrie de l'ouvrage ou les

tube unidirectionnel à deux voies :								
V (km/h)	0	10	20	30	40	50	60	80
N (UVP/h)	0	1100	1300	1650	2000	2100	2000	1300
C (UVP/km)	170	110	65	55	50	42	33	16
tube bidirectionnel à une voie par sens :								
V (km/h)	0	10	20	30	40	50	60	80
N (UVP/h)	0	1100	1100	1100	1250	1250	1200	1000
C (UVP/km)	170	110	55	37	31	25	20	12,5

TAB. 5.6 – Capacité d'une voie de tunnel à caractéristiques géométriques classiques.

déclivités. En particulier, des études récentes sur les voies à l'air libre montrent que les vitesses de saturation tendent à devenir plus élevées.

Les UVP sont utilisées pour déterminer la capacité d'une infrastructure. En revanche, les calculs d'émission en polluants ainsi que les calculs de pression de pistonement ne font pas appel aux UVP mais aux caractéristiques propres de chaque type de véhicules, VL d'une part, et PL d'autre part, en utilisant les données de la composition du parc français, comme expliqué dans le chapitre 3.

Le dimensionnement d'une installation de ventilation doit prendre en compte les situations de circulation les plus défavorables pour la dilution des polluants en s'appuyant sur les valeurs de trafic horaire les plus élevées. Par convention, et en vue de ne pas surdimensionner exagérément la ventilation, on retient en général la valeur de la trentième heure la plus chargée de l'année. Cette valeur correspond en général au pic de trafic des VL, mais à un trafic faible de poids lourds. Il peut être utile de faire un examen séparé du pic de trafic poids lourds.

Selon le stade de l'étude, la connaissance du trafic est variable. On peut rencontrer trois situations :

- l'étude est de niveau préliminaire et le trafic n'est connu que globalement par son TMJA (trafic moyen journalier annuel) : il faut alors, pour définir le trafic horaire de pointe de référence, faire une hypothèse de profil journalier horaire. En fonction du type d'itinéraire, le rapport du TMJA sur le trafic horaire de pointe de référence peut varier de 8 pour un trafic urbain très marqué par les flux des heures de pointe, à 12 pour un trafic interurbain sur grandes distances, voire pour un tunnel urbain très souvent saturé ;
- l'étude est de niveau avant projet et l'on dispose de données de trafic spécifiques basées sur des comptages sur les itinéraires voisins du futur tunnel. Les valeurs de trafic à l'heure de pointe estimées peuvent être directement utilisées ;
- le trafic est connu car le tunnel existe (il peut s'agir d'un renforcement d'une installation pour laquelle on dispose de données de trafic précises et d'une bonne connaissance de son évolution passée, mais ce peut être aussi un cas où de nouveaux trafics seraient induits).

Les calculs sont à faire pour l'horizon d'ouverture de l'ouvrage mais aussi pour plusieurs horizons ultérieurs (+5 ; +10 ; +15 ans par exemple) de manière à en extraire, en fonction de l'évolution prévisible du trafic et des émissions unitaires de polluants, les besoins maximaux en renouvellement d'air.

De plus, une différence très importante est à souligner entre le traitement des tunnels urbains et non-urbains : en urbain, les situations de saturation des voies, de congestion et de blocage en période de pointe doivent être retenues systématiquement, alors qu'en non-urbain, la plupart

des ouvrages présentent une géométrie conçue pour garantir la fluidité du trafic. Dans ce cas, les limites de capacité des voies ne sont en général pas atteintes, mais un calcul en situation accidentelle de trafic bloqué est obligatoirement à intégrer.

Il faut enfin signaler qu'en cas de phasage des travaux de creusement de tunnels bi-tubes unidirectionnels ou de travaux d'entretien dans un tube, l'exploitation prévisionnelle d'un seul tube en bidirectionnel doit faire l'objet d'une étude spéciale des besoins en ventilation. Il faut alors faire des hypothèses sur la répartition du trafic par sens (en général les partages en 1/3-2/3, 1/2-1/2 et 2/3-1/3 sont à étudier) pour en déduire la situation la plus défavorable pour la ventilation. En ventilation longitudinale, le dimensionnement de la poussée nécessaire est très sensible à ces hypothèses.

5.2.8 Nombre de véhicules susceptibles d'être bloqués dans le tunnel

Il est important de prendre en compte l'effet sur l'écoulement de l'air des véhicules bloqués dans le tunnel. Pour le dimensionnement, on fait l'hypothèse que les véhicules s'accumulent derrière l'incendie et continuent à pénétrer dans le tunnel jusqu'à ce que la file remonte à l'entrée du tube ou que l'exploitant interrompe le trafic.

Le dimensionnement est fait en supposant que toutes les voies de circulation sont bloquées par l'incendie.

Pour les tunnels non-urbains, on prend de plus l'hypothèse que les véhicules situés après l'incendie dans le sens de la circulation poursuivent leur route et sortent du tunnel sans difficulté particulière.

Pour les tunnels urbains, l'hypothèse à prendre est à adapter aux particularités de l'itinéraire concerné : la présence de véhicules sous le vent du feu doit être prise en compte si une congestion sévère du trafic ne peut être évitée en raison des caractéristiques de l'itinéraire et de son niveau d'exploitation.

Le nombre de véhicules bloqués au vent de l'incendie est égal à la somme :

- du nombre de véhicules déjà présents dans le tunnel à l'instant où se produit l'incendie ; ce nombre est égal à $N \cdot x / (1000 \cdot V_H)$, où N est le trafic horaire (à l'heure de pointe, en véhicules par heure), V_H est la vitesse des véhicules en km/h et x est l'abscisse de l'incendie en m ;
- du nombre de véhicules qui pénètrent encore dans le tunnel avant que le trafic soit interrompu (soit : $N \cdot t_f / 60$, où t_f est le délai de fermeture du tunnel, en minutes) ou jusqu'à ce que la partie de l'ouvrage au vent de l'incendie soit entièrement occupée.

En tout état de cause, le nombre total est limité à la capacité de stockage de la partie de tunnel située au vent de l'incendie, soit $x \cdot \tau$, où τ est le taux d'occupation du tunnel, en véhicules par mètre linéaire de tunnel.

Selon les hypothèses retenues, en particulier selon l'abscisse de l'incendie par rapport à l'entrée de l'ouvrage, la partie de celui-ci située au vent du foyer pourra donc être, soit totalement remplie de véhicules, soit comporter une zone occupée précédée d'une zone vide (ou le cas échéant comporter des zones avec véhicules bloqués au droit des dispositifs d'arrêt répartis dans le tunnel).

Des interdistances minimales sont imposées entre les véhicules : comme sur toutes les routes, les véhicules doivent respecter une interdistance telle qu'il y ait 2 secondes entre deux véhicules. Cela ne conduit pas à une interdistance minimale entre véhicules à l'arrêt. Dans certains tunnels, une signalisation spécifique prescrit aux usagers de maintenir une certaine distance entre véhicules (100 m par exemple) à l'intérieur du tunnel. On ne peut, notamment en milieu urbain, espérer qu'en cas d'accident ou d'incendie cette mesure soit strictement appliquée par tous les usagers. On peut raisonnablement espérer que le taux d'occupation des voies

τ sera alors sensiblement inférieur à la capacité normale (170 UVP/km). Sauf cas particulier, on retiendra 170 UVP/km en milieu urbain et 120 en non-urbain.

5.2.9 Notion sur le bruit généré par la ventilation

Les moto-ventilateurs utilisés pour la ventilation des tunnels routiers sont des machines puissantes et bruyantes qui nécessitent souvent la mise en oeuvre de dispositifs d'insonorisation spécifiques pour protéger leur environnement.

Le niveau de puissance sonore N_w (en dB) d'un ventilateur (bruit de bouche) est défini par l'équation :

$$N_w = 10 \log_{10} \frac{\mathcal{P}}{\mathcal{P}_0}$$

où $\mathcal{P}$ est la puissance du son intégrée sur tout le spectre et $\mathcal{P}_0$ la puissance de référence ($\mathcal{P}_0 = 10^{-12}$ W). Le niveau de puissance sonore peut être approximé par la formule :

$$N_w \approx 43 + 10 \log_{10} Q + 20 \log_{10} H$$

où Q est le débit volumique passant par le ventilateur (en m³/s) et H la pression totale de la machine (en Pa).

Un ventilateur branché sur un réseau de gaine assez chargé peut émettre un niveau de puissance sonore atteignant 130 dB dans ses conduits.

La mesure de niveau sonore d'une machine peut s'effectuer sur banc d'essai constructeur selon les procédures des normes NF ISO 13350 (X10-203) pour les accélérateurs de jet et NF S 31-021 pour les ventilateurs d'installations de ventilation transversale.

La sensibilité de l'oreille humaine dépend de la fréquence, et le niveau N_w ne traduit pas très bien la sensation ressentie. On utilise donc en général le "niveau dBA", dans lequel des coefficients correctifs sont utilisés pour pondérer les différentes fréquences selon la sensibilité de l'oreille. En pratique, le niveau dBA est toujours inférieur au niveau N_w (la différence est de l'ordre de 5 dB pour les ventilateurs généralement utilisés).

Les problèmes d'acoustique sont à considérer différemment selon qu'il s'agisse d'une ventilation longitudinale avec ventilateurs de jet placés directement en tunnel ou d'une ventilation transversale où les ventilateurs sont placés dans un bâtiment. Les détails propres à chaque type d'installation sont donnés dans les paragraphes 5.3.3 et 5.4.6 respectivement.

5.2.10 Outils de dimensionnement

Dans la très grande majorité des cas, une modélisation unidimensionnelle en régime permanent de l'écoulement est suffisante pour le dimensionnement des installations. Les calculs sont en général suffisamment simples pour être faits sans logiciel spécifique.

En ventilation transversale ou en ventilation longitudinale avec extractions massives, quand il s'agit de s'assurer de la vitesse longitudinale du courant d'air selon les régimes de ventilation des différents cantons pour en déduire le mouvement des fumées, un logiciel monodimensionnel anisotherme (par exemple le logiciel Camatt [9] distribué par le Cetu) est utilisé.

Dans certains cas particuliers, tels que des géométries complexes, il peut être nécessaire de faire des calculs tridimensionnels (modèles de champ). On peut alors utiliser des codes fondés sur la technique des moyennes de Reynolds, de type $k - \varepsilon$ (voir [18]). L'utilisation correcte de tels codes est délicate (voir [10]), et de nombreuses erreurs sont possibles. Il n'est presque

jamais possible de modéliser tout le tunnel, et il faut en général connecter le calcul tridimensionnel avec des zones unidimensionnelles (la plupart des logiciels tridimensionnels commerciaux le permettent par une utilisation de leurs options de conditions aux limites). Les résultats d'un tel calcul doivent toujours être considérés de façon critique et en lien avec l'analyse des résultats de modèles plus simples avant de les utiliser pour la conception de tunnels.

5.3 Conception et dimensionnement d'une ventilation longitudinale

5.3.1 Désenfumage en cas d'incendie

Comme on l'a vu au chapitre 2, en ventilation longitudinale, la stratégie est :

- pour les tunnels unidirectionnels, de pousser les fumées dans le sens de la circulation à une vitesse supérieure à 2 m/s pour les tunnels de gabarit inférieur à 2 m, 2,5 m/s pour les tunnels de gabarit compris entre 2 m et 3,5 m, 3 m/s pour les tunnels de gabarit supérieur à 3,5 m et interdits aux marchandises dangereuses, et 4 m/s pour les tunnels autorisés aux marchandises dangereuses ; le sens du soufflage des ventilateurs doit pouvoir être inversé, mais ce fonctionnement exceptionnel n'est pas à prendre en compte pour le dimensionnement des ventilateurs ;
- pour les tunnels bidirectionnels pour lesquels les services de secours peuvent accéder aux deux têtes dans des conditions de rapidité globalement équivalentes, l'installation doit pouvoir assurer les vitesses de courant d'air indiquées ci-dessus dans la direction où elle est la plus facile à obtenir ;
- pour les tunnels bidirectionnels pour lesquels l'accès des services de secours aux deux têtes n'est pas équivalent, l'installation doit être en mesure d'assurer la vitesse du courant d'air définie ci-dessus dans le sens de l'arrivée des services de secours, ou dans les deux sens s'il y a incertitude sur ce sens.

On rappelle que dans un tunnel bidirectionnel ventilé longitudinalement, il importe de distinguer le régime de ventilation pour l'évacuation des usagers (arrêt des ventilateurs) du régime de ventilation pour la lutte contre le feu (ventilateurs en marche pour assurer la vitesse de courant d'air précisée ci-dessus).

L'objectif fixé pour le dimensionnement de l'installation est donc de pouvoir assurer, dans le cas d'un incendie de puissance thermique donnée, un courant d'air longitudinal dans le tunnel, orienté dans un sens donné ou dans les deux sens, et présentant une vitesse moyenne au vent du foyer suffisante. Quand le calcul est à faire pour les deux sens, il est identique pour les deux sens, seules les données géométriques changent (en particulier la pente).

Pour pousser les fumées, on emploie en général des ventilateurs d'un type particulier, appelés accélérateurs, placés en groupes de deux à six, appelés batteries d'accélérateurs. Les batteries d'accélérateurs sont caractérisées par la poussée en champ libre exercée par chacune d'elles, leur nombre et leur implantation le long du tunnel (cette dernière étant souvent conditionnée par les possibilités d'alimentation électrique des machines). On peut procéder selon deux méthodes :

- par *vérification* d'installations, en s'assurant que la poussée réelle des batteries d'accélérateurs à la vitesse de courant d'air de dimensionnement conduit à un gain de charge supérieur aux pertes de charge pour la même vitesse. On ne calcule pas la vitesse effective du courant d'air avec l'installation choisie.
- par calcul direct de la vitesse de courant d'air à partir des poussées installées.

La première méthode de calcul est plus simple, car la connaissance a priori du courant d'air imposé au vent de l'incendie permet de calculer relativement facilement l'évolution de la température sous le vent de l'incendie, et donc toutes les pertes et gains de charge en tenant compte des autres paramètres (trafic, contre-pression atmosphérique, etc...). Elle est plus pénalisante que la seconde, qui est donc à recommander.

Par ailleurs, compte tenu des vitesses du courant d'air recherchées dans le tunnel et surtout des fortes turbulences engendrées par les accélérateurs, les fumées envahissent toute la section d'un tunnel. Cela étant, même dans ce cas, elles peuvent conserver une certaine stratification thermique. On retient néanmoins un modèle monodimensionnel (1D). En effet, cette stratification est faible et a peu d'effet sur le mouvement de l'air. L'hypothèse monodimensionnelle peut conduire à sous-estimer les températures sous la voûte, mais cela est compensé par l'accumulation d'hypothèses défavorables faites au cours du dimensionnement.

Les pertes de charge de différentes natures et les pressions motrices exercées par les accélérateurs dépendent de la position de l'incendie à l'intérieur du tunnel. C'est la raison pour laquelle différents scénarios doivent être étudiés en faisant varier l'abscisse du foyer, de l'entrée vers la sortie de l'ouvrage.

Dans ce qui suit, les termes amont et aval s'entendent par rapport au sens de l'écoulement de l'air dans le tunnel.

Transferts thermiques et température de l'air

L'évolution de la température de l'air sous le vent de l'incendie dépend des échanges thermiques entre le foyer, les parois du tunnel et l'air. Pour le dimensionnement, comme exposé ci-dessus, on raisonne en monodimensionnel. On commence par calculer la température (en moyenne sur une section droite du tunnel) maximale atteinte au niveau du foyer, puis on prend en compte les échanges de chaleur avec les parois du tunnel pour calculer la décroissance longitudinale de la température.

La puissance thermique du foyer est dissipée par rayonnement direct sur les parois du tunnel et par transfert convectif dans l'air du tunnel. On peut considérer que le transfert radiatif correspond globalement au tiers de la puissance totale de l'incendie $\dot{Q}_{tot}$, et donc que la puissance thermique transférée à l'air $\dot{Q}_a$ vaut : $\dot{Q}_a \approx \frac{2}{3} \dot{Q}_{tot}$. La température moyenne de l'air immédiatement sous le vent du foyer est donc déterminée par l'équation :

$$T_{max} = \frac{\dot{Q}_a}{\rho_0 C_p S W_0} + T_0 \quad ,$$

où ρ_0 est la masse volumique de l'air frais, C_p est la chaleur massique à pression constante de l'air, S est la section du tunnel, T_0 est la température de l'air frais, W_0 est la vitesse de l'air frais (voir section 2.3.3).

La chaleur transportée par le courant d'air est communiquée aux parois du tunnel par convection d'une part, et par le rayonnement des fumées d'autre part.

Le flux de chaleur échangé par convection entre l'air du tunnel et la paroi s'exprime sous la forme⁴ :

$$\phi_c = h_c (T - T_p)$$

⁴ Parmi les expressions disponibles dans la littérature pour exprimer le coefficient d'échange convectif h_c , on retiendra la proposition suivante de Petukhov (cf. Incropera et De Witt [13]) :

$$h_c = \frac{(\lambda/8) C_p \rho W}{1,07 + 12,7(Pr^{2/3} - 1) \sqrt{(\lambda/8)}}$$

où λ le coefficient de perte de charge linéique est défini section 5.2.2 et Pr le nombre de Prandtl est de l'ordre de 0,7. L'expression ci dessus présente l'avantage de prendre en compte non seulement les propriétés thermophy-

Quant aux échanges radiatifs, en assimilant les fumées à un corps noir et en considérant qu'elles remplissent toute la section du tunnel, le flux de chaleur transmis par mètre carré de paroi est donné par l'expression⁵ :

$$\phi_r = \varepsilon \sigma F (T^4 - T_p^4).$$

Cette chaleur est transmise aux parois, qui sont réalisées dans un matériau plus ou moins conducteur de la chaleur. Un calcul exact de la température de l'air ne peut se faire qu'en couplant la conduction dans les parois avec l'équation d'évolution de la température dans l'air du tunnel⁶ :

$$-\frac{1}{4} D_H \rho_0 W_0 C_P \frac{dT}{dx} = h_c (T - T_p) + \varepsilon \sigma F (T^4 - T_p^4),$$

où D_H est le diamètre hydraulique du tunnel et x l'abscisse curviligne (point métrique) le long du tunnel. Un tel calcul ne peut se faire qu'en utilisant des logiciels permettant ce couplage, comme par exemple le logiciel Camatt [9].

Démarche simplifiée pour le calcul de température

En l'absence d'un tel logiciel, on peut utiliser la démarche simplifiée suivante. On utilise le coefficient d'échange thermique apparent h_{app} défini par

$$h_{app} = \frac{\phi_c + \phi_r}{T - T_\infty}$$

où T_∞ est la température dans le massif loin du tunnel. La loi d'évolution de la température s'écrit alors :

$$T = T_\infty + (T_{max} - T_\infty) \cdot e^{-x/x_e} \quad \text{où} \quad x_e = \frac{C_p \rho_0 W_0}{4 h_{app}} \cdot D_H.$$

Dans l'équation ci dessus, x est l'abscisse curviligne comptée à partir de l'incendie, et h_{app} est donnée approximativement par défaut dans le tableau 5.7. Ces valeurs ont été calculées pour un tunnel typique avec des parois en béton sans matériau isolant supplémentaire.

Cette méthode très simplifiée est sécuritive. Elle peut conduire à un surdimensionnement important par rapport aux besoins réels (voir l'exemple donné en annexe A). Il est donc toujours préférable d'utiliser un calcul complet avec un logiciel prenant en compte l'échauffement des parois et l'évolution temporelle réelle de la température pour un système de ventilation donné (de type Camatt[9]) plutôt que d'utiliser la méthode simplifiée présentée dans ce paragraphe.

siques de l'air s'écoulant dans le tunnel, sa vitesse, mais aussi l'état de rugosité des parois via le coefficient de perte de charge linéique. De plus, en négligeant en première approximation la variation du coefficient C_p et du nombre de Prandtl avec la température de l'air, et puisqu'en ventilation longitudinale le débit massique de l'air est constant (en négligeant le débit massique apporté par la combustion du matériau), le coefficient h_c ne dépend que de la vitesse du courant d'air au vent de l'incendie : $h_c \approx 4 \cdot W_0$ pour $\lambda = 0,025$.

⁵ où $\varepsilon \approx 0,8$ est l'émissivité de la paroi, $F \approx 1$ est un facteur de forme et $\sigma = 5,68 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ est la constante de Stefan-Boltzmann. On peut également écrire le flux de chaleur sous la forme :

$$\phi_r = h_r \cdot (T - T_p)$$

avec $h_r = \varepsilon \sigma F (T + T_p)(T^2 + T_p^2)$.

⁶ Cette équation est obtenue en écrivant la conservation de la chaleur dans un élément de tunnel de longueur infinitésimale dx , en remarquant que, du fait de la conservation du débit massique, $\rho W = cste$ et, en supposant que l'air se comporte comme un gaz parfait, $\rho T = cste$.

vitesse du courant d'air	15 min	60 min	120 min
3 m/s	10 W/m ² /K	7 W/m ² /K	6 W/m ² /K
4 m/s	14 W/m ² /K	10 W/m ² /K	7 W/m ² /K

TAB. 5.7 – Valeurs du coefficient d'échange apparent h_{app} selon la vitesse de l'air et l'instant considéré après le début de l'incendie.

Calcul aéraulique

L'effet de la température de l'air sur les pertes de charge du tunnel se traduit par un accroissement linéaire de celles-ci avec la vitesse du courant d'air. En effet, la pression dynamique de l'air est égale à $\frac{1}{2}\rho W^2 = \frac{1}{2}(\rho_0 W_0)W$. Les pertes de charge frictionnelles sont donc d'autant plus élevées que l'incendie se situe à proximité de l'entrée du tunnel. La perte de charge singulière à l'échappement du tunnel est, à l'opposé, d'autant plus élevée que l'incendie est proche de la sortie. On notera qu'il en va de même pour la résistance aéraulique des véhicules bloqués, directement liée au nombre de ces derniers. L'effet de cheminée est, comme les pertes de charge frictionnelles, d'autant plus fort que l'incendie en tunnel est proche de l'entrée.

En résumé, l'expression des pertes et gains de charge est la suivante :

- pertes de charge à l'entrée du tunnel : $\Delta H_e = \xi_e \rho_0 W_0^2 / 2$;
- pertes linéaires pour un tronçon de longueur $d\ell$:

$$dH_f = \lambda \cdot \frac{\rho W^2}{2} \cdot \frac{d\ell}{D_H} = \lambda \cdot \frac{\rho_0 W_0^2}{2} \cdot \frac{d\ell}{D_H} \cdot \frac{T}{T_0}$$

- pertes de charge à la sortie du tunnel : $\Delta H_s = \xi_s \rho W^2 / 2 = \xi_s \rho_0 W_0^2 / 2 \times (T/T_0)$;
- pertes de charge dues à la présence des véhicules bloqués : on retient l'expression du pistonnement donnée à la section 5.2.4, avec une vitesse nulle des véhicules,

$$\Delta H_v = n_v \frac{C_x \Sigma}{S} \cdot \frac{\rho_0 W_0^2}{2} \cdot \frac{T}{T_0}$$

où n_v est le nombre de véhicules bloqués au vent de l'incendie (cf. ci dessus) et les autres notations sont définies à la section 5.2.4 ;

- effet cheminée pour un tronçon de longueur $d\ell$: $dH = (\rho_0 - \rho)gd\ell \cdot \gamma$, où γ est la déclivité du tunnel, positive en montée, négative en descente, cf. section 5.2.2 ;
- différence de pression entre les têtes ΔP_a (cf. section 5.2.5) ;
- pertes de charge par l'effet d'expansion au droit du foyer,

$$\Delta H_{exp} = 9 \times 10^{-5} \times \frac{\dot{Q}_a}{W_0 D_H^2} ;$$

- gain de charge dû à un accélérateur (cf. section 5.3.3) :

$$\Delta H = k \frac{F_0}{S} \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \cdot \left(1 - \frac{W_0}{W_{acc}} \cdot \frac{T}{T_0} \right)$$

Le calcul lui même consiste

- pour la méthode par vérification, à vérifier que, pour la vitesse de l'air de dimensionnement, pour un incendie localisé à n'importe quel endroit dans le tunnel, le gain de charge causé par les accélérateurs est supérieur à la perte de charge due aux autres éléments

présents dans le tunnel. En réalité, si les charges motrices sont supérieures aux pertes de charge, la vitesse de l'air va augmenter, faisant baisser les charges motrices et monter les pertes de charge jusqu'à ce qu'elles soient égales, et si les pertes de charge sont supérieures aux charges motrices, la vitesse va diminuer, rééquilibrant là aussi l'écoulement.

- pour la méthode par calcul de la vitesse, à résoudre le jeu d'équations ci dessus avec W_0 comme inconnue, en général en utilisant un modèle monodimensionnel.

5.3.2 Calcul de la poussée nécessaire pour la ventilation sanitaire

Dans la section 3.2.2, on a vu comment calculer les débits d'air frais nécessaires Q_{AF} . En ventilation longitudinale, tout l'air frais entre par une tête et l'air vicié sort par l'autre tête. Il suffit donc de diviser le débit d'air frais nécessaire par la section du tunnel S pour connaître la vitesse de l'air dans le tunnel W_0 . Une fois cette vitesse connue, un calcul simple de perte de charge similaire à celui présenté la section 5.3.1 mais isotherme permet d'en déduire les caractéristiques nécessaires des ventilateurs. Il faut faire ce calcul pour plusieurs cas de trafic (fluide, lent, congestionné, ...). En effet, en général les besoins en air frais sont supérieurs en circulation fluide mais le pistonnement des véhicules suffit à ventiler le tunnel, alors qu'en situation de trafic lent ou congestionné, les besoins en air frais sont plus faibles mais le mouvement trop lent des véhicules ne permet pas une ventilation naturelle efficace.

5.3.3 Notions sur les accélérateurs

Les accélérateurs (ou ventilateurs de jet) utilisés en tunnel sont des ventilateurs hélicoïdes (cf. section 5.4.6) d'un type particulier. Ils sont utilisés pour la poussée aérodynamique de leur jet. Le jet d'air est parallèle à l'axe de la roue. Quand cela est nécessaire, on leur adjoint des silencieux.

Il existe des accélérateurs parfaitement réversibles, qui ont la même poussée dans un sens ou dans l'autre, mais leur rendement est faible. En revanche, les accélérateurs conçus pour un rendement optimal dans un sens donné ont souvent une poussée nettement plus faible dans le sens opposé (20 à 30 % de la poussée nominale). S'il est nécessaire d'avoir une poussée convenable dans les deux sens, l'étude économique montre parfois que la meilleure solution est d'installer pour chacun des sens de l'écoulement des accélérateurs spécifiques à bon rendement.

Un ventilateur est défini par sa poussée en champ libre F_0 et sa vitesse de soufflage W_{acc} (donnés pour un air à la masse volumique de référence ρ_0). Les valeurs typiques sont données dans le tableau 5.8⁷. La poussée d'un ventilateur dans un écoulement d'air à la vitesse W et à la masse volumique ρ s'écrit :

$$F = kF_0 \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \left(1 - \frac{W}{W_{acc}}\right),$$

où k est un coefficient d'efficacité qui dépend de la distance de l'accélérateur au plafond et des autres caractéristiques de l'implantation du ventilateur. Pour un accélérateur très proche du plafond, k peut valoir de 0,6 à 0,7. Pour une installation assez dégagée, comme par exemple dans un tunnel à profil voûté, k peut valoir de 0,8 à 0,9. Pour une distance entre le ventilateur et le plafond égale à un tiers du diamètre du ventilateur, on retient en général $k = 0,85$. L'effet d'un ventilateur est donc un gain de charge égal à F/S où S est la section du tunnel.

⁷ Sur le plan du rendement énergétique, pour une même poussée en champ libre F_0 , il vaut mieux un ventilateur de grand diamètre et avec une vitesse de jet faible. Cela étant, en situation réelle, il est souhaitable d'avoir une vitesse de jet suffisamment forte pour conserver une poussée convenable quand la vitesse de l'air dans le tunnel est non nulle, et bien sûr le diamètre d'un ventilateur est limité par la place dont on dispose pour l'installer.

poussée F_0	de 500 à 1500 N
vitesse de soufflage W_{acc}	25 à 35 m/s
diamètre de la roue	0,8 à 1,5 m
puissance électrique	0,03 à 0,04 kW/N

TAB. 5.8 – Valeurs numériques typiques pour un ventilateur de jet.

Il faut conserver une certaine distance longitudinale entre deux batteries consécutives ou entre une batterie et un obstacle (par exemple un grand panneau de signalisation) situé dans le jet pour conserver une bonne efficacité des batteries. On peut retenir une interdistance minimale de l'ordre de 10 à 12 diamètres hydrauliques du tunnel (environ 100 m dans le cas général). Pour des distances plus faibles, il faut analyser la perte d'efficacité, que l'on peut parfois compenser par l'inclinaison des jets des accélérateurs.

La régulation de la vitesse longitudinale de l'air frais se fait en mettant en fonctionnement un nombre d'accélérateurs correspondant à la poussée nécessaire.

Le bruit généré par les accélérateurs dans le tube lui-même peut gêner les possibilités de communication des personnes et conduire à une nuisance sonore pour l'environnement des têtes. Il est souvent fait en sorte que le niveau de bruit de la ventilation à plein régime n'excède pas celui du bruit routier qui est généralement supérieur à 90 dBA. Il faut tenir compte que le niveau de bruit d'une batterie de 2 machines est supérieur de 3 dBA à celui d'une seule machine et que la réverbération des parois du tunnel ajoute encore plus de 3 dBA. Cela conduit généralement à prescrire un niveau de pression sonore en champ libre à 5 m et 45° de l'axe d'un accélérateur ne dépassant pas 80 à 83 dBA. Pour des machines classiques, cela nécessite l'équipement des ventilateurs par des silencieux annulaires, amont et aval, de 1 à 2 m de longueur chacun.

Les ventilateurs de jet étant des appareils ancrés dans la voûte des tunnels, il importe de prendre un soin particulier à leur ancrage, aussi bien vis à vis de la corrosion que de la tenue en cas d'incendie. De plus, les accélérateurs doivent pouvoir remplir leur fonction en cas d'incendie. L'instruction technique [17] exige un fonctionnement minimal à la chaleur des équipements :

- le calcul doit prendre en compte la perte des accélérateurs ; ce calcul doit montrer que les accélérateurs non détruits suffisent à assurer le fonctionnement de la ventilation pendant 120 minutes dans les conditions de l'incendie ;
- pour les tunnels de moins de 800 m, la perte des ventilateurs peut être prise en compte de manière forfaitaire en même temps que la diminution d'efficacité des ventilateurs qui fonctionnent dans l'air chaud en majorant la poussée nécessaire de 30 % pour les tunnels de moins de 500 m et de 50 % pour les tunnels de 500 à 800 m ; dans ce cas, les ventilateurs devront être capables de résister à 200°C pendant 120 minutes pour les tunnels sans transports de marchandises dangereuses et 400°C pendant 120 minutes pour les tunnels autorisés aux transports de marchandises dangereuses⁸.

Injecteurs Saccardo. Dans certains cas, on peut envisager d'utiliser d'autres types d'équipements, les injecteurs Saccardo. Ce sont des dispositifs qui injectent dans le tunnel sous forme de jet directionnel de l'air pris à l'extérieur. La poussée d'un tel jet peut s'écrire

$$F = kp_0Q_V(W_{jet} - W)$$

⁸ A défaut de tels matériels, on peut retenir une durée de résistance de 60 minutes à 400°C.

où k est un coefficient d'efficacité, ρ_0 est la masse volumique de l'air pris à l'extérieur, Q_V est le débit volumique de l'injecteur, W_{jet} la vitesse du jet et W la vitesse de l'air dans le tunnel. Typiquement, on trouve les ordres de grandeur suivants : $Q_V \approx 100 \text{ m}^3/\text{s}$, $W_{jet} \approx 30 \text{ m/s}$, et donc $F \approx 3500 \text{ N}$. Le coefficient d'efficacité k varie fortement selon les installations (entre 0,6 et 1,2 selon la littérature), et une étude particulière est donc en général nécessaire.

Ces injecteurs ont l'avantage de ne pas être détruits en cas d'incendie, puisque le ventilateur travaille dans de l'air frais pris à l'extérieur, mais nécessitent des installations volumineuses comparables aux stations de ventilation de la ventilation transversale et sont beaucoup plus complexes que les accélérateurs. En général, on leur préfère l'emploi d'accélérateurs de jet.

5.3.4 Limites de la ventilation longitudinale

Les limites d'application de la ventilation longitudinale sont de plusieurs types. Comme on l'a vu dans le chapitre 2, les conditions de sécurité sont l'une de ces limites. Une autre limite est la dilution des polluants (chapitre 3). En effet, pour assurer la dilution des polluants, la vitesse de l'air nécessaire croît avec la longueur du tunnel, et à partir d'une certaine longueur elle pourrait atteindre des valeurs de l'ordre de 8 m/s en bidirectionnel et de 10 m/s en unidirectionnel, qui ne doivent pas être dépassées (cf. chapitre 3). Du fait de la limitation des longueurs d'application de la ventilation longitudinale par les prescriptions de sécurité incendie (voir tableau 2.8, page 32), ce cas n'arrive pratiquement jamais.

Une autre limitation peut être un problème de gabarit, dans le cas des tunnels à plafond plat, par exemple les tranchées couvertes. La présence de bossages au-dessus d'une tranchée couverte peut être incompatible avec les objectifs d'urbanisme liés à la mise en tranchée de la voie.

5.3.5 Ventilation longitudinale avec extraction massive

La conception des stations d'extraction se fait en utilisant les méthodes employées pour le dimensionnement de la ventilation transversale (section 5.4). Les contraintes de tenue à la chaleur des ventilateurs, trappes, gaines et registres sont identiques à celles de la ventilation transversale.

Un point délicat est le contrôle effectif du courant d'air. L'instruction technique [17] prévoit que les flux d'air doivent converger vers la station d'extraction avec une vitesse ramenée à la température de l'air frais d'au moins $V_1 = 3 \text{ m/s}$ ($V_1 = 4 \text{ m/s}$ pour les tunnels autorisés aux marchandises dangereuses) du côté de l'incendie et d'au moins $V_2 = 1 \text{ m/s}$ de l'autre côté, voir figure 5.3. Il est nécessaire de prendre en compte autant qu'il est possible l'effet de la dilatation de l'air sur les débits massiques extraits par les ventilateurs. Le débit volumique à extraire est donc⁹ :

$$Q_V = V_1 \cdot S + V_2 \cdot S + \frac{\dot{Q}_a}{\rho_0 C_p T_0}$$

où comme précédemment, S est la section du tunnel, $\dot{Q}_a$ la puissance convective de l'incendie, ρ_0 la masse volumique de l'air frais, C_p la chaleur massique de l'air et T_0 la température de l'air frais. Il convient en outre de tenir compte d'une marge de sécurité nécessaire pour pallier

⁹ Dans le cas des tunnels autorisés au transport des marchandises dangereuses, il se peut que cette formule donne des valeurs de débit volumique très importantes, voire impossibles à atteindre selon les contraintes propres du tunnel considéré. Dans ce cas, on pourra limiter les débits extraits, par exemple en retenant un incendie de référence de 100 MW et en adoptant des mesures compensatoires.

les imperfections du mode de contrôle du courant d'air en tunnel. Cette marge doit être déterminée au cas par cas, en tenant compte notamment du refroidissement des fumées dans le puits d'extraction.

Les puits d'extraction participent à la mise en mouvement de l'air dans le tunnel, les accélérateurs jouant un rôle d'équilibrage du courant d'air. Cet équilibrage peut aussi être réalisé par la réversibilité des puits (dont certains fonctionnent alors en insufflation massive d'air frais).

Il faut faire le calcul de dimensionnement pour toutes les abscisses possibles d'incendie. On ne prend pas en compte en général les ventilateurs présents dans le canton où se situe l'incendie pour le calcul de la poussée, car leur maintien en fonctionnement sous l'effet de la chaleur est aléatoire.

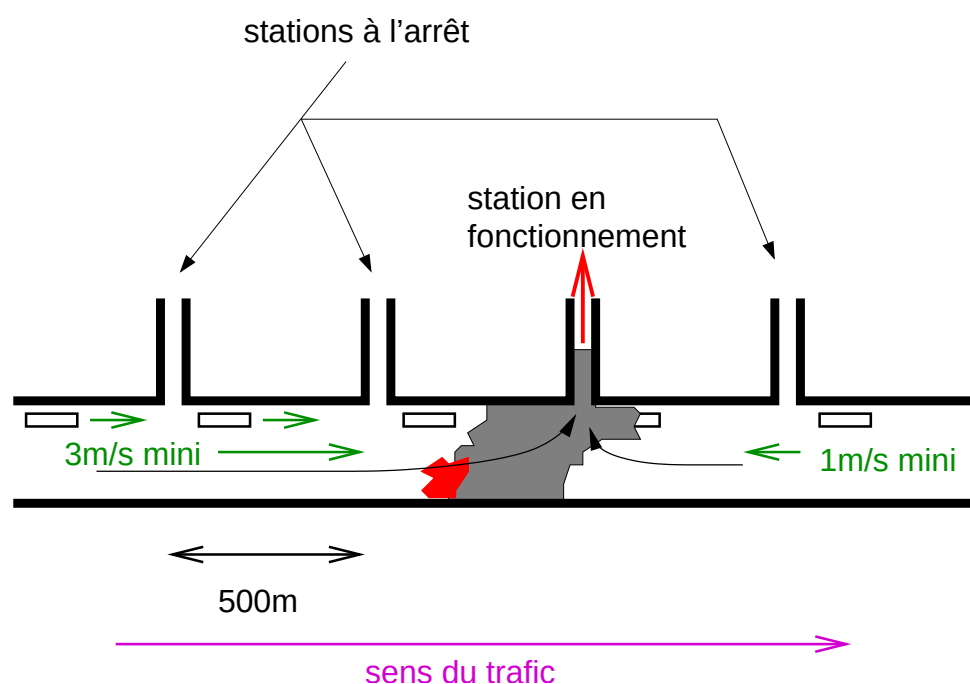


FIG. 5.3 – Schéma des mouvements de l'air avec extraction massive

5.4 Conception et dimensionnement d'une ventilation transversale

5.4.1 Introduction

Comme on l'a vu dans le chapitre 1, la famille des systèmes transversaux peut être subdivisée en sous-types. On retient ici la classification suivante (voir page 9) :

- système semi-transversal : système de ventilation comportant un réseau de soufflage permettant de distribuer de l'air frais sur toute la longueur de l'ouvrage ; il n'y a aucun moyen d'extraction ;
- système semi-transversal réversible : système semi-transversal dans lequel le réseau de soufflage peut, en tout ou partie, être transformé en réseau d'extraction pour le désenfumage par inversion du sens d'écoulement de l'air dans les conduits de ventilation ;
- système transversal : système de ventilation comportant à la fois un réseau d'insufflation d'air frais et un réseau d'extraction d'air vicié ou des fumées d'incendie, que ce réseau soit utilisé en exploitation normale ou pas.

Comme on l'a vu dans les chapitres 1 et 2, le système semi-transversal ne doit pas être utilisé, car il ne permet pas d'extraire les fumées en cas d'incendie, et le système semi-transversal réversible ne doit être envisagé qu'avec prudence, car le temps de réaction est en général trop long.

La classification des systèmes de ventilation par l'AIPCR [11] est différente, car elle repose sur la manière dont est utilisée la ventilation en exploitation normale, alors que dans le cadre du présent dossier pilote, la classification retenue est fondée sur les possibilités du système et non sur son emploi effectif.

5.4.2 Les principaux choix techniques

Une fois que le choix a été fait d'équiper un tunnel d'un système transversal, il y a encore de nombreux choix techniques à effectuer, notamment :

- nombre, emplacement et fonction des stations de ventilation,
- nombre et longueur des cantons de ventilation,
- nombre et emplacement des gaines,
- modalités d'extraction des fumées et de l'air vicié,
- modalités d'insufflation de l'air frais,
- modalités de contrôle du courant d'air,
- etc. . .

Certains de ces choix sont fortement imbriqués avec des considérations de génie civil. Le choix de contrôler ou non le courant d'air en cas d'incendie doit être fait selon les considérations du chapitre 2, et en particulier selon les prescriptions réglementaires résumées dans le tableau 2.7. En tout état de cause, même si on ne maîtrise pas le courant d'air au sens des prescriptions de l'instruction technique, il faut s'efforcer d'aller dans ce sens, autant que raisonnablement possible. Les méthodes possibles pour contrôler le courant d'air sont abordées dans la section 5.4.3.

Nombre, emplacement et fonction des stations de ventilation

Le choix du nombre de stations, ainsi que de leurs emplacements et de leurs fonctions (soufflage d'air frais, extraction en ventilation sanitaire, extraction en cas d'incendie) est réalisé à partir des besoins en ventilation et des contraintes diverses (génie civil, urbanisme, ...). Ce choix est en général déterminant et doit être considéré avec soin puisqu'il peut rendre nécessaires des travaux de génie civil importants (construction de stations enterrées, de gaines de transit d'air, par exemple).

Un choix particulièrement important est l'emploi des stations pour l'extraction en ventilation sanitaire, puisqu'il est doit être annoncé dans le volet air de l'étude d'impact, qui constitue une pièce du dossier d'enquête publique. Revenir sur un tel choix fait à cette étape du projet peut être difficile. Il conditionne de surcroît le besoin en cheminées pour améliorer la dispersion de polluants.

Nombre et longueur des cantons de ventilation

La détermination du nombre et de la longueur des cantons de ventilation dépend essentiellement des contraintes de sécurité incendie et des contraintes limitant le nombre de stations et surtout de gaines de transit d'air, puisque chaque canton doit être desservi par son propre ventilateur.

Si les cantons de soufflage d'air frais font plus de 800 m, il faut ménager la possibilité d'insuffler de l'air frais en partie basse du tunnel en toutes circonstances. Cela impose que les bouches de soufflage d'air frais soient en bas de piédroit.

Si l'extraction se fait par des bouches non télécommandées et que les cantons d'extraction ne dépassent pas 400 m en tunnel urbain et 600 m en rase campagne, on assimile cette méthode d'extraction à une extraction par des trappes télécommandées pour le calcul du débit de fumées à extraire.

Si l'extraction se fait par des trappes télécommandées, il n'y a pas de prescription sur la longueur des cantons. Cependant, des fuites existent toujours au niveau des trappes fermées (voir ci-dessous 'modalités d'extraction des fumées et de l'air vicié'). Il convient de s'assurer que les débits d'extraction sont suffisants en tenant compte de ces fuites. Lorsqu'un canton dépasse 800 m, le débit d'extraction doit être majoré pour tenir compte de ces pertes (en particulier pour tenir compte des fuites qui apparaissent après plusieurs années d'exploitation). On retient en général une majoration de 5 à 10 % du débit total selon la longueur de la gaine équipée de trappes. On doit enfin s'efforcer d'éviter des longueurs de plus de 3000 m entre la première et la dernière trappe télécommandée d'une gaine d'extraction.

Prévoir un nombre suffisant de cantons est une méthode pour assurer le contrôle du courant d'air (voir § 5.4.3). Enfin, selon la longueur des cantons, la puissance électrique nécessaire au système de ventilation en exploitation normale sera différente.

Nombre et emplacement des gaines de ventilation

Selon le nombre de cantons et de stations de ventilation, mais aussi selon les besoins de débits, le nombre de gaines d'insufflation, de gaines d'extraction et de gaines de transit doit être choisi, ainsi que leur répartition dans le profil en travers du tunnel. On se reportera à la figure 5.4 et au dossier pilote 'génie civil lié aux équipements et à l'exploitation' [4] pour les différentes dispositions possibles.

Modalités d'extraction des fumées et de l'air vicié

Le circuit d'extraction sert ou bien uniquement en cas d'incendie, ou bien en cas d'incendie et en exploitation normale. Les considérations liées à l'incendie permettent en général de déterminer le type de trappes à retenir.

Il existe deux dispositifs d'aspiration des fumées : bouches ouvertes en permanence, ou grandes trappes à ouverture télécommandée. Comme indiqué dans [17], lorsque des bouches non télécommandées sont regroupées en cantons commandés indépendamment d'une longueur ne dépassant pas 400 m pour un tunnel urbain et 600 m pour un tunnel non urbain, elles sont assimilées du point de vue de la sécurité à des trappes dont l'ouverture est télécommandée.

Lorsque le tunnel dispose en permanence de moyens humains permettant une commande rapide et précise (degrés de permanence et surveillance D4 et D3, voire D2 dans certains cas, c.f. [17], § 5.1.1.), il est recommandé de réaliser l'extraction des fumées au moyen de trappes en plafond dont l'ouverture est télécommandée. Ce système est en effet le plus efficace s'il est correctement utilisé, car il permet de concentrer l'extraction à proximité du foyer. Les trappes doivent être espacées de 50 m environ dans les tunnels urbains et de 100 m au maximum dans les tunnels non urbains.

Si les conditions d'exploitation ne permettent pas une action rapide et précise en cas d'incendie, il faut généralement renoncer aux trappes télécommandées et utiliser des bouches d'aspiration ouvertes en permanence. Si la gaine sur laquelle sont installées ces bouches est réservée à la seule extraction, celles-ci seront de grande section et espacées de 50 m (tunnel urbain) à 100 m (maximum pour un tunnel non urbain).

Des études ont été menées au Cetu pour déterminer l'influence de la surface, du positionnement (en plafond ou latéralement) et de la forme des trappes télécommandées¹⁰ (voir figure 5.5)

¹⁰ En les supposant rectangulaires, la forme des trappes se réduit à la connaissance des deux paramètres a et b

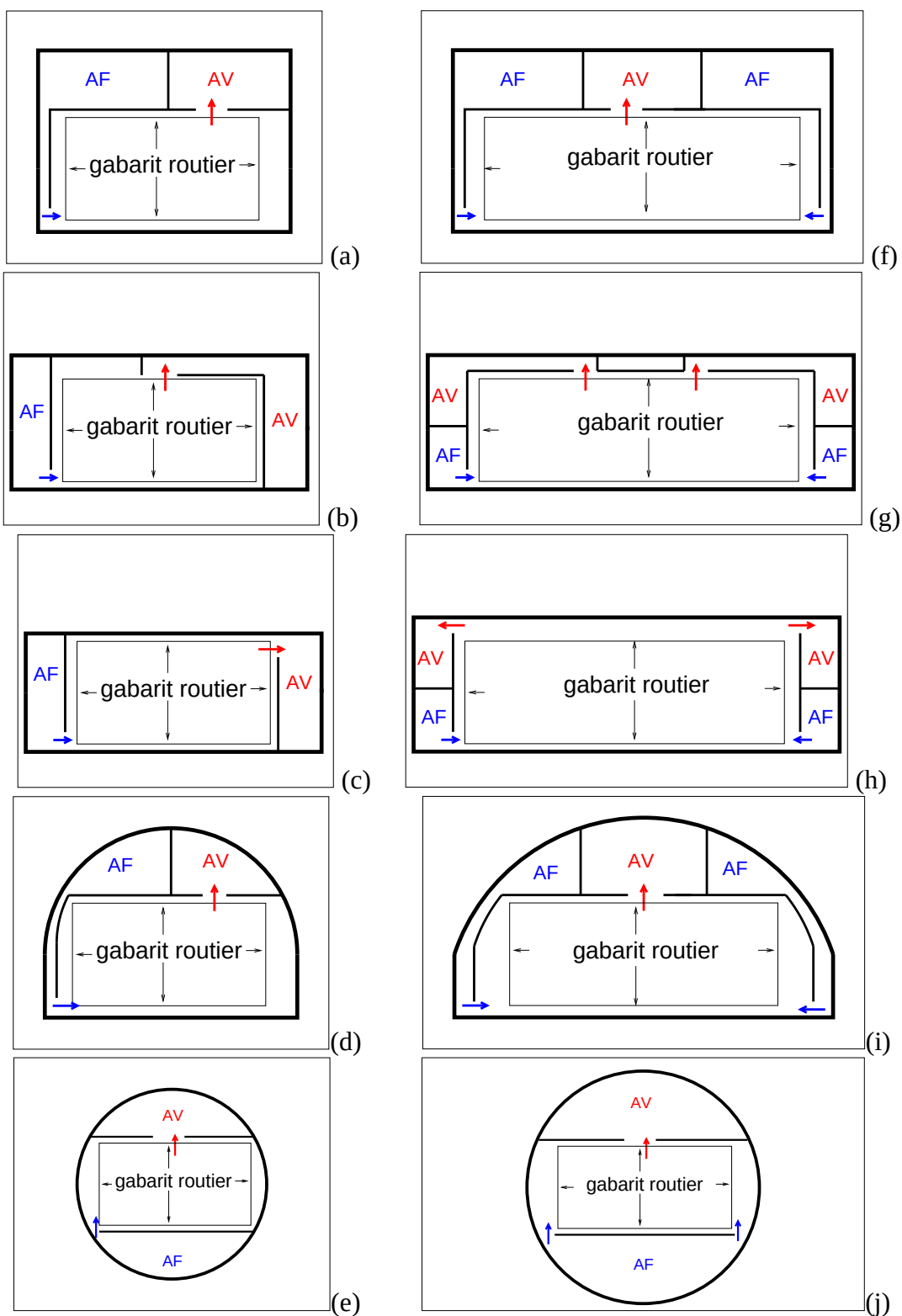


FIG. 5.4 – Schémas classiques pour le nombre et la position des gaines de ventilation : (a) à (e) : tunnels à deux voies ; (f) à (j) : tunnels à trois voies et plus.

sur l'efficacité du désenfumage. Les conclusions de ces études sont que :

- la section doit être choisie pour que la vitesse de l'air au droit des trappes n'excède pas 15 m/s (jusqu'à 20 m/s la perte d'efficacité reste cependant modérée) ; ce choix de vitesse, mis en relation avec le débit total à extraire et le nombre de trappes ouvertes, permet de déterminer la surface de chacune des trappes ;
- pour les trappes en plafond, il faut privilégier les trappes pour lesquelles $a \leq b$ (voir figure 5.5) ;
- pour les trappes situées latéralement, il faut éviter de réaliser des trappes trop hautes, et il faut donc privilégier les cas $a > b$;
- pour atteindre des efficacités en extraction de fumées comparables entre des trappes en plafond et des trappes latérales, le débit extrait par les trappes latérales doit être de 1,5 à 2 fois plus élevé (en fonction notamment de la largeur du tunnel) dans le cadre des cas testés par le Cetu.

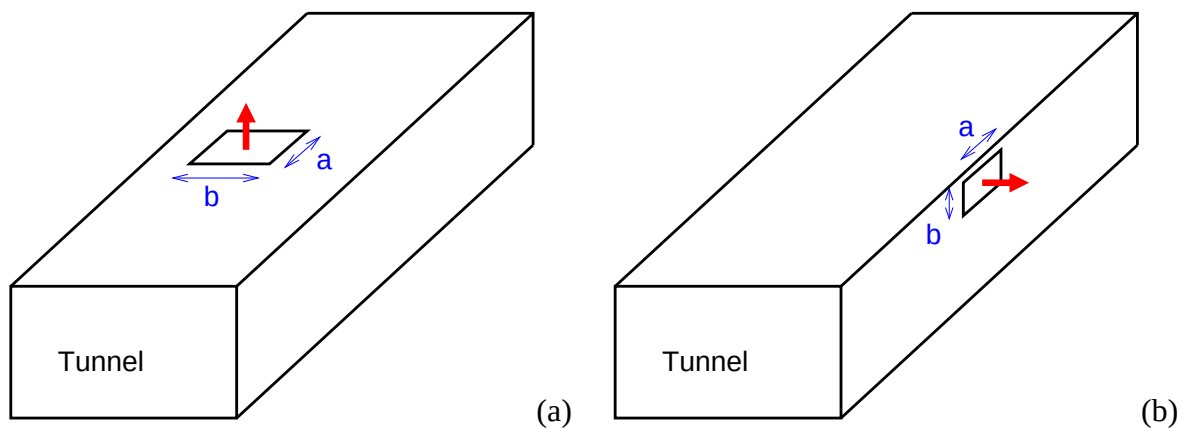


FIG. 5.5 – Schémas pour le positionnement des trappes d'extraction d'air vicié et de fumées ; on note a la longueur des trappes mesurées suivant l'axe du tunnel, b leur seconde dimension.

Il est donc conseillé de disposer les trappes en plafond et non latéralement en haut des piédroit. Dans le cas où l'on dispose les trappes latéralement, la majoration du débit doit donner lieu à des justifications spécifiques.

Chaque trappe doit avoir une résistance aéraulique suffisamment élevée, ce qui rend nécessaire une pression relativement élevée dans la gaine, afin d'assurer une bonne uniformité du débit extrait (voir § 5.4.5).

Enfin, quand il s'agit de trappes télécommandées, il faut s'assurer de leur étanchéité à l'air lorsqu'elles sont fermées. On peut par exemple retenir un ordre de grandeur d'exigence de 100 litres par seconde pour une trappe neuve sous la dépression la plus forte rencontrée dans le projet de tunnel considéré. Après plusieurs années, les fuites dues au vieillissement des trappes ne peuvent qu'augmenter. Il convient donc de prendre soin de l'entretien des trappes. En cas de doute sur le niveau de fuite dans un tunnel en exploitation, il convient de réaliser des mesures aérauliques en gaines pour comparer le débit passant dans la gaine juste après la dernière trappe ouverte avec le débit au niveau des ventilateurs.

Quand le circuit d'extraction est conçu pour servir à l'extraction en exploitation normale et en cas d'incendie, on peut prévoir :

- ou bien de grandes trappes télécommandées que l'on laisse ouvertes (avec un réglage d'ouverture approprié) en exploitation normale ; en cas d'incendie, les trappes qui ne

doivent pas extraire les fumées doivent être fermées et celles qui sont utilisées pour le désenfumage grandes ouvertes ;

- ou bien uniquement de petites trappes non-télécommandées ;
- ou bien à la fois de petites trappes et de grandes trappes télécommandées.

En tout état de cause, la solution retenue pour la situation normale d'exploitation doit être compatible avec ce qui est rendu nécessaire par les considérations de sécurité incendie. La première des trois solutions ci-dessus est en général à recommander.

Modalités d'insufflation d'air frais.

Les bouches de soufflage d'air frais sont des petites bouches réparties sur la longueur du tunnel, environ tous les dix mètres. Elles servent à insuffler l'air frais pour la dilution des polluants en situation normale. En cas d'incendie, le rôle de l'insufflation d'air frais est d'apporter de l'air frais aux personnes (usagers, services de secours) qui pourraient ne pas avoir pu évacuer le tunnel et d'aider au contrôle du courant d'air par le pilotage des cantons qui ne sont pas dans la zone de l'incendie. Dans le canton où est situé l'incendie, il faut veiller à ce que le soufflage d'air frais ne déstratifie pas les fumées.

Si les cantons d'air frais ont une longueur inférieure à 800 m, on estime (voir l'instruction technique [17]) que l'alimentation en air frais est assurée par les cantons voisins, et on n'exige pas un soufflage d'air frais dans ce canton.

En général, l'air frais est apporté par une gaine qui se situe ou bien en plafond, ou bien sous la chaussée ou bien latéralement. Parfois, pour les tranchées couvertes, l'air frais est prélevé directement par une série de petits ventilateurs sur le toit de l'ouvrage.

S'il est nécessaire de souffler de l'air frais dans le canton où se situe l'incendie (que ce soit parce que la canton est de grande longueur ou parce que la gaine doit être mise en surpression car elle sert d'itinéraire d'évacuation, voir § 5.6), ce soufflage doit être modéré (la vitesse de l'air ne doit pas dépasser 2 à 4 m/s) et se faire au niveau du sol avec une vitesse dirigée horizontalement (voir figure 5.6c). Si la gaine est latérale ou sous la chaussée, une communication directe entre la gaine et le tunnel permet en général d'assurer cette fonction. Si la gaine est en plafond, il est nécessaire d'aménager des carneaux qui conduisent l'air de la gaine aux bouches d'insufflation.

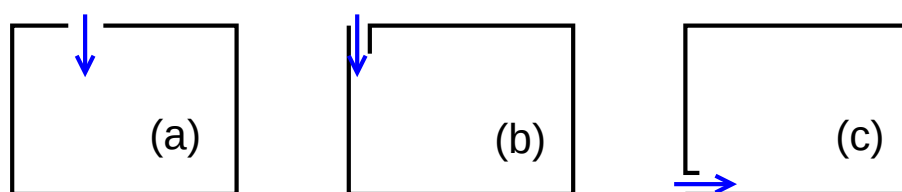


FIG. 5.6 – positionnement des bouches de soufflage ; (a) en plafond ; (b) en jet pariétal ; (c) au niveau du sol.

S'il n'est pas nécessaire de souffler de l'air dans le canton où se situe l'incendie et que la gaine est en plafond, on peut ménager les bouches de soufflage directement en plafond du tunnel. Dans ce cas, il est en général plus efficace pour la dilution des polluants de souffler contre la paroi, réalisant ce que l'on appelle des jets pariétaux (voir figure 5.6).

Dans tous les cas, la vitesse maximale de l'air au travers des bouches de soufflage en régime 100 % doit être de l'ordre de 8 à 10 m/s. Chaque bouche doit être munie d'un dispositif de réglage de débit afin d'assurer une bonne uniformité du débit insufflé par les différentes bouches.

5.4.3 Méthodes de contrôle du courant d'air en cas d'incendie

Le contrôle du courant d'air est un élément primordial du bon fonctionnement de la ventilation transversale en cas d'incendie. En effet, comme on l'a vu au chapitre 2, l'objectif en ventilation transversale est de conserver les fumées stratifiées sous le plafond, et pour ce faire la vitesse du courant d'air doit être inférieure à une certaine valeur V_d . Selon le type de trafic (unidirectionnel ou bidirectionnel, urbain ou non urbain) et la longueur du tunnel, ce contrôle est ou bien non obligatoire, ou bien souhaitable, ou bien obligatoire d'après l'instruction technique [17], comme résumé dans le tableau 2.7.

Le courant d'air en tunnel est principalement affecté par les contre-pressions atmosphériques, les véhicules encore en mouvement, l'effet cheminée si le tunnel est en pente, et le système de ventilation. Les contre-pressions atmosphériques sont aléatoires, et donc pour contrôler le courant d'air, il faut que le dimensionnement des installations soit correct, mais il faut aussi que ces installations soient commandées de manière appropriée.

Les méthodes de contrôle du courant d'air peuvent se ranger en trois catégories, selon les types d'équipements qu'elles requièrent (classées ici selon les types de sur-équipements nécessaires par rapport à une installation traditionnelle) :

- utilisation des cantons de ventilation dans lesquels il n'y a pas d'incendie en extraction ou soufflage,
- utilisation d'équipements de ventilation spécifiques implantés aux têtes,
- utilisation d'équipements de ventilation spécifiques implantés le long du tunnel.

Utilisation des cantons dans lesquels il n'y a pas d'incendie

L'utilisation des cantons de ventilation dans lesquels il n'y a pas d'incendie est une méthode efficace dès que le tunnel a un nombre suffisant de cantons. Pour chaque position d'incendie possible et un certain nombre de niveaux de contre-pressions, il faut, par l'emploi d'un logiciel unidimensionnel, vérifier qu'il est possible de maîtriser le courant d'air par la commande des régimes de ventilation dans les cantons dans lesquels il n'y a pas d'incendie (voir figure 5.7). Pour améliorer l'efficacité de cette méthode, on peut envisager dans certains cas de mettre en place des bouches de soufflage qui ont un jet orienté. Cela permet d'injecter de la quantité de mouvement en plus de la masse, et par conséquent est plus efficace.

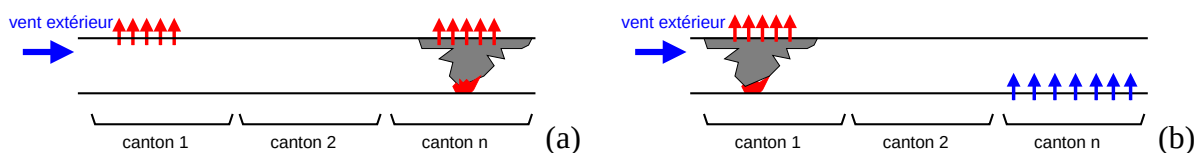


FIG. 5.7 – Exemple de contrôle du courant d'air en utilisant les cantons dans lesquels il n'y a pas d'incendie ; (a) l'incendie est du côté opposé au sens du vent ; (b) l'incendie est du côté du vent.

Cette méthode n'est efficace que pour les tunnels longs qui comportent suffisamment de cantons, à condition que les débits installés soient suffisants.

Équipements de ventilation spécifiques installés en tête de tunnel

L'installation d'équipements de ventilation spécifiques au contrôle du courant d'air est parfois nécessaire. Dans ce cas, l'installation de ces systèmes aux têtes du tunnel est préférable. Ces équipements doivent être conçus pour insuffler de la quantité de mouvement dans le tunnel. L'injection de quantité de mouvement peut se faire ou bien par des accélérateurs ou bien par des injecteurs Saccardo.

L'injection d'une quantité de mouvement F dans le tunnel conduit à une pression motrice égale à

$$\Delta P = \frac{F}{S}$$

où S est la section du tunnel. L'ordre de grandeur des poussées que l'on peut atteindre avec des accélérateurs ou des injecteurs Saccardo est de $F \approx 5\,000$ N par batterie, voire $15\,000$ N pour des injecteurs Saccardo de forte puissance. Pour un tunnel de 50 m^2 de section, cela correspond donc à une pression motrice maximale de l'ordre de 100 Pa, voire jusqu'à 300 Pa. On voit donc que l'injection de quantité de mouvement aux têtes est une solution adaptée pour le contrôle du courant d'air dans la plupart des cas.

Pour empêcher la déstratification des fumées, il faut limiter le niveau de turbulence au droit du foyer. Pour ce faire, on installe à chaque tête une batterie qui souffle vers l'intérieur du tunnel. On met en marche la batterie qui correspond au sens dans lequel il faut pousser. Si l'incendie est entre la tête et la batterie concernée, on laisse sortir les fumées par la tête en question (voir figure 5.8).

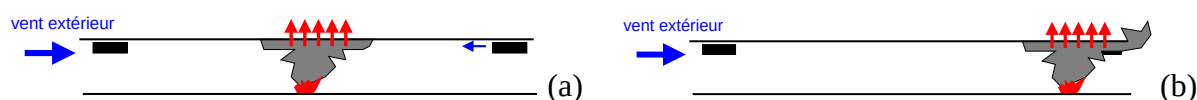


FIG. 5.8 – Exemple de contrôle du courant d'air en utilisant une injection de quantité de mouvement aux têtes ; (a) situation courante ; (b) l'incendie est du côté opposé au vent, entre la batterie d'accélérateurs et la tête.

Équipements de ventilation spécifiques répartis le long du tunnel

Si aucune des méthodes décrites précédemment ne peut s'appliquer, on peut envisager d'installer des accélérateurs dédiés au contrôle du courant d'air et répartis tout au long du tunnel. Cette solution rend nécessaire un sur-gabarit du tunnel (sauf si la voûte n'est pas utilisée pour les gaines de ventilation), l'installation d'une alimentation électrique puissante sur toute la longueur du tunnel, et un mode de commande qui garantisse absolument que les accélérateurs situés à proximité immédiate du foyer ne soient pas mis en marche (ce qui en conséquence nécessite une détection rapide de la position de l'incendie).

5.4.4 Calcul des installations de soufflage d'air frais

Dans un circuit de ventilation, on peut généralement distinguer la partie interne à la station de ventilation, de la partie composée des gaines de soufflage et des galeries de transit d'air (voir figure 5.9).

La partie interne à la station de ventilation abrite habituellement la prise d'air et ses protections pare-pluie et anti-volatile, un plenum d'aspiration avec des dispositifs d'insonorisation, les pièces de raccordement du ventilateur, le ventilateur proprement dit (raccordé au circuit à l'aide de manchettes souples et fixé par l'intermédiaire de plots antivibratiles), les pièces de transformation, un registre d'isolement éventuel et enfin les pièces de raccordement aux gaines du tunnel.

La partie après la station dans le sens de la circulation d'air est le plus souvent constituée de galeries distributrices (gaines de soufflage) mais peut aussi comporter des tronçons intermédiaires de transit de l'air (galeries de transit).

Pour respecter les différents critères d'économie, de vibrations et de bruit, il est nécessaire de ne pas dépasser certaines vitesses d'air. En général, on retient les valeurs suivantes :

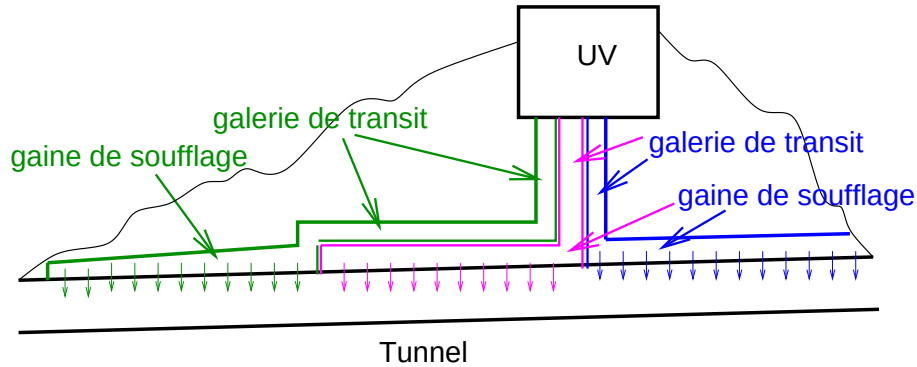


FIG. 5.9 – Galerie de transit et gaines de soufflage ; schéma d'un exemple fictif comportant une station de ventilation (repérée 'UV') et trois cantons de soufflage, respectivement bleu, magenta et vert.

- prise d'air : 3 à 4 m/s (vitesse rapportée à la section globale des prises d'air) pour les prises d'air protégées par des ventelles ou des caillebotis, 5 à 6 m/s en l'absence de ces équipements ;
- dispositifs d'insonorisation à baffles parallèles : 4 à 6 m/s (rapporté à la section globale) selon la configuration des silencieux ;
- pièces de raccordement métalliques des ventilateurs : 20 à 25 m/s ;
- gaines en tunnel : 20 à 25 m/s, à adapter selon la longueur des conduits ;
- bouches de soufflage : 8 à 10 m/s.

La méthode de dimensionnement est la méthode des pertes de charge : on égale la remontée de charge due au ventilateur (c'est à dire sa pression totale) à la somme des pertes de charge dans le circuit, plus une réserve forfaitaire de pression. Cette réserve forfaitaire de pression est nécessaire pour pouvoir régler efficacement la distribution de l'air le long des gaines. Elle permet en outre de maintenir une surpression minimale dans la gaine d'air frais pour éviter que le mouvement de l'air ne soit trop perturbé par les fluctuations de pression induites par le mouvement des véhicules. En général, on retient une valeur de 150 Pa.

Pertes de charge singulières

Comme rappelé section 5.2.2, les pertes de charge singulières peuvent être représentées à partir du coefficient de perte de charge :

$$\Delta H = \xi \frac{\rho W^2}{2}$$

On donne dans le tableau 5.9 des valeurs typiques de coefficients de perte de charge. En cas de succession très rapprochée de singularités, des coefficients correcteurs doivent être introduits pour tenir compte des interactions entre éléments connexes. On peut aussi utiliser des pertes de charge forfaitaires, en particulier pour les dispositifs d'insonorisation (80 à 150 Pa).

D'une manière globale, il faut veiller à ce que la veine d'air ne subisse pas de variation brusque de vitesse et de pression. Il faut éviter les décollements de filets d'air aux changements de direction, aux élargissements de section ou au contournement d'obstacles, qui sont responsables de pertes de charge importantes. Ne pas respecter quelques règles simples d'aérodynamique est de nature à compromettre la qualité d'un circuit. Il faut notamment apporter un soin particulier au raccordement des ventilateurs (par exemple, une alimentation dissymétrique de la roue entraîne des risques de pompage – ce problème est crucial lors de la mise en parallèle de deux ventilateurs à forte pression totale sur le même circuit). Il faut éviter les conduits trop aplatis

élément de circuit	ξ associé
prise d'air	2 à 5
ouïe d'aspiration	0,1
convergent (1)	0,1 à 0,2
diffuseur (1)	0,1 à 0,3
changement de forme (2)	0,05 à 0,15
registre d'isolement ouvert	0,1 à 0,2
coude à 45° avec aubes directrices	0,1 à 0,25
coude à 90° avec aubes directrices	0,15 à 0,4
dérivation	0,1 à 0,3

TAB. 5.9 – *coefficients de perte de charge typiques ; (1) rapporté à la vitesse du côté le plus étroit ; (2) à section constante.*

(qui ne permettent pas une bonne uniformité des profils de vitesse et sont peu efficaces, du fait de leur faible diamètre hydraulique), les changements de section combinés à des changements de direction, les coudes à angle vif sans aube directrice, les diffuseurs dont l'angle au sommet est trop ouvert, les obstacles non carénés noyés dans le circuit, les registres dont les ailettes seraient mal profilées, etc ..., notamment lorsque les vitesses sont importantes.

Pertes de charge réparties

Deux types de circuits doivent être distingués : les portions de circuit correspondant au transit de l'air (débit constant le long du conduit) et les portions assurant la distribution répartie de l'air (le débit décroît linéairement avec l'abscisse).

Pour les gaines de transit, la prise en compte des pertes de charge réparties se fait comme indiqué dans la section 5.2.2 (L est la longueur de la gaine, λ_G son coefficient de perte de charge et D'_H son diamètre hydraulique ; pour une gaine maçonnée, on prend λ_G entre 0,015 et 0,018 ; on peut calculer λ_G en utilisant la rugosité absolue de la gaine, en général de l'ordre du millimètre),

$$\Delta H = \lambda_G \cdot \frac{\rho W^2}{2} \cdot \frac{L}{D'_H}.$$

Pour les galeries distributrices, on montre que, comme la vitesse de l'air décroît linéairement dans la gaine, pour être proche de zéro à la dernière bouche, on a la formule suivante, où W est la vitesse de l'air à l'extrémité située du côté des ventilateurs (cf. par exemple [14]) :

$$\Delta H = \frac{1}{3} \lambda_G \cdot \frac{\rho W^2}{2} \cdot \frac{L}{D'_H}.$$

Le facteur 1/3 vient d'une hypothèse de profil triangulaire des vitesses. De plus, afin d'assurer une surpression correcte de la gaine même au niveau de la dernière bouche, il faut ajouter une réserve forfaitaire de pression ΔH_d (voir ci-dessus). On retient en général $\Delta H_d = 150 \text{ Pa}$ ¹¹ et donc

$$\Delta H_{\text{total}} = \Delta H_d + \frac{1}{3} \lambda_G \cdot \frac{\rho W^2}{2} \cdot \frac{L}{D'_H}.$$

¹¹ Le choix de ΔH_d conduit à déterminer le coefficient de perte de charge au travers de la dernière bouche de soufflage afin que le débit délivré par la bouche soit correct. Par exemple, pour $H_d = 150 \text{ Pa}$ et une vitesse de l'air à la sortie de la bouche de 10 m/s, cela conduit à un coefficient de perte de charge $\xi = 2,5$. Les pertes de charge des bouches suivantes de la gaine peuvent être déterminées selon le même principe. En pratique, les bouches sont munies d'un dispositif de réglage de débit (perte de charge réglable) et la vérification du réglage correct est faite lors d'essais effectués par l'entreprise qui réalise la ventilation.

En toute rigueur, on devrait aussi inclure le terme correspondant à la perte de charge due au trajet de l'air dans le tunnel, terme qui est négligeable sauf pour les tunnels très longs.

Puissance des ventilateurs

Lorsque Q est le débit volumique passant par le ventilateur, et H la remontée de charge qu'il induit (c'est à dire sa pression totale), la puissance électrique appelée aux bornes du ventilateur est¹² :

$$P = \frac{QH}{\eta}.$$

La valeur du rendement global η est précisée dans la section 5.4.6 consacrée aux ventilateurs. Ayant calculé la somme de toutes les pertes de charge, on en déduit donc la puissance électrique nécessaire, en égalisant cette perte de charge totale à la remontée de charge induite par le ventilateur.

5.4.5 Calcul des installations d'extraction d'air vicié et de fumées

Détermination des débits à extraire

Les débits nécessaires sont donnés par la confrontation des résultats des études résumées dans les chapitres 2 et 3¹³.

Dans le cas d'un incendie, la température des fumées peut atteindre des valeurs très élevées. A ces températures, l'air et les fumées sont fortement dilatés, et pour un même débit massique, le débit volumique de fumées dépend fortement de la température. Par exemple, un débit volumique de 80 m³/s de fumées à 100°C correspond à un débit massique de 75 kg/s, alors qu'un même débit volumique de fumées à 1000°C correspond à un débit massique de l'ordre de 20 kg/s. Du point de vue réglementaire, l'installation de ventilation doit pouvoir extraire un certain débit volumique de fumées Q_f au niveau des trappes de désenfumage (voir chapitre 2 et l'instruction technique [17]). D'un autre côté, deux phénomènes physiques entrent en jeu :

- la température des fumées au niveau du foyer dépend du type de foyer,
- et les fumées se refroidissent lors de leur cheminement en gaine entre les trappes d'extraction et le ventilateur.

Une installation dimensionnée pour pouvoir extraire le débit volumique Q_f pour un air à la température ambiante pourra en toutes circonstances extraire un débit de fumées chaudes à un débit supérieur à Q_f et remplira donc les exigences du dimensionnement. En effet, les ventilateurs sont des machines volumétriques (voir § 5.4.6), c'est à dire qu'ils extraient un certain débit volumique de gaz, quelle que soit la masse volumique (donc la température) de ces gaz au niveau du ventilateur). Avec une installation ainsi dimensionnée :

- si l'incendie est proche du ventilateur, le refroidissement dans la gaine sera faible ; le débit volumique extrait au niveau des trappes Q_e sera donc légèrement plus grand que le débit volumique passant dans le ventilateur Q_f , qui est lui même égal au débit minimal que l'installation de ventilation doit pouvoir extraire au niveau des trappes ;
- si l'incendie est loin du ventilateur, le refroidissement dans la gaine pourra être important et donc le débit volumique Q_e extrait au niveau des trappes sera nettement plus grand que le débit volumique passant par le ventilateur Q_f , qui là encore est égal au débit minimal que l'installation de ventilation doit pouvoir extraire au niveau des trappes.

¹² si Q est exprimé en m³/s, H en Pa et P en kW, la formule devient $P = \frac{QH}{1000\eta}$.

¹³ L'extraction d'air vicié en exploitation normale, si elle est nécessaire, est calculée afin de limiter la vitesse du courant d'air en tunnel, voir section 3.4.

On dimensionne donc les installations de désenfumage en cas d'incendie pour qu'elles puissent extraire le débit volumique Q_f pour un air à la température ambiante au niveau des trappes.

En général, le débit à extraire pour le désenfumage en cas d'incendie est plus important que le débit nécessaire à l'extraction d'air vicié. On dimensionne alors l'installation sur la base du débit de désenfumage en cas d'incendie. Comme l'installation a été dimensionnée pour le débit de désenfumage en cas d'incendie, elle peut a fortiori assurer l'extraction d'air vicié. Il faut dans ce cas équiper le tunnel de ventilateurs à vitesse variable.

Si les besoins en extraction d'air vicié dépassent les besoins en extraction de fumées d'incendie, il faut faire un calcul spécifique.

Calcul des pertes de charge du circuit d'extraction

Selon la puissance et la position de l'incendie, la température des fumées varie. Il faut a priori dimensionner le circuit d'extraction à partir du cas qui exige le plus de puissance des ventilateurs. On se contente cependant en général de réaliser le calcul des pertes de charge du circuit de façon isotherme au moment du dimensionnement. Le choix de réaliser des calculs isothermes vient de l'extrême difficulté de procéder à des calculs prenant en compte le refroidissement des fumées dans les gaines de façon exacte pour tout les cas de figure. Il faut cependant prendre garde au fait que dans certains cas, les débits volumiques effectivement extraits au droit des trappes seront très supérieurs aux débits de dimensionnement, quand bien même les débits volumiques brassés par les ventilateurs seraient un petit peu plus faibles que si on extrayait de l'air frais du fait de la forme de la courbe caractéristique des ventilateurs. Un débit volumique d'extraction très important au droit des trappes peut avoir des conséquences sur le contrôle du courant d'air longitudinal dans le tunnel. Ces conséquences doivent être évaluées lors de la mise au point des scénarios de désenfumage si le courant d'air doit être contrôlé dans le tunnel.

Dans une installation d'extraction comme dans une installation d'insufflation, il y a des galeries de transit et des gaines en communication avec le tunnel. Dans le cas des installations à trappes télécommandées, certaines trappes sont ouvertes et d'autres fermées. On ouvre toujours des séries de trappes adjacentes et donc la gaine d'extraction elle même peut être décomposée entre un rameau mort, une section d'extraction et une section de transit (voir figure 5.10).

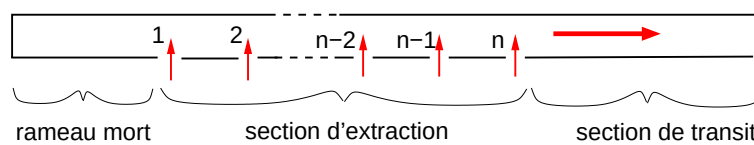


FIG. 5.10 – Gaine d'extraction, décomposée en rameau mort, section d'extraction et section de transit.

En notant L_1 la longueur de la section d'extraction, L_2 la longueur de la section de transit, D'_H le diamètre hydraulique de la gaine, λ_G le coefficient de perte de charge de la gaine, et W la vitesse de transit de l'air dans la gaine (mesurée dans la section de transit), la perte de charge entre le tunnel et l'extrémité de la gaine s'écrit approximativement :

$$\Delta H = \Delta H_d + \frac{1}{3} \lambda_G \frac{\rho W^2}{2} \frac{L_1}{D'_H} + \lambda_G \frac{\rho W^2}{2} \frac{L_2}{D'_H}.$$

Le facteur $1/3$ vient ici encore d'une hypothèse de profil triangulaire des vitesses, ce qui est une approximation en général suffisante. Cette expression est pessimiste, à cause la récupération d'énergie dynamique due au fait que les trappes, si elles sont correctement profilées, se

comportent en injecteurs vis-à-vis de la gaine, voir [15]. Notons que la récupération d'énergie ne peut excéder une pression dynamique ($\frac{1}{2}\rho W^2$), ce qui correspond en général à environ 10 % de la perte de charge totale dans la gaine. Un calcul trappe par trappe est plus précis, mais le gain en précision est marginal. La réserve forfaitaire de pression ΔH_d permet de prendre en compte les effets de trafic et surtout d'assurer l'uniformité des débits aspiré par les différentes trappes. On retient en général une valeur de l'ordre de 300 à 400 Pa. De même que pour les bouches de soufflage, cela permet de déterminer le coefficient de perte de charge que doivent avoir les trappes. Bien évidemment, on calcule la perte de charge pour le cas le plus défavorable, qui est celui des trappes ouvertes en bout de gaine. On ajoute les pertes de charges des circuits de transit et des circuits internes à la station de ventilation, et le dimensionnement se conclut de façon similaire à celui des installations de soufflage d'air frais, par la détermination de la puissance électrique nécessaire.

5.4.6 Notions sur les ventilateurs utilisés en ventilation transversale

On a introduit dans la section 5.3.3 les ventilateurs de jet utilisés en ventilation longitudinale. On présente maintenant les ventilateurs utilisés en ventilation transversale, appelés ventilateurs de conduit. Les ventilateurs de conduit peuvent être classés en deux familles,

- les ventilateurs centrifuges, dans lesquels l'air entre axialement dans une roue pour en sortir radialement (figure 5.11(a)),
- et les ventilateurs hélicoïdes, dans lesquels la trajectoire de l'air est sensiblement parallèle à l'axe de la roue (figure 5.11(b)).

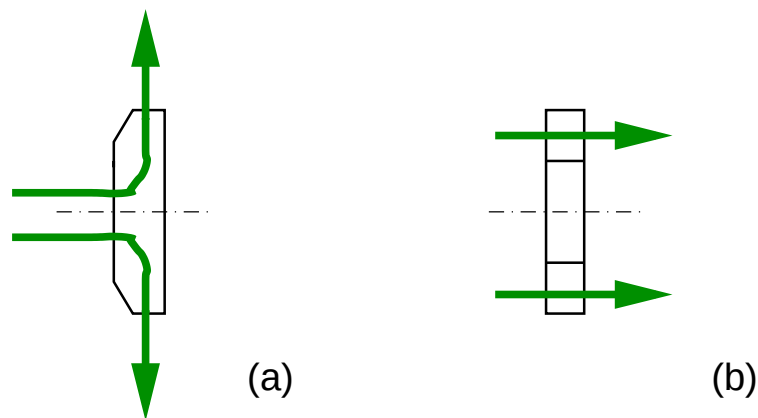


FIG. 5.11 – Principe de fonctionnement des ventilateurs : (a) ventilateur centrifuge ; (b) ventilateur hélicoïde.

On utilise des ventilateurs centrifuges quand il s'agit de fortes pressions et de faibles débits¹⁴. Les ordres de grandeur typiques en tunnels sont un diamètre de roue de 1 à 3 m, un débit de 30 à 200 m³/s, une remontée de charge de 300 à 5000 Pa et une puissance électrique absorbée de 15 à 300 kW. La puissance électrique est liée au débit et au gain de charge par l'équation :

$$P = \frac{QH}{\eta}$$

(pour exprimer P en kW, voire note 12 page 79). Le rendement global η du groupe moto-ventilateur dépend des classes de puissance ; typiquement,

¹⁴de nos jours, ils ne sont quasiment plus employés que pour la ventilation d'abris ou de sas, cf. § 5.6, car ils ont l'inconvénient d'être très encombrants lorsqu'ils correspondent à des pressions totales et des débits importants.

- $\eta \approx 0,7$ pour les moyennes et grosses machines ($Q > 50 \text{ m}^3/\text{s}$);
- $\eta \approx 0,6$ pour les petites machines ($Q = 10 \text{ à } 50 \text{ m}^3/\text{s}$);
- $\eta \approx 0,5$ pour les toutes petites machines ($Q < 10 \text{ m}^3/\text{s}$).

Le point de fonctionnement du ventilateur est imposé par le fait que la remontée de charge induite par le ventilateur décroît avec le débit qui le traverse, alors que la perte de charge dans le circuit croît avec le même débit (cf. figure 5.12). La zone en pointillés de la courbe caractéristique, où la remontée de charge croît avec le débit, est appelée zone de pompage. C'est une plage instable du fonctionnement du ventilateur, et il ne faut pas utiliser le ventilateur dans cette zone. Cela peut être délicat quand plusieurs ventilateurs sont utilisés en parallèle. Il est à noter qu'en général il n'y a pas de zone de pompage dans les ventilateurs centrifuges.

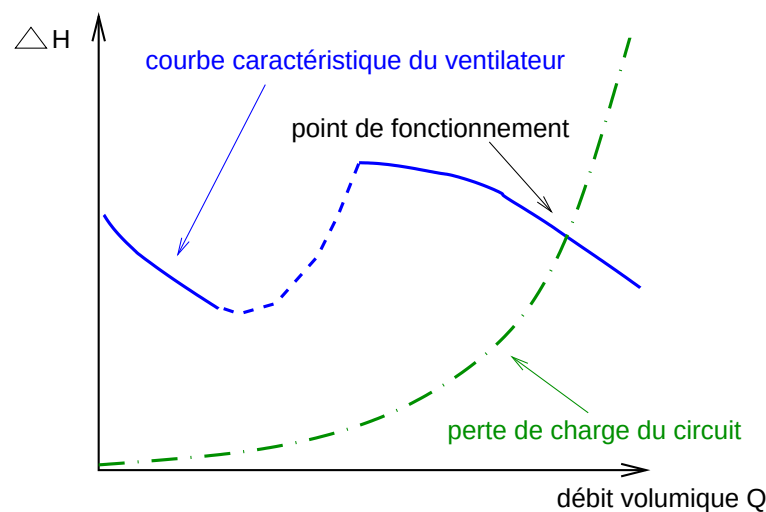


FIG. 5.12 – Courbe caractéristique typique d'un ventilateur ; traits pleins : zone de fonctionnement normal ; pointillés : zone de pompage ; traits d'axe : pertes de charge dans le circuit.

Pour pouvoir régler le débit d'air circulant dans le circuit, plusieurs techniques sont possibles : variation discontinue de la vitesse de rotation en jouant sur le nombre de pôles du moteur électrique entraînant le ventilateur (en général, il s'agit de moteurs bi-vitesse), variation du pas des pales au moyen d'un dispositif mécanique, ou encore variation continue de la vitesse de rotation par convertisseur de fréquence. Cette dernière solution est en général à préférer. En l'appliquant, il faut prendre garde aux risques de résonances vibratoires du ventilateur à certaines vitesses de rotation, et aux problèmes de parasitage électrique (harmoniques).

Des éléments sur la température atteinte au niveau des ventilateurs sont donnés dans le tableau 5.10.

5.4.7 Contraintes de génie civil pour la ventilation transversale

Les gaines de ventilation sont des éléments cruciaux d'un système de ventilation transversal. Le dossier pilote 'génie civil lié aux équipements et à l'exploitation' [4] aborde les différents procédés de construction possibles.

Dans les calculs de dimensionnement, on prend en compte un certain niveau de rugosité. La qualité de la réalisation doit être contrôlée pour s'assurer que la rugosité réelle est correcte. En effet, une gaine plus rugueuse que prévu dans le dimensionnement va conduire à une perte de débit d'air disponible. De plus, les fuites des gaines doivent être réduites au minimum, que ce soient des fuites entre gaines ou entre une gaine et le tunnel. Pour assurer l'étanchéité, il faut

Quand le circuit d'extraction est utilisé pour le désenfumage, la température au niveau des ventilateurs des gaz extraits est déterminée par :

- la part $\alpha \dot{Q}_c$ de la puissance convective $\dot{Q}_c$ de l'incendie qui est aspirée par le système de ventilation,
- le débit massique total Q_m de gaz extraits,
- le refroidissement des gaz par échange thermique avec les parois des gaines.

En notant T_{ventil} la température des fumées qui passent dans le ventilateur et ΔT la diminution de la température des fumées due aux échanges de chaleur entre les fumées et le plafond du tunnel et les parois de la gaine, cela s'écrit :

$$T_{ventil} + \Delta T = \frac{\alpha \dot{Q}_c}{C_p Q_m} + T_0.$$

où $Q_m = \rho_0 \frac{T_0}{T_{ventil}} Q_V$, avec Q_V le débit volumique des ventilateurs. La valeur de ΔT dépend beaucoup de la position des trappes ouvertes par rapport au ventilateur (de quelques dizaines de degrés à plusieurs centaines). Le foyer entraîne de l'air frais avec un débit massique Q_{me} . On a donc $\alpha \leq \frac{Q_m}{Q_{me}}$ et bien sûr $\alpha \leq 1$, ce qui peut s'écrire $\alpha \leq \text{Min}(Q_m/Q_{me}, 1)$. On sait que quelle que soit la puissance de l'incendie, la température du foyer ne dépasse pas $T_{HCM} = 1300^\circ\text{C}$, et donc :

$$Q_{me} \geq \frac{\dot{Q}_c}{C_p (T_{HCM} - T_0)}$$

Cela correspond à 15,5 kg/s pour un feu de 30 MW de puissance totale, et à 105 kg/s pour un feu de 200 MW de puissance totale. On en déduit :

$$T_{ventil} \leq \text{Min} \left(\frac{\dot{Q}_c}{C_p \rho_0 T_0 Q_V} \cdot T_{ventil} + T_0, T_{HCM} \right) - \Delta T.$$

En exprimant la puissance convective en MW, le débit volumique en m^3/s et les températures en $^\circ\text{C}$, cela s'écrit :

$$T_{ventil} \leq \text{Min} \left(2,8 \frac{\dot{Q}_c}{Q_V} (T_{ventil} + 273) + 15, 1300 \right) - \Delta T.$$

Pour un incendie de puissance totale 30 MW, et pour un débit d'extraction de $110 \text{ m}^3/\text{s}$, on a donc

$$\begin{aligned} \Delta T = 0 & \Rightarrow T_{ventil} \leq 310^\circ\text{C} \\ \Delta T = 20^\circ\text{C} & \Rightarrow T_{ventil} \leq 270^\circ\text{C} \\ \Delta T = 60^\circ\text{C} & \Rightarrow T_{ventil} \leq 190^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Pour un débit d'extraction de $150 \text{ m}^3/\text{s}$, on a $T_{ventil} \leq 185^\circ\text{C}$ pour $\Delta T = 0$. La chute de température ΔT sera forte à proximité immédiate du foyer, car elle est proportionnelle à la différence entre la température des fumées et la température des parois solides. Pour tous les débits d'extraction compatibles avec l'instruction technique [17], pour un incendie de 30 MW de puissance totale, on peut donc être certain que la température des gaz ne dépassera pas 200°C au niveau des ventilateurs.

Pour un incendie de puissance totale 200 MW, le débit $Q_{me} = 105 \text{ kg/s}$ correspond à un débit volumique de près de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ pour des fumées à 1300°C . Dans la grande majorité des cas, la ventilation ne pourra pas absorber toutes les fumées. Le calcul approximatif ci-dessus donne une température des gaz au niveau des ventilateurs de $1300^\circ\text{C} - \Delta T$. La température réelle au niveau des ventilateurs pourra dépasser 400°C si l'incendie est relativement proche des ventilateurs. La limite de résistance des ventilateurs à 400°C imposée dans l'instruction technique [17] a été choisie car il n'existe pas de ventilateur ayant des limites de résistance en température plus élevées.

Si on veut évaluer l'ordre de grandeur des températures atteintes en gaine, on peut retenir les mêmes équations que ci-dessus, mais ΔT ne représente alors plus que les pertes de chaleur par échange entre les fumées et le plafond du tunnel avant qu'elles ne soient absorbées par les trappes. Il se peut que les fumées atteignent ponctuellement des températures supérieures aux températures données par ces équations au droit des trappes, dans des volumes limités de dimensions typiques doubles du diamètre hydraulique des trappes. Une évaluation plus précise des températures atteintes en gaine pour le calcul de la résistance des gaines à la chaleur nécessite une analyse du mouvement des fumées selon le scénario de désenfumage déclenché.

TAB. 5.10 – Éléments pour une évaluation simplifiée des températures atteintes au niveau des ventilateurs

choisir un procédé de construction adapté. Là encore, le suivi et le contrôle de la réalisation jouent un rôle essentiel.

Enfin, pour permettre l'entretien des gaines au cours de la vie du tunnel, il est recommandé de prendre en compte l'accessibilité des gaines par les équipes de maintenance. En particulier, il faut prévoir des trappes de visite, et il est judicieux de prévoir des gaines suffisamment hautes pour que les personnels de maintenance puissent se tenir debout et marcher (par exemple, on peut retenir une hauteur de 1,90 m dans le cas général, 1,50 m dans les cas où la géométrie est difficile, et 1,20 m ponctuellement).

5.4.8 Cas des puits de ventilation

Dans certains cas, on est conduit à mettre en place des puits de ventilation. Ces puits peuvent être de grande hauteur quand il s'agit de puits desservant des stations intermédiaires de tunnels longs très profondément enterrés. En général, on cherche à éviter le surcoût lié à la construction de puits, quitte à prévoir un tunnel de section plus grande pour pouvoir y loger des gaines de ventilation supplémentaires.

Des éléments sur le génie civil des puits sont donnés dans [4].

Les puits peuvent servir ou bien seulement à l'apport d'air frais, ou bien à l'extraction d'air vicié et de fumées en cas d'incendie, ou bien aux deux. Lorsque les deux fonctions sont nécessaires, il est en général préférable de creuser deux puits distincts. En effet, la mise en place d'un cloisonnement à l'intérieur d'un puits pour séparer de manière efficace un conduit d'air frais d'un conduit d'air vicié et de fumées est très délicate, et l'entretien d'un tel cloisonnement presque impossible dès que le puits atteint une certaine profondeur.

On veillera aussi aux problèmes de venues d'eau et d'étanchéité du puits par rapport au terrain, des problèmes de formation de glace pouvant apparaître par temps froid.

Quand cela est possible, il est préférable que les puits ne débouchent pas verticalement sur le tunnel, mais aboutissent dans un plenum situé latéralement par rapport au tunnel.

Enfin, pour les puits d'une certaine profondeur, l'effet cheminée dans le puits dû à la différence de température entre l'air dans le puits et l'air extérieur n'est pas négligeable, même quand le puits est utilisé en mode normal d'exploitation pour apporter de l'air frais ou extraire de l'air vicié. On veillera donc lors des calculs de dimensionnement, à prendre en compte cet effet dans tous les cas de fonctionnement du puits.

5.4.9 Les stations de ventilation

La conception d'une station de ventilation découle des options prises au niveau de différents partis fonctionnels de base, et de la synthèse d'un grand nombre de possibilités pratiques d'aménagements. Des exemples de dispositions possibles sont donnés dans les annexes B et C. Il s'agit de schémas indicatifs, et sur lesquels on peut notamment juger, en fonction des débits installés, des volumes nécessaires.

Des choix pour la conception des stations sont notamment à faire aux niveaux suivants :

La fonction dévolue à la station : Insufflation spécialisée d'air frais avec réversibilité éventuelle pour le désenfumage ; désenfumage spécifique ; extraction spécifique d'air vicié ; fonction mixte air frais air vicié.

Le lieu d'implantation : En tête de tunnel ou intermédiaire, locale ou déportée, en surface, à cheval sur la chaussée, latérale, semi-enterrée, enterrée ou souterraine en pied de puits. La création de stations intermédiaires constitue une opportunité d'implantation en tunnel d'éléments singuliers de sécurité tels que garages ou sorties de secours qu'on peut associer à l'aménagement.

L'interface circuits station / atmosphère extérieure :

- prise d'air frais : baies horizontales en surface ou en terrasse, verticales en façade, déportées (contre les risques de recyclage de pollution avec des rejets voisins par exemple). Le désenfumage par inversion des ventilateurs d'air frais nécessite en outre des précautions particulières d'implantation des baies vis-à-vis de l'environnement et du risque de recyclage des fumées dans les autres circuits maintenus en soufflage.
- rejets d'air vicié : cheminées locales ou déportées (éloignement d'un site sensible ou intégration à une construction voisine par exemple), hauteur variable selon la nature de l'environnement, section à définir en fonction de l'impulsion initiale de jet recherchée.

L'interface circuits station / galeries tunnel : Raccordement à des galeries en voûte, sous chaussée, latérales ou bilatérales, traversée de gaines en plafond ou sous chaussée.

Le mode de disposition général des ventilateurs : Disposition à axe horizontal, conduisant à un bâtiment peu élevé mais de surface au sol importante, disposition à axe vertical, entraînant un bâtiment au contraire de grande hauteur, mais de plus faible emprise au sol. Il faut noter que la disposition horizontale est toujours préférable sur le plan purement mécanique des machines (bonne portée des paliers).

Le secours des ventilateurs : Il faut assurer un niveau de secours adéquat en cas de panne ou d'immobilisation d'une machine pour réparation ou entretien.

Sur le plan pratique, le doublement des ventilateurs, ou l'installation de machines spécifiques de secours sont deux dispositions courantes, le double objectif étant :

- d'une part d'assurer le bon niveau de secours avec les dispositions les plus simples et les plus fiables,
- d'autre part d'uniformiser les caractéristiques unitaires des machines au niveau global du tunnel (simplification de l'entretien et des pièces de rechange).

Pour l'air frais, l'usage de deux ventilateurs indépendants branchés sur deux galeries séparées ventilant un même tronçon de tunnel est une disposition très satisfaisante.

La mise en parallèle, pour l'air frais comme pour l'air vicié, de plusieurs machines sur un même circuit est une autre solution classique, mais qui nécessite des précautions particulières de commande notamment au niveau de l'asservissement des registres d'isolement au démarrage de la ventilation.

L'usage de ventilateurs spécifiques de secours communs à plusieurs circuits est une solution satisfaisante mais nécessitant des jeux de registres d'isolement bien étanches et à commande fiable. Cette solution est en général réservée aux stations comportant plusieurs ventilateurs.

Pour les stations branchées sur des tronçons de tunnel de faible longueur (quelques centaines de mètres au maximum), on peut secourir un ventilateur par le ventilateur du tronçon adjacent en faisant débiter ce dernier ventilateur dans les deux tronçons à la fois, grâce à un registre commun.

Les dispositifs d'insonorisation : Il est conseillé de limiter à environ 92 dBA le niveau de bruit dans le local ventilateur, et à 60 ou 70 dBA dans les locaux techniques adjacents. Il faut aussi respecter la qualité sonore de l'environnement des baies d'aspiration ou de rejet (s'il s'agit de systèmes d'extraction ne fonctionnant qu'en cas d'incendie, on peut admettre des niveaux de bruit nettement plus élevés que pour les installations utilisées en exploitation normale).

Il convient aussi d'examiner la protection acoustique du côté tunnel, notamment dans le cas de stations implantées en tête : le traitement acoustique des parois de galeries peut s'avérer nécessaire sur une certaine distance depuis la tête. En tout état de cause, un niveau sonore limite de l'ordre de 85 dBA est souvent préconisé au droit des bouches de ventilation.

L'insonorisation côté extérieur se réalise le plus souvent par baffles absorbants parallèles constituées de laine de roche et montés sur cadres métalliques en une ou deux batteries successives filtrant des niveaux de fréquences différents. Ces silencieux peuvent être intégrés dans un conduit horizontal (de préférence) ou vertical. Il est très souhaitable de les abriter de la pluie et il convient de ménager des accès de visite. Dans certains cas particuliers des silencieux annulaires peuvent être utilisés mais leur efficacité est moindre.

Dans le local ventilateurs, l'atténuation du bruit par l'épaisseur de la virole et des gaines métalliques est généralement suffisante pour limiter le niveau acoustique dû au bruit de "carcasse" ; on peut exceptionnellement avoir recours à un traitement absorbant des parois du local ou à un captage acoustique du ventilateur. Les locaux adjacents et les abords de station sont protégés par des voiles lourds et des serrureries de bonne atténuation acoustique.

Des dispositions de protection acoustique peuvent aussi être nécessaires sur les installations de ventilation annexe des locaux électriques ou des ouvrages de sécurité en tunnel.

Le mode de raccordement des ventilateurs : Il existe une grande variété de solutions :

- Circuit d'air frais :
 - aspiration : aspiration dans un plenum commun ou séparé, mise en dépression globale de la salle ventilateurs (dans cette dernière solution, la salle des machines est exposée au bruit et aux mouvements d'air mais la manutention des ventilateurs est facilitée). L'usage d'une ouïe d'aspiration simple, peu encombrante et performante est courante. Cependant il peut, selon les cas, être préférable, ou même impératif, d'opter pour un raccordement par pièces de transformation convergentes (circuit indépendant réversible).
 - raccordement au réseau de gaines du tunnel : soufflage indépendant ou en parallèle dans le circuit. L'utilisation de diffuseurs est nécessaire en général.
- Circuit d'air vicié : Comme pour l'air frais on doit tirer le meilleur parti de l'utilisation possible d'une ouïe, d'un convergent et d'un diffuseur.

En circuit d'air frais comme en circuit d'air vicié, des pièces de transformation rond-carré, rond-rectangle ou autre changement de forme sont nécessaires en cas d'installation de registres d'isolement, ou pour se raccorder à des réservations carrées ou semi-circulaires du génie civil.

La manutention : Le mode de manutention du matériel a une incidence capitale sur la conception globale de la station par les volumes de dégagement qu'il induit. Divers moyens sont à prévoir selon l'importance de l'installation : simple crochet et palan à main, chariot, monorail, poutre roulante. Ces dispositifs doivent permettre la manutention du matériel électromécanique lourd (moto ventilateurs, registres motorisés). A noter que les parties statiques importantes des circuits (tôleries essentiellement) n'ont pas à être manutentionnées par ces dispositifs fixés une fois l'installation réalisée.

L'objectif principal reste de pouvoir démonter un ventilateur sans avoir à interrompre le fonctionnement des machines voisines. L'utilisation de ventilateurs dont la virole est démontable par demi-coquille, afin de réduire la hauteur des locaux, n'est à retenir que pour les cas difficiles, car elle nécessite une technique de construction plus sophistiquée des machines. De même, il faut éviter les dispositions nécessitant des opérations de démontage trop lourdes (démontage de silencieux, par exemple, pour passer le ventilateur).

Les deux principes types de manutention sont :

- le dégagement latéral des ventilateurs : disposition permettant une faible hauteur sous plafond mais nécessitant une plus grande surface au sol et des accès matériels multiples, fonction du nombre de ventilateurs ;
- le dégagement au-dessus des autres ventilateurs : la hauteur sous plafond est nécessairement importante mais les machines peuvent être resserrées (sur-hauteur nécessaire entre 1,5 et 3m selon la charge et le type de système – rail avec palan, pont roulant, ...).

Les accès : L'accès du matériel à l'intérieur de la station peut s'opérer, selon la configuration du bâtiment, par une porte donnant sur la voirie de surface (la meilleure des solutions) ou par des trappes donnant sur la chaussée du tunnel, latéralement ou en plafond. Il faut éviter les trappes en plafond donnant sur l'extérieur, et disposées au-dessus des machines, en raison des problèmes d'étanchéité qu'elles posent.

Des accès du personnel d'entretien à tous les espaces externes et internes de la station sont à prévoir : accès à la station depuis l'extérieur ou depuis le tunnel, issue de secours, accès entre les différents moto-ventilateurs, et dans les conduits, etc. . . par escalier, échelles et passerelles. Cet accès doit pouvoir se faire sans gêner la circulation des véhicules dans le tunnel. L'accès à l'intérieur des circuits de ventilation doit faire l'objet de dispositions et de consignes de sécurité strictes, comme par exemple : mise en place de grillage de protection devant la roue du ventilateur, portes d'accès avec dispositifs d'ouverture des deux côtés, verrouillage électrique préliminaire obligatoire des ventilateurs à l'arrêt, etc. . .

Il faut veiller à la bonne adaptation des caractéristiques des portes et trappes vis-à-vis de l'aérodynamique et de l'incendie : fermeture métallique simple, étanche, acoustique, pare-flamme ou coupe-feu.

La ventilation interne des stations : Les installations de ventilation mécanique des stations elles-mêmes revêtent beaucoup d'importance en milieu enterré. Elles sont à concevoir en respectant les règles de sécurité vis-à-vis de l'incendie. Le renouvellement d'air des locaux est défini d'une part sur la base des puissances calorifiques dissipées et d'autre part, sur la base d'un taux de renouvellement minimal sanitaire et de confort.

5.5 *Commande de la ventilation*

La ventilation doit être commandée afin de prendre en compte la pollution et les incendies. Pour la pollution, on met en place des systèmes entièrement automatisés. Pour le désenfumage, selon le niveau de surveillance du tunnel (cf. 5.1.1. de [17]), on privilégie des solutions qui vont de l'automatisme très élaboré au tout manuel. Par exemple, dans les tunnels pour lesquels la ventilation se limite à un outil de désenfumage pour l'intervention des pompiers, on peut se contenter d'un boîtier de commande en tête de tunnel. Pour les tunnels de niveau de surveillance D2 ou supérieur (cf. 5.1.1. de [17]), la commande de la ventilation de désenfumage est réalisée au moyen de séquences préprogrammées déclenchées par l'opérateur.

Par ailleurs, pour les tunnels non ventilés, il peut être utile de mettre en place des capteurs de pollution afin de limiter la circulation en cas de dépassement des seuils admissibles de polluants ou de décider l'éventuelle installation d'une ventilation dans le cadre d'un phasage de la réalisation du tunnel.

5.5.1 Les capteurs contrôlant la ventilation

Afin de permettre le contrôle automatisé de la ventilation, des capteurs sont utilisés. Il s'agit de capteurs de détection de polluants (CO, opacité et oxydes d'azote), de capteurs permettant de mesurer la vitesse de l'air, et de dispositifs permettant de détecter et de localiser les incendies. Le rôle de ces capteurs est de permettre à la ventilation (et plus généralement à l'exploitation du tunnel) de s'adapter aux conditions du moment, de façon automatique ou après décision des personnels chargés de la surveillance du tunnel.

La plupart de ces capteurs sont installés en tunnel, dans une atmosphère salissante et corrosive. Leur mise en oeuvre est assurée par des personnels qui ne sont pas des spécialistes de métrologie. La robustesse doit donc être la principale qualité de ces capteurs. En particulier, ils doivent être :

- spécifiques à leur fonction : un capteur pour un polluant donné doit être insensible aux autres polluants, un capteur incendie ne doit pas donner de fausses alertes systématiques ;
- fidèles et à dérive faible ; cette dérive, inévitable, doit pouvoir être compensée et suffisamment lente pour ne pas nécessiter de fréquents réglages ;
- peu sensibles aux conditions (température ambiante, pression, humidité) régnant dans le tunnel ;
- avoir un coût et des sujétions de maintenance faibles, sous peine de voir la maintenance négligée au cours de la vie du tunnel.

Le Cetu a publié deux documents détaillant les questions posées par les capteurs de pollution [3] et la mesure anémométrique [5]. Le lecteur est renvoyé à ces documents pour des explications plus complètes.

Le contrôle du CO

On rencontre essentiellement trois types d'appareils de mesure, basés sur :

- l'oxydation catalytique du CO,
- les réactions électrochimiques,
- et l'absorption d'un rayonnement infrarouge.

Les appareils basés sur l'oxydation catalytique du CO transforment le CO en CO₂ au cours d'une réaction qui dégage de la chaleur. Cette chaleur est proportionnelle à la quantité de CO qui a réagi et on mesure donc une élévation de température. Ces appareils restent relativement chers, ont un temps de réponse important, et sont peu sélectifs. La maintenance est onéreuse bien que peu fréquente.

Les appareils électrochimiques sont basés sur l'oxydation du CO en CO₂ dans une réaction électrolytique. Le courant généré est proportionnel à la teneur en CO. Ces appareils sont stables, bon marché, ont une durée de vie élevée et une maintenance réduite. En revanche, ils sont sensibles aux interférences avec d'autres polluants et à la pression et la température ambiantes.

Les appareils à absorption infrarouge mesurent l'absorption de la lumière par le gaz chargé de CO, à la longueur d'onde exacte de l'absorption par le CO. Ces appareils, de temps de réponse très courts, très sélectifs et précis, sont chers, complexes et nécessitent une maintenance poussée pour conserver leurs caractéristiques. Certains fabricants proposent ces appareils dans un même boîtier que les opacimètres transmissiomètres avec lesquels ils partagent alors la partie optique.

En général, étant donné que le CO n'est pas un polluant critique dans les tunnels routiers modernes, le choix de capteurs électrochimiques est raisonnable.

Le contrôle de l'opacité

L'opacité peut être contrôlée directement, en évaluant la perte de luminosité d'un faisceau lumineux, ou bien indirectement, en mesurant la diffusion de la lumière par les particules de fumée.

On appelle transmissiomètres les appareils de la première famille. Ils sont composés de deux éléments séparés, l'émetteur et le récepteur, et mesurent l'opacité moyenne sur le trajet optique entre l'émetteur et le récepteur (parfois l'émetteur et le récepteur sont dans le même élément et le second élément est simplement un miroir). Ils mesurent directement l'opacité d'après sa définition (à condition que leur faisceau lumineux soit dans une longueur d'onde visible ou que des corrections soient prises en compte si ce n'est pas le cas). En revanche, ces appareils ont le défaut de devoir être implantés en voûte ou assez haut sur les piédroits pour que leur faisceau ne risque pas d'être intercepté par un piéton ou un véhicule.

Les diffusiomètres mesurent la diffusion de la lumière par les particules. Le principe exact dépend des fabricants. Ces appareils peuvent s'implanter relativement facilement en tunnel, leur maintenance est aisée. En revanche, la correspondance entre la grandeur mesurée et l'opacité n'est pas toujours évidente. Certains diffusiomètres sont installés en niche technique et ils prélèvent l'air du tunnel par un petit tuyau grâce à une pompe. Dans ce cas, la longueur de ce tuyau ne doit pas dépasser quelques mètres.

Le contrôle des oxydes d'azote

Il existe des capteurs à chimiluminescence, électrochimiques et à infrarouge.

Les capteurs à chimiluminescence reposent sur les propriétés photochimiques du couple NO/NO₂ en présence d'ozone. Un appareil à chimiluminescence permet de mesurer séparément le NO seul et la somme de NO et NO₂. On obtient le NO₂ par différence, ce qui nécessite une bonne précision des mesures. Ces appareils ne peuvent être utilisés que par des personnels formés spécifiquement, la procédure d'étalonnage est complexe et doit être répétée souvent. Tout cela fait que l'on considère en général que ces appareils ne sont pas adaptés au contrôle de la pollution en tunnel.

Les capteurs électrochimiques sont comparables aux capteurs électrochimiques pour le CO. De même, le principe de mesure des capteurs infrarouges est similaire à celui décrit pour le CO. Actuellement, les capteurs les plus répandus sont les capteurs électrochimiques. Les capteurs infrarouge commencent à être utilisés en tunnel.

Le polluant le plus nocif est le dioxyde d'azote NO₂. Malheureusement, sa mesure par des capteurs électrochimiques ou infrarouge n'est pas facile. C'est pourquoi, en l'état actuel de la technique, on mesure le monoxyde d'azote NO. On utilise des seuils de substitution sur ce polluant (cf. section 5.5.2).

La détection des incendies

La détection des incendies ne repose pas seulement sur des appareils spécifiques. La stratégie à adopter dépend beaucoup du niveau de surveillance du tunnel.

La détection automatique d'incidents, l'analyse d'images vidéo, la surveillance par télévision, les appels des usagers par les postes d'appel d'urgence ainsi que les alarmes sur le décrochage des extincteurs sont en général de bons moyens de détecter les incendies. Dans la plupart des tunnels, les capteurs de pollution utilisés pour la ventilation sanitaire envoient une alarme qui est interprétée comme une alarme incendie lorsque les niveaux de pollution en CO et opacité atteignent une valeur très élevée.

Les capteurs conçus pour la détection des incendies dans les locaux techniques sont en général inadaptés en tunnel, du fait des risques d'encrassement et de l'atmosphère très corrosives des tunnels. Les moyens conçus spécifiquement pour détecter les incendies sont de deux types : détection ponctuelle et détection linéaire. La détection ponctuelle de fumée et de flamme permet une alerte rapide mais ne permet pas de localiser avec précision un incendie. La détection linéaire, si elle est faite avec des moyens électroniques modernes, permet de localiser avec précision un incendie, mais a un temps de réaction plus long (quelques minutes).

Les moyens conçus spécifiquement pour détecter les incendies ne sont pas nécessaires en tunnel, sauf pour les tunnels où il n'y a pas de surveillance humaine permanente et pour lesquels le régime de ventilation à mettre en oeuvre en cas d'incendie n'est pas celui qui s'applique automatiquement en cas de forte pollution dans le tunnel (cf. instruction technique [17]).

La mesure anémométrique

Les anémomètres sont utilisés en tunnel pour mesurer le courant d'air longitudinal. La mesure anémométrique est nécessaire à la conduite de la ventilation :

- en ventilation longitudinale,
 1. pour connaître la valeur du courant d'air en toutes circonstances,
 2. si le tunnel est bidirectionnel, afin de choisir le sens de soufflage des accélérateurs à mettre en marche pour la dépollution,
 3. pour maîtriser la valeur du courant d'air en cas d'incendie (notamment pour les tunnels équipés de systèmes d'extraction massive) ;
- en ventilation transversale,
 1. pour connaître la valeur du courant d'air en toutes circonstances,
 2. le cas échéant, pour limiter la vitesse de l'air en exploitation normale,
 3. pour permettre la maîtrise du courant d'air en cas d'incendie.

La mesure des vitesses de l'air en tunnel est difficile et comporte de fortes incertitudes, dues à la fois à des fluctuations très importantes (ces fluctuations sont causées à la fois par la turbulence inhérente à tout écoulement limité par des parois et par le passage des véhicules, voir figure 5.13), et au fait que la zone de mesure n'est jamais représentative de la vitesse débitante (il y a donc lieu de déterminer un facteur correctif à l'aide d'essais réalisés avant l'ouverture du tunnel à la circulation).

On utilise en général des anémomètres 'ponctuels' (c'est à dire qui procèdent à une mesure ponctuelle, en général en voûte). Les anémomètres ponctuels peuvent être à moulinet (petite hélice), à fil chaud, ou ultrasoniques. Les anémomètres à moulinet modernes sont robustes et précis, dès que la vitesse de l'air dépasse 0,3 à 0,5 m/s. Ils sont bien adaptés aux mesures en tunnel. Les anémomètres à fil chaud sont en général trop sensibles à leur environnement et ne donnent pas de mesure précise en l'absence d'étalonnage fréquent. Les anémomètres soniques ont l'avantage de n'avoir aucune pièce mobile. L'expérience de certains pays tend à montrer qu'ils sont bien adaptés aux mesures en tunnel.

D'autres types de capteurs existent, les 'débitmètres' (pour reprendre la terminologie des hydrauliciens). Ils sont ainsi nommés parce qu'ils intègrent leur mesure sur une certaine longueur. Ce sont en général des appareils soniques. Leur faisceau de mesure doit être positionné en plafond de façon à ne pas être interrompu par le passage des véhicules. Ces appareils sophistiqués sont encore coûteux à l'investissement et à l'entretien.

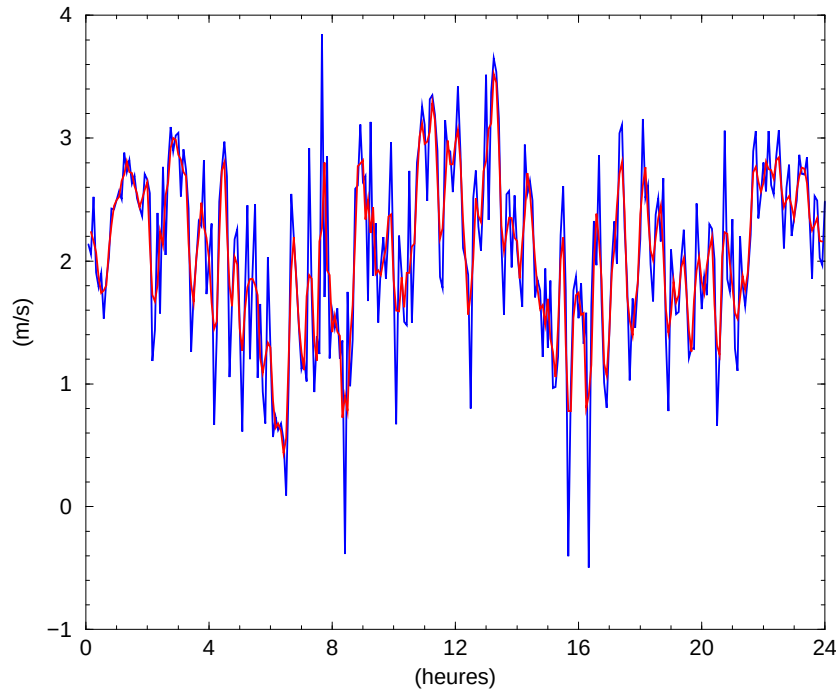


FIG. 5.13 – Enregistrement typique d'un anémomètre ponctuel dans un tunnel bidirectionnel ; courbe bleue : lissage par moyenne flottante sur 5 minutes ; courbe rouge : lissage par moyenne flottante sur 15 minutes.

5.5.2 Exploitation normale

Objectifs de la ventilation en exploitation normale

La ventilation mécanique, quand elle fonctionne, consomme de l'énergie électrique. L'objectif en exploitation normale est donc d'avoir un niveau de pollution inférieur aux seuils admissibles tout en consommant le moins d'énergie possible. Cet objectif ne peut être convenablement rempli que si le système de ventilation est bien conçu.

Niveaux de polluants admissibles

On a vu au chapitre 3 les niveaux de polluants à prendre en compte lors du dimensionnement. En exploitation, le problème est différent du cas du dimensionnement : On dispose à ce stade de données temporelles à partir du signal des instruments de contrôle des niveaux de pollution, ce qui n'était pas le cas au stade du dimensionnement. La consigne de régulation doit être définie de telle sorte que, pour les polluants dont les seuils sont définis sur des périodes de référence, un contrôle a posteriori montre que l'on respecte bien ces seuils.

La stratégie à mettre en place dépend du système de ventilation.

Les différentes méthodes de régulation

Les systèmes de contrôle-commande d'équipements de ventilation qui existent peuvent être classés en deux groupes :

- les systèmes qui mesurent le niveau de pollution dans l'ouvrage considéré, et qui agissent ensuite sur la ventilation pour maintenir ou faire descendre ce niveau en dessous de seuils de régulation préétablis ;
- ceux qui mesurent différents paramètres du trafic pour ensuite, connaissant les caractéristiques du tunnel, en déduire le débit d'air frais nécessaire pour que le niveau de pollution

ne dépasse pas les seuils qui ont été préétablis ; quand on emploie une méthode de régulation de ce type, on vérifie bien sûr en temps réel que les niveaux de pollution restent admissibles, et on augmente le régime de la ventilation si ce n'est pas le cas.

Les systèmes du premier groupe agissent a posteriori. Ils peuvent être à seuils ou à PID (méthode proportionnelle intégrale dérivée). Pour prévenir les risques d'oscillation (qui ont pour conséquence une usure prématurée des équipements à cause de sollicitations 'démarrage / arrêt' répétées des ventilateurs et une consommation électrique excessive), il importe de choisir une méthode qui comporte une certaine temporisation ou une plage de régulation assez large.

Les systèmes du second groupe agissent par anticipation : Le système n'attend pas d'avoir détecté un dépassement de seuil pour agir. Le système est d'autant plus efficace que le recueil des données relatives au trafic est fait suffisamment loin du tunnel pour permettre une bonne anticipation. Ce système nécessite des études spécifiques permettant de corréliser les trafics aux niveaux de pollution attendus.

L'intérêt d'une ventilation fine est très marqué en ventilation transversale, dans laquelle la consommation électrique d'un ventilateur est proportionnelle au cube de son débit. Pour mettre en place une régulation fine, il est en général nécessaire de réaliser des simulations du comportement aérodynamique du tunnel, afin d'assurer une bonne coordination des cantons entre eux et un bon équilibrage entre les puissances consommées par les circuits d'air frais et air vicié.

5.5.3 Réaction aux incidents

Une des principales particularités de la ventilation en tunnel est que le régime pour l'exploitation normale peut être très différent du régime à mettre en place en cas d'incendie.

Quel que soit le type de ventilation installé, il est recommandé que le désenfumage fasse l'objet de régimes de fonctionnement préprogrammés pour faire face aux premières minutes qui suivent l'alerte. Ceux-ci sont déclenchés par l'opérateur s'il y a des moyens humains permettant cette action, ou automatiquement sinon. La commande doit pouvoir être manuelle par la suite et prioritaire sur l'automatisme. Elle doit de préférence se faire depuis le poste de contrôle s'il existe. En l'absence de poste de contrôle, un coffret avec une commande manuelle est installé aux têtes du tunnel pour l'usage des pompiers.

Dans tous les cas, le régime de ventilation approprié au désenfumage doit être opérationnel dans un délai de quelques minutes à partir du moment où la commande est lancée. Le respect de cette condition doit être justifié dans le projet. Elle peut conduire à rejeter certains dispositifs trop lents à réagir. Elle peut éventuellement peser sur l'exploitation de la ventilation en conditions normales, de façon à permettre le passage aux conditions prescrites pour le désenfumage dans un délai suffisamment court.

Le régime mis en oeuvre au moment de l'alerte doit être adapté aux modifications éventuelles des circonstances (développement du feu, effets météorologiques) et aux besoins des services de secours (évacuation des usagers, attaque du feu).

Cas de la ventilation longitudinale sans extraction massive

On distingue plusieurs cas selon le type de tunnel :

Pour un tunnel **unidirectionnel non urbain**, la ventilation doit être mise en fonctionnement aussitôt que possible à un régime permettant d'obtenir au moins la vitesse de courant d'air de dimensionnement (voir § 5.3.1) dans le sens de la circulation ;

Pour un tunnel **unidirectionnel urbain**, on distingue deux cas selon la longueur :

- si la longueur du tunnel ne dépasse pas 500 m, la ventilation doit être mise en oeuvre comme dans le cas précédent ;

- dans le cas contraire, la mise en oeuvre de la ventilation doit être adaptée aux circonstances de la circulation au moment de l'incendie ; si celle-ci n'est pas bloquée, la ventilation doit être mise en oeuvre comme dans le cas précédent ; en présence de blocage¹⁵, dans une première phase, la ventilation doit éviter la déstratification des fumées et autant que possible maintenir un courant d'air réduit (de l'ordre de 1 à 2 m/s) dans le sens de la circulation ; dans une seconde phase, une fois les usagers en lieu sûr, la ventilation doit pouvoir être portée à un régime permettant d'obtenir au moins la vitesse de courant d'air de dimensionnement (voir § 5.3.1) dans le sens de la circulation.

L'exploitation de la ventilation en deux phases en cas de congestion est délicate et n'est possible que pour les tunnels disposant d'un niveau d'équipement et d'exploitation élevés.

Pour un tunnel **bidirectionnel non urbain**, si la ventilation n'est jamais utilisée pour maintenir la qualité de l'air dans les conditions normales d'exploitation, elle doit rester arrêtée en toutes circonstances, et n'être activée que par les services de secours ou d'exploitation lorsqu'ils sont sur place, afin de permettre l'intervention des pompiers.

Si en revanche la ventilation est utilisée pour maintenir la qualité de l'air en dehors du cas de l'incendie, les dispositions suivantes s'appliquent. Dans une première phase, il faut s'efforcer de limiter autant que possible le courant d'air longitudinal afin de maintenir au mieux la stratification des fumées et permettre l'évacuation des usagers ; dans une seconde phase, la lutte contre le feu peut nécessiter que la ventilation fonctionne à un régime suffisant pour pousser toutes les fumées d'un seul côté du foyer (la ventilation doit pouvoir être portée à un régime permettant d'obtenir au moins la vitesse de courant d'air de dimensionnement, voir § 5.3.1). De même que dans le cas unidirectionnel urbain bloqué, la mise en oeuvre de ce système est délicate.

Cas de la ventilation longitudinale avec extraction massive et de la ventilation transversale

Dans ces cas, on ne peut pas énoncer de règles simples valables pour toutes les situations. Des scénarios préprogrammés de désenfumage doivent être conçus spécifiquement pour le tunnel considéré en utilisant des modélisations.

5.6 Ventilation des abris et galeries d'évacuation

5.6.1 Introduction

Les incendies récents en tunnel ont montré l'importance pour la sécurité des usagers de la possibilité d'évacuer le tunnel par un autre cheminement que le tube de tunnel dans lequel a lieu un incendie. L'instruction technique [17] prévoit différents types d'aménagements (voir les schémas de la figure 5.14) :

- communications directes avec l'extérieur ;
- communication entre tubes lorsqu'il y a deux tubes ;
- communication avec une galerie de sécurité parallèle ;
- abris avec cheminement protégé.

¹⁵ On entend par blocage de la circulation le cas où les véhicules sont effectivement arrêtés ou roulent au pas pendant plusieurs minutes consécutives. En revanche, un trafic qui roule à 20 ou 30 km/h en moyenne avec des à-coups ne doit pas être considéré comme bloqué. Le mot de congestion est à ce titre ambigu.

Selon les caractéristiques du tunnel, l'instruction technique [17] précise les aménagements à mettre en place. L'interdistance entre les dispositifs d'évacuation dans le tunnel est fixée par l'instruction technique [17], qui donne aussi leurs caractéristiques géométriques et les critères de choix pour tel ou tel type d'aménagement. Le rôle de la ventilation des dispositifs d'évacuation est de permettre aux usagers de les emprunter en toute sécurité pour gagner l'air libre en cas d'incendie dans le tunnel, ou, dans le cas des abris, d'attendre l'arrivée des services de secours pour être évacués au moyen des cheminements protégés.

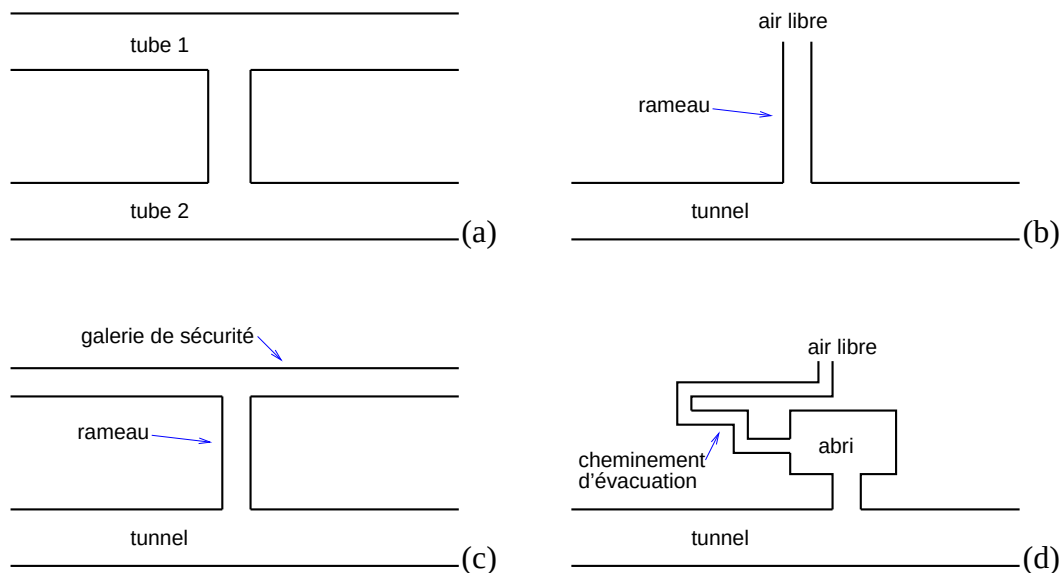


FIG. 5.14 – schéma des différents dispositifs pour l'évacuation des usagers (vue en plan) ; (a) communication entre tubes ; (b) rameau d'évacuation ; (c) galerie de sécurité ; (d) abri avec cheminement d'évacuation.

5.6.2 Dispositions particulières

Cas des communications entre tubes

L'alimentation en air frais des galeries de communication peut se faire ou bien par des gaines indépendantes des tubes du tunnel (figure 5.15a), ou bien par les tubes du tunnel eux-mêmes (figure 5.15b). Dans ce dernier cas, on ne met en marche que le ventilateur qui correspond au tube exempt de fumées. La première solution est recommandée. En effet, elle simplifie la commande des ventilateurs (il n'y a pas à identifier le tube exempt de fumées) et elle permet d'assurer plus facilement la redondance des ventilateurs. Dans les deux cas, la solution la plus simple pour la décompression est de la laisser s'effectuer par des clapets de décompression (cf. § 5.6.3) donnant sur chacun des deux tubes.

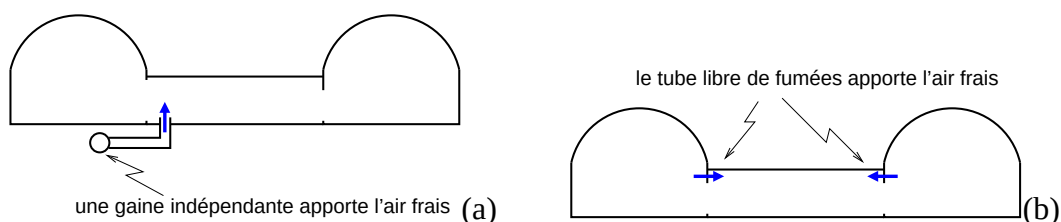


FIG. 5.15 – Alimentation en air frais d'un sas entre deux tubes.

En régime d'exploitation normale, la ventilation doit permettre d'assurer le renouvellement normal de l'air. On retient en général 3 renouvellements par heure pour calculer le débit nécessaire.

En situation de crise, il faut distinguer le cas où les portes sont fermées des cas où les portes sont ouvertes. Quand les portes sont ouvertes, le débit d'air doit être suffisant pour garantir que la vitesse moyenne au droit de chaque porte est de 0,5 m/s dans le sens sas vers tunnel¹⁶. Pour deux portes de 1,40 m sur 2 m, cela conduit donc à un débit de 2,8 m³/s, très supérieur au débit nécessaire en exploitation normale. Dans les cas des intertubes ventilés par une gaine de ventilation indépendante, il est souvent nécessaire de prévoir deux ventilateurs différents pour l'exploitation normale et les situations de crise (ou de mettre en parallèle plusieurs ventilateurs multirégimes).

Le déclenchement de la ventilation se fait soit par l'action du personnel de surveillance du tunnel (afin de s'assurer quel est le tube exempt de fumées) si le niveau de surveillance est suffisant, soit par asservissement au système d'enclenchement automatique du désenfumage dans le cas contraire. Après ce premier déclenchement, seule une opération manuelle peut arrêter la ventilation. Après déclenchement, quand toutes les portes sont fermées, la ventilation servant à garantir un courant d'air suffisant en situation de porte ouverte doit rester en fonctionnement, afin de permettre l'ouverture sans danger d'une porte à tout moment. La communication entre les tubes sera donc en surpression. Il est nécessaire que les portes s'ouvrent dans le sens tunnel vers communication entre les tubes¹⁷ (cf. figure 5.14). Pour que l'effort à fournir pour l'ouverture des portes ne soit pas trop important, il faut limiter la surpression à environ 80 Pa. Il faut donc dimensionner un clapet de dépressurisation qui permette, avec le ventilateur choisi pour assurer les conditions de sécurité porte ouverte, de ne pas avoir plus de 80 Pa de surpression dans la communication entre tubes lorsque les portes sont fermées.

En résumé, la méthode de dimensionnement doit être :

1. déterminer le circuit de ventilation et les ventilateurs nécessaires pour assurer les conditions d'écoulement porte ouverte ;
2. dimensionner le clapet de décompression (en particulier sa perte de charge) pour qu'avec le ventilateur choisi, la surpression porte fermée soit d'environ 80 Pa.

Cas des tunnels avec galerie de sécurité

La ventilation des sas entre le tube du tunnel et une galerie de sécurité est identique à celle des communications entre deux tubes alimentés par une conduite d'air frais indépendante (figure 5.15a). Quand la galerie de sécurité peut être mise en surpression, elle peut elle-même jouer le rôle de gaine. Sinon, la gaine est installée dans la galerie de sécurité.

En l'absence de sas et de communication directe avec l'extérieur, les galeries doivent être ventilées au même niveau que les sas qui leur correspondraient. C'est à dire qu'il faut garantir, en situation de crise, un courant d'au moins 0,5 m/s dans les passages de porte quand les portes sont ouvertes, et une surpression d'environ 80 Pa quand les portes sont fermées.

¹⁶ Cette disposition, calquée sur la réglementation des immeubles de grande hauteur, permet d'éviter que les fumées éventuellement présentes dans le tunnel ne pénètrent dans le sas. En effet, on considère qu'il faut que la vitesse moyenne au droit d'une porte soit au minimum de 0,5 m/s, et comme il y a deux portes équivalentes (une vers chacun des tubes), cela fait une vitesse minimum de 1 m/s lorsqu'une seule porte est ouverte.

¹⁷ Les portes coulissantes sont à exclure, car leur manœuvre n'est pas intuitive.

Cas des rameaux débouchant à l'air libre

Les communications avec l'air libre peuvent être soit de courts escaliers ou cheminements, soit des rameaux relativement longs. Quand un cheminement vers l'air libre a moins de 25 m de long ou un escalier moins de 15 m de haut, il n'est en général pas nécessaire de le ventiler, et on se contente de mettre en place un sas entre le tunnel et le rameau ou l'escalier.

Quand un cheminement dépasse ces longueurs, on l'alimente en général en air frais, ce qui peut se faire au moyen d'une pressurisation du sas avec décompression vers le rameau d'évacuation ou par une mise en surpression de la totalité du rameau.

Cas des installations avec abris

Un schéma typique d'aménagement d'abris est donné figure 5.16.

En régime d'exploitation normale, il faut garantir dans les abris 3 renouvellements d'air par heure.

En situation de crise, il faut garantir que le courant d'air au travers d'une porte ouverte est au moins de 0,5 m/s, soit un débit de 3 240 m³/h pour une porte de 0,90 m sur 2 m. Porte fermée, la surpression doit être d'environ 80 Pa. Par ailleurs, il faut aussi garantir la qualité de l'air pour les personnes réfugiées dans l'abri. L'instruction technique [17] prévoit un débit minimal de 2 500 m³/h par 50 m² de surface au sol de l'abri, porte ouverte ou fermée. De plus, il doit être possible de ventiler simultanément trois abris au moins. La décompression de l'abri se fait en général au travers du sas. Le système de ventilation doit être redondant : en cas de panne d'un ventilateur, la sécurité des usagers doit être assurée.

La méthode de dimensionnement doit donc être (des itérations sont possibles) :

1. déterminer le circuit de ventilation et le ventilateur nécessaire pour assurer les conditions d'écoulement porte ouverte ;
2. dimensionner le clapet de décompression (en particulier sa perte de charge) pour qu'avec le ventilateur choisi, la surpression porte fermée soit d'environ 80 Pa ;
3. vérifier que dans ces conditions le renouvellement d'air porte fermée est suffisant.

Quand des ventilateurs sont installés en abri, il faut prendre soin que leur fonctionnement ne génère pas un niveau de bruit incompatible avec l'utilisation des moyens de communication des abris.

Résistance à la chaleur des abris. L'instruction technique [17] prescrit de plus que la température ambiante dans l'abri et les cheminements d'évacuation ne doit pas dépasser 40 °C pendant le temps fixé pour l'évacuation des abris, même pour un incendie de 200 MW dans les conditions de localisation de l'incendie les plus défavorables, et même si les installations de désenfumage du tunnel ne fonctionnent pas. Cette approche de type 'ingénierie incendie' est parfois très complexe à mettre en oeuvre. Il est en général plus simple de supposer que les températures dans le tunnel suivent la courbe HCM (cf. [17]) et de vérifier que la température dans les abris ne dépasse pas 40°C pendant le temps d'évacuation. D'après l'expérience accumulée lors d'essais en vraie grandeur, cette approche est plus pénalisante que celle basée sur un incendie de 200 MW et la simplification des calculs qui s'ensuit ne se fait donc pas aux dépens de la sécurité.

En outre, il faut vérifier que la température de la face non exposée au feu des parois des abris et des galeries d'évacuation ne dépasse 60 °C pendant le temps nécessaire à l'évacuation des abris pour une température suivant la courbe HCM sur la face exposée à l'incendie.

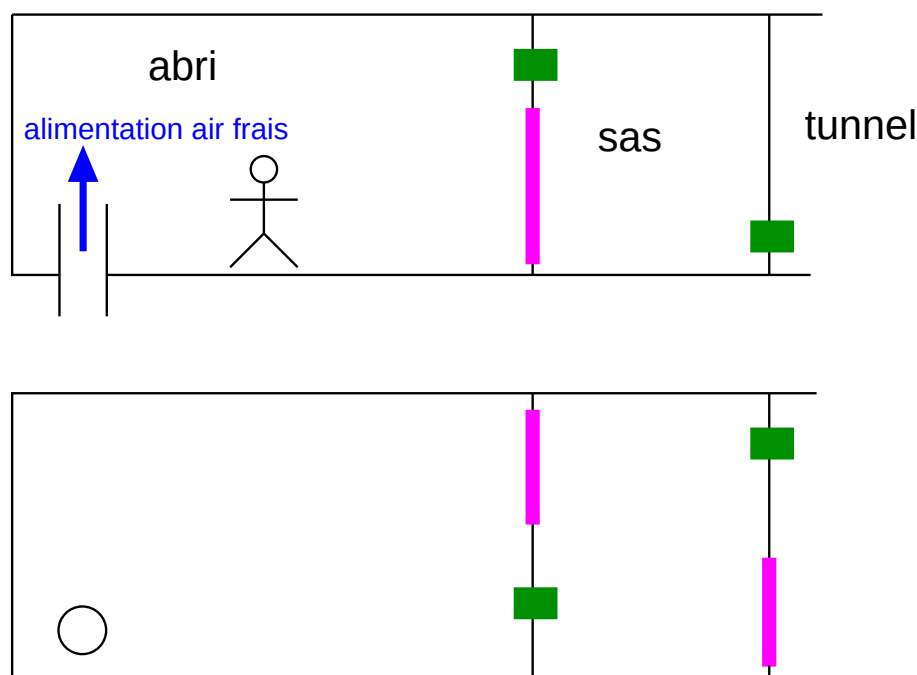


FIG. 5.16 – exemple d'aménagement d'abri, vue de côté et de dessus ; en vert, la localisation des clapets de décompression, en rose celle des portes du sas (la porte de communication avec le cheminement d'évacuation n'est pas figurée).

5.6.3 Les clapets de décompression

Pour effectuer la décompression des dispositifs d'évacuation des usagers tout en garantissant un certain niveau de sécurité en cas de panne de la ventilation de ces dispositifs, on met en place des clapets de décompression. Il n'existe à l'heure actuelle pas de solution parfaite.

Selon les cas, la décompression s'effectue :

- entre le sas et un tube dans lequel peut être présent un incendie,
- ou entre le sas et l'air libre ou une galerie de sécurité.

Dans le premier cas, les clapets de décompression doivent, outre leur dispositif de réglage de débit, être coupe-feu deux heures. Tant que la ventilation de l'abri ou du sas fonctionne, l'effet de jet à travers le clapet permet d'assurer la quasi-totalité de cette fonction pour les échanges de chaleur convectifs et conductifs. Il faut veiller à ce que le rayonnement reçu dans l'abri reste supportable. Si la ventilation cesse de fonctionner malgré la redondance des systèmes, il est souhaitable de conserver une réserve de sécurité qui permette une intervention rapide des services de secours. On installe donc des clapets coupe-feu équipés d'un dispositif (fusible) qui ferme le clapet si la température à proximité immédiate du clapet à l'intérieur du sas ou de l'abri dépasse 70 °C, ce qui ne doit arriver qu'en cas de panne de la mise en surpression.

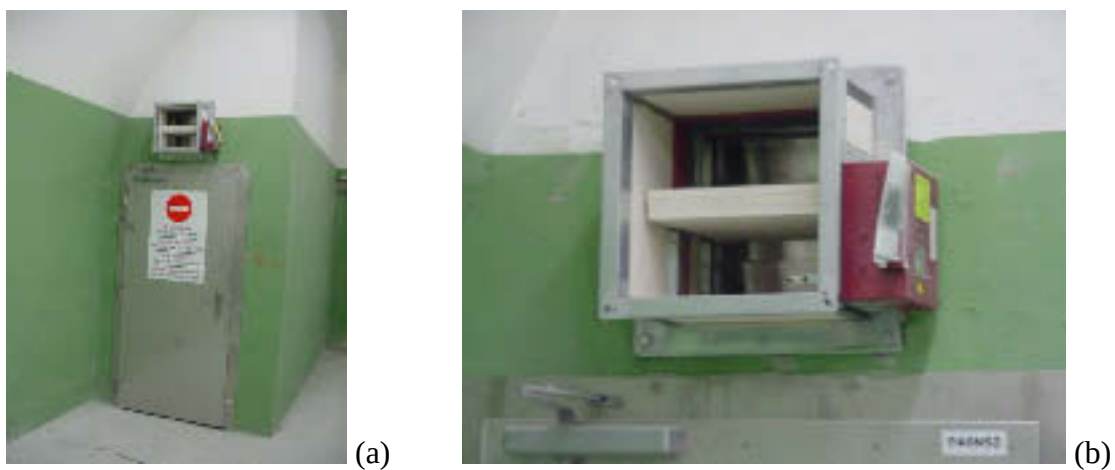


FIG. 5.17 – exemple de clapet de dépressurisation vu de l'intérieur d'un abri ; (a) positionnement du clapet au dessus de la porte de l'abri ; (b) détail du clapet ; on voit sur la figure (b) le panneau en matériau réfractaire en position ouverte ; en cas de rupture du fusible (voir texte), ce panneau se met en position verticale et assure la fonction coupe-feu du clapet en absence de surpression du sas.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Cetu. *Dossier pilote des tunnels : environnement*, 1990. ISBN 2.11.084738-7. 18, 47
- [2] Cetu. *Dossier pilote des tunnels : alimentation électrique*, 1994. ISBN 2.11.084742-1. 14
- [3] Cetu. *Pollution dans les tunnels routiers : quels capteurs utiliser ?*, 1995. ISBN 2-11-084747-6. 88
- [4] Cetu. *Dossier pilote des tunnels : génie civil lié aux équipements et à l'exploitation*, 1998. ISBN 2-11-084743-3. 71, 82, 84
- [5] Cetu. *La mesure anémométrique dans les tunnels routiers*, 1998. 88
- [6] Cetu. *Le traitement de l'air des tunnels routiers*, 1999. 39
- [7] Cetu. *Guide pour la prise en compte de la qualité de l'air au voisinage des tunnels routiers*, 2000. ISBN 2.11-084748-4. 18
- [8] Cetu. *Calcul des émissions de polluants des véhicules automobiles en tunnel*, 2002. 37, 38, 105, 131
- [9] Cetu. *Camatt*, 2003. logiciel unidimensionnel de calcul des écoulements d'air en tunnel. 61, 64, 120, 133
- [10] Cetu. *Les études spécifiques des dangers pour les tunnels du réseau routier*, 2003. fascicule 4 du guide des dossiers de sécurité. 21, 61
- [11] Comité AIPCR pour les tunnels routiers. *Maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers*, 1999. ISBN 2-84060-064-1. 9, 70
- [12] Comité AIPCR pour les tunnels routiers. *Systems and equipments for fire and smoke control in road tunnels*, 2004. traduction française en cours. 55
- [13] F.P. Incropera et D.P. De Witt. *Fundamentals of heat and mass transfer*. Wiley and sons, 1996. ISBN 0471-30460-3. 63
- [14] C. Fediaevski, I. Voïtkounski, and Y. Faddeev. *Mécanique des fluides*. Mir, Moscou, 1974. 78
- [15] A. Haerter, editor. *Aerodynamics and ventilation of road tunnels*. Elsevier Science Publisher, 1991. 81
- [16] I.E. Idelc'ick. *Mémento des pertes de charge*. Eyrolles, 1969. 51, 52, 117
- [17] Ministère de l'équipement, des transports et du logement. *Instruction technique annexée à la circulaire 2000-63*, 2000. ISBN 0984-7138. 9, 11, 14, 17, 19, 20, 21, 25, 26, 27, 31, 36, 45, 46, 47, 49, 67, 68, 71, 74, 75, 79, 83, 87, 90, 93, 94, 96, 104, 107, 114, 128, 130
- [18] P.L. Viollet. *Mécanique des fluides appliquée*. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, 1998. 51, 52, 61

N.B. : les numéros figurés après les ouvrages indiquent les pages où ces derniers sont cités.

ANNEXES : PRÉAMBULE

On se propose dans ces annexes de donner des exemples d'application de la méthode de dimensionnement des installations de ventilation.

L'annexe A développe l'exemple d'un tunnel autoroutier interurbain de 700 m autorisé aux transport de marchandises dangereuses, ventilé longitudinalement. L'annexe B développe l'exemple d'un tunnel urbain unidirectionnel de 1600 m ventilé longitudinalement avec extractions massives. L'annexe C développe l'exemple d'un tunnel interurbain bidirectionnel de 4 km ventilé transversalement, situé sous un massif générant des contre-pressions relativement fortes.

Annexe A

EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT D'UNE INSTALLATION DE VENTILATION LONGITUDINALE

A.1 *Présentation du tunnel*

A.1.1 Caractéristiques de l'itinéraire et du trafic routier

Itinéraire

Le tunnel pris comme exemple est un tunnel creusé à deux tubes unidirectionnels. L'ouvrage, situé sur un itinéraire autoroutier, loin de tout échangeur et agglomération, a une longueur de 700 m et un gabarit de 4,50 m. L'altitude de l'itinéraire est modérée, de l'ordre de 200 m. L'ouverture de ce tronçon autoroutier est prévue pour 2010.

Trafic

La circulation dans chaque tube est unidirectionnelle, sur 2 voies. La vitesse des véhicules est limitée à 110 km/h. Le transport des marchandises dangereuses est autorisé.

A l'horizon 2010, le TMJA prévu est de 15 000 véhicules par sens, avec 18% de poids lourds. La pointe horaire prévue est de 2 200 véhicules par sens dont 3% de poids lourds (pointe de la trentième heure). L'étude de trafic a permis d'identifier un trafic de 'pointe poids lourds' pendant laquelle il y a 300 poids lourds et 600 véhicules légers par heure et par sens. Cette pointe se produit plusieurs heures par semaine.

De même à l'horizon 2020, le TMJA est de 20 000 véhicules par sens, et la pointe horaire de 3 000 véhicules par sens (pointe de la trentième heure). Il y a 4% de poids lourds pendant les pointes de trafic, 20% de poids lourds en moyenne annuelle. L'étude de trafic a permis de montrer que pendant les "pointes poids lourds" il y a un trafic de 500 poids lourds et 800 véhicules légers par heure et par sens. Cette situation se produit plusieurs heures par semaine.

A.1.2 Caractéristiques géométriques du tunnel

Le tunnel considéré a une longueur de 700 mètres, avec une pente constante de 2%. Le tube *ouest* est descendant, le tube *est* montant. La section est de forme voûtée et mesure 70 m². La hauteur maximale sous la voûte est de 6,35 m, et la largeur totale est d'environ 11 m.

A.1.3 Contraintes d'environnement

Le tunnel se situe sur un itinéraire interurbain et peu de problèmes particuliers sont rencontrés. On peut retenir néanmoins les points suivants, outre les problèmes relatifs au chantier de construction du tunnel :

- Les problèmes d'architecture et d'intégration dans le site : la proximité d'un site touristique rend nécessaire une bonne intégration dans le site ;
- Le bruit dû aux installations de ventilation n'est pas une contrainte particulière dans ce projet, et on veillera à respecter les règles de bonne conception habituelles ;
- La pollution : localisée aux têtes de sortie du tunnel, elle ne pourrait gêner que la population très proche de la tête de sortie du souterrain, mais il n'y a pas de bâtiment à moins de 500 m de l'ouvrage.

A.1.4 Exploitation du tunnel

Le niveau de surveillance retenu pour cet ouvrage est le niveau D4 au sens du §5.1.1 de l'instruction technique [17]. La surveillance humaine est permanente et assurée depuis le poste de commandement de l'itinéraire autoroutier situé à une quarantaine de kilomètres. En cas d'incendie, le temps de fermeture des barrières télécommandées sera de moins d'une minute et demie.

A.2 Système de ventilation retenu

Le système de ventilation est choisi essentiellement pour être le plus économique possible tout en tenant compte des questions de sécurité, au travers de l'application de l'instruction technique [17]. On retient un système longitudinal.

Les principaux éléments qui ont conduit à ce choix sont les suivants :

- circulation unidirectionnelle, rendant un système longitudinal adapté à la fois pour la sécurité incendie et pour profiter de la ventilation naturelle due au pistonnement en exploitation normale,
- longueur du tunnel peu importante en site non urbain, ne rendant pas nécessaires des extractions massives.

A.3 Besoins à satisfaire

A.3.1 Désenfumage en cas d'incendie

Le tunnel pris comme exemple est un tunnel à gabarit supérieur à 3,5 m autorisé aux transports de marchandises dangereuses. Comme la ventilation est longitudinale, le critère de dimensionnement est un critère de vitesse de courant d'air : on vise à obtenir un courant d'air égal à 4 m/s pendant le plus longtemps possible, et en tout état de cause, pendant au moins 15 minutes, puis d'au moins 3 m/s pendant les 45 minutes suivantes (voir section 2.3.3).

Le tunnel étant interurbain unidirectionnel, la stratégie sera toujours de mettre en marche la ventilation dès détection d'un incident susceptible de se transformer en incendie. De plus,

comme le tunnel est sur un itinéraire autoroutier, on fera le dimensionnement en supposant le tunnel vide de véhicules sous le vent de l'incendie.

A.3.2 Ventilation sanitaire

Trafic normal

Les seuils de dimensionnement à retenir pour une ouverture en 2010 sont de 0,4 ppm pour le NO₂, 50 ppm pour le CO et une opacité de $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$. Le tunnel n'étant pas situé en agglomération, on retient une pollution de fond négligeable.

Le trafic étant assez différent pour l'heure de pointe et en situation de pointe de trafic poids lourds, il faut calculer les débits d'air frais pour ces deux situations différentes. De plus, sur cet itinéraire interurbain, l'étude de trafic a montré que la grande majorité du trafic poids lourd correspondait à des transports internationaux. On retient un poids lourd moyen de 34 t (voir [8]).

Pour l'horizon 2010, le trafic de pointe VL est de 2 200 véhicules par heure et par sens avec une très faible proportion de poids lourds. D'après le tableau 5.6 page 59, on est en dessous de la saturation. Le trafic peut donc s'écouler à la vitesse maximale de 110 km/s. Cependant, cette situation n'est pas dimensionnante vis à vis de la ventilation sanitaire, car le nombre de véhicules présents en tunnel à un instant donné est très faible et le courant d'air induit par pistonement est fort. On retient donc pour le dimensionnement une vitesse de 70 km/h pour la pointe VL. Le trafic de pointe PL est de 300 PL et 600 VL par heure. On se situe donc nettement en dessous de la saturation du tunnel (voir tableau 5.6). On retient pour la pointe PL une vitesse de référence de 80 km/h, qui est à la fois plus exigeante pour la ventilation mécanique qu'une vitesse plus élevée et plus réaliste pour les poids lourds.

Pour l'horizon 2020, pendant la pointe VL, le trafic est de 3 000 véhicules par heure pour 2 voies avec une très faible proportion de PL. D'après le tableau 5.6 page 59, le tunnel est en limite de saturation, et la vitesse à retenir est de 70 km/h. Pendant la pointe PL, le trafic est de 500 PL par heure et 800 VL par heure, soit environ 2 000 UVP par heure (voir tableau 5.5 page 58). Le tableau 5.6 montre que le trafic n'est pas saturé. De même que pour l'horizon 2010, on retient une vitesse de référence de 80 km/h pour la pointe PL.

Tous calculs faits, les débits d'air frais nécessaires sont donnés dans le tableau A.1. On retient pour le dimensionnement la plus élevée de ces valeurs, c'est à dire un débit de 126 m³/s (ce qui correspond à un courant d'air de moins de 2 m/s) pour le tube est et de 67 m³/s (ce qui correspond à un courant d'air de moins de 1 m/s) pour le tube ouest.

	horizon 2010			horizon 2020		
	NO ₂	CO	opacité	NO ₂	CO	opacité
tube est (montant)						
trafic de pointe VL	38 m ³ /s	7,5 m ³ /s	18 m ³ /s	43 m ³ /s	6 m ³ /s	14 m ³ /s
trafic de pointe PL	97 m ³ /s	7,5 m ³ /s	23 m ³ /s	126 m ³ /s	7,5 m ³ /s	15 m ³ /s
tube ouest (descendant)						
trafic de pointe VL	21 m ³ /s	4 m ³ /s	12 m ³ /s	23 m ³ /s	3,5 m ³ /s	10 m ³ /s
trafic de pointe PL	52 m ³ /s	4 m ³ /s	15 m ³ /s	67 m ³ /s	4 m ³ /s	11 m ³ /s

TAB. A.1 – Débits d'air frais nécessaires pour la ventilation sanitaire, pour la pointe de trafic VL et la pointe de trafic PL.

En situation de blocage accidentel

En situation de blocage accidentel, comme le tunnel est en milieu interurbain, on retient une densité de 120 UVP par kilomètre et par voie. Les émissions sont calculées pour un trafic à l'arrêt, avec les deux pointes (VL et PL) considérées séparément. Les niveaux maximaux à respecter sont de 150 ppm pour le CO et 9.10^{-3} m^{-1} pour l'opacité. Les résultats sont donnés dans le tableau A.2. La plus élevée de ces valeurs conduit à un courant d'air inférieur à 0,5 m/s.

	horizon 2010		horizon 2020	
	CO	opacité	CO	opacité
trafic de pointe VL	3 m ³ /s	6 m ³ /s	1 m ³ /s	4 m ³ /s
trafic de pointe PL	6 m ³ /s	36 m ³ /s	4 m ³ /s	19 m ³ /s

TAB. A.2 – Débit d'air frais et vitesse de courant d'air nécessaires pour la ventilation sanitaire, pour la pointe de trafic VL et la pointe de trafic PL ; les véhicules étant à l'arrêt, les deux tubes ont les mêmes besoins en air frais.

A.3.3 Extraction d'air vicié

Le rejet d'air vicié aux têtes de sortie est très faible et n'induit pas de niveaux de pollution inacceptables dans l'environnement. Il n'est donc pas prévu d'extraction mécanique d'air vicié.

A.4 Conception et dimensionnement de la ventilation

A.4.1 Éléments de dimensionnement

Pertes de charge en tunnel

Les données aérauliques générales utilisées dans les calculs de pertes de charge sont regroupées dans le tableau A.3

masse volumique de l'air	ρ	1,2 kg/m ³
diamètre hydraulique du tunnel	D_H	8,75 m
coefficient de perte de charge à l'entrée du tunnel	ξ_e	0,5
coefficient de perte de charge à la sortie du tunnel	ξ_s	1
coefficient de perte de charge linéique dans le tunnel	λ_c	0,025 (1)

TAB. A.3 – Données aérauliques générales ; (1) présence de nombreux équipements en tunnel.

Le tableau A.4 donne le nombre total de véhicules bloqués dans un tube en cas d'incendie pour un temps de fermeture d'une minute et demie selon l'abscisse de l'incendie comptée à

partir de l'entrée. On a retenu pour ce calcul un taux d'occupation maximal de 120 véhicules par kilomètre.

En situation d'exploitation normale comme en situation d'incendie, on retient $C_x \Sigma = 0,9 \text{ m}^2$ pour les VL et $C_x \Sigma = 4,5 \text{ m}^2$ pour les PL. Le pourcentage de PL retenu pour le cas d'incendie est de 18 % (correspondant au pourcentage en moyenne annuelle, car il n'y a a priori pas corrélation entre pointes de trafic et occurrence d'incendie).

X_{incendie} (m)	100	200	300	400	500	600	700
N_{bl}	12	24	36	48	60	72	84

TAB. A.4 – Nombre de véhicules bloqués en fonction de l'abscisse de l'incendie pour un temps de fermeture d'une minute et demie.

Effet cheminée

Le tunnel présente une pente constante de 2% sur toute sa longueur. L'effet cheminée sera donc toujours moteur dans le tube est, et adverse dans le tube ouest.

Contre-pressions atmosphériques

Le tunnel considéré se situe sur une zone déjà bien étudiée, et l'on sait que

- pour le tube est, la contre-pression adverse non dépassée 10% du temps est de 15 Pa, et la contre-pression adverse non dépassée 5% du temps est de 25 Pa,
- pour le tube ouest, la contre-pression adverse non dépassée 10% du temps est de 25 Pa, et la contre-pression adverse non dépassée 5% du temps est de 35 Pa

La dissymétrie est due au régime des vents dominants.

A.4.2 Détermination des poussées à installer

En raison des effets thermiques, la position des accélérateurs a une incidence sur la poussée totale à installer. Comme le tunnel est autorisé aux transports de marchandises dangereuses, les températures atteintes en cas d'incendie pourront être très élevées à proximité de l'incendie. Pour permettre un dimensionnement au plus juste, on s'autorise la mise en place d'une batterie d'accélérateurs juste à l'entrée du tunnel. Ainsi, ou bien cette batterie fonctionne dans l'air frais et développe sa pleine poussée, ou bien, si l'incendie est situé juste avant cette batterie dans le sens de la circulation, la vitesse critique peut ne pas être atteinte, mais l'éventuel refoulement des fumées ne met pas en danger les usagers, qui sont à proximité immédiate de l'air libre.

Ventilation en cas d'incendie

Dans les lignes qui suivent, et dans un but pédagogique, trois dimensionnements différents sont réalisés : le premier en utilisant la réserve forfaitaire proposée au §3.2.2.a de l'instruction technique [17], le second en prenant en compte dans le calcul l'échauffement de l'air avec la méthode simplifiée, et le troisième en utilisant le logiciel Camatt pour prendre en compte le réchauffement de l'air.

a) dimensionnement sur la base de la réserve forfaitaire

Pour le dimensionnement utilisant la réserve forfaitaire, telle que prévue au § 3.2.2.a de l'instruction technique [17], on suppose que le tunnel est équipé d'accélérateurs uniformément répartis en 5 batteries.

Les effets thermiques de l'incendie sont pris en compte en ce qui concerne l'effet cheminée et l'augmentation de frottement due à la dilatation. En revanche, ils ne sont pris en compte

ni pour la perte d'efficacité des accélérateurs ni pour leur destruction. La poussée trouvée par ce calcul est ensuite augmentée forfaitairement de 50 %. Pour le calcul de la température, on utilise la méthode de la section 5.3.1.

Pour le tube montant (tube est), les effets cheminée sont favorables, et donc le cas le plus défavorable est celui d'un incendie situé à la sortie du tunnel. Pour le tube descendant au contraire, les effets cheminée sont défavorables, et donc le cas le plus défavorable est celui d'un incendie situé à l'entrée du tunnel. Le dimensionnement est fait à partir de ces deux cas.

Les résultats des calculs sont donnés dans le tableau ci dessous.

tube montant (tube est)		tube descendant (tube ouest)	
15 Pa, 4 m/s	25 Pa, 3 m/s	25 Pa, 4 m/s	35 Pa, 3 m/s
11500 N	12 500 N	25 000 N	25 500 N

D'après ce calcul, on peut donc retenir pour le tube montant 5 batteries de 2 accélérateurs de 1 250 N et pour le tube descendant 7 batteries de 3 accélérateurs de 1 250 N.

b) dimensionnement sur la base de la méthode simplifiée

De même que pour le dimensionnement sur la base de la méthode forfaitaire, on suppose ici que les batteries sont réparties de façon uniforme dans le tunnel.

Les effets thermiques de l'incendie sont pris en compte en ce qui concerne l'effet cheminée, l'augmentation de frottement due à la dilatation, la perte d'efficacité des accélérateurs et leur destruction. Pour le calcul de la température, on utilise la méthode de la section 5.3.1.

On dimensionne la ventilation pour que le courant d'air de dimensionnement soit de 4 m/s pendant 120 min.

Les résultats des calculs sont donnés dans le tableau ci dessous.

tube montant (tube est)		tube descendant (tube ouest)	
15 Pa, 4 m/s	25 Pa, 3 m/s	25 Pa, 4 m/s	35 Pa, 3 m/s
15600 N	15 600 N	36 000 N	56 000 N

Ce calcul conduit à retenir, par exemple, 4 batteries de 3 accélérateurs de 1 300 N pour le tube montant, et 7 batteries de 4 accélérateurs de 2 000 N pour le tube montant (des machines de 2 000 N ne sont pas courantes, et si une solution visant une poussée totale de 56 000 N était retenue, on essaierait de mettre en place des batteries plus nombreuses d'accélérateurs moins puissants ; en tout état de cause, on verra ci-dessous qu'un dimensionnement moindre est possible).

La valeur de 56 000 N trouvée pour le tube descendant vient du fait que dans ce cas, le calcul donne que 3 batteries (sur 7) sont systématiquement détruites.

Un calcul en utilisant la méthode simplifiée mais pour un courant d'air de 3 m/s pendant 60 min seulement donne les mêmes poussées nécessaires, dans le cas de ce tunnel (car d'un côté les frottements sont plus faibles, mais de l'autre l'air est plus chaud et donc la perte d'efficacité des accélérateurs est plus grande ; dans le cas présent, les deux effets se compensent).

c) dimensionnement en utilisant le logiciel Camatt et une durée de référence de 120 minutes

Ce troisième dimensionnement est fait en utilisant le logiciel Camatt qui permet de calculer l'évolution dans le temps de la vitesse et la température de l'air pour un équipement donné dans le tunnel. L'interface simple d'emploi du logiciel permet en outre de tester facilement de très nombreuses configurations pour la disposition des batteries dans le tunnel.

On retient encore un dimensionnement de la ventilation tel que le courant d'air soit de 4 m/s pendant 120 min pour une contre-pression adverse non dépassée plus de 10 % du temps, et de 3 m/s pendant 120 min pour une contre-pression adverse non dépassée plus de 5 % du temps.

Les calculs Camatt conduisent à retenir les dispositions suivantes pour le tube montant :

- première batterie : 2 accélérateurs de 1 250 N immédiatement à l'entrée du tunnel (plus précisément, à 25 m de l'entrée dans les calculs),
- deuxième batterie : 2 accélérateurs de 1 250 N à 325 m de l'entrée,
- troisième batterie : 2 accélérateurs de 1 250 N à 525 m de l'entrée,
- quatrième batterie : 2 accélérateurs de 1 250 N à 625 m de l'entrée.

On obtient donc le dimensionnement nécessaire avec une poussée de 10 000 N.

Les calculs Camatt conduisent à retenir la disposition suivante pour le tube descendant :

- première batterie : 4 accélérateurs de 1 250 N immédiatement à l'entrée du tunnel (plus précisément, à 25 m de l'entrée dans les calculs),
- deuxième batterie : 3 accélérateurs de 1 250 N à 125 m de l'entrée,
- troisième batterie : 3 accélérateurs de 1 250 N à 225 m de l'entrée,
- quatrième batterie : 3 accélérateurs de 1 250 N à 425 m de l'entrée,
- cinquième batterie : 4 accélérateurs de 1 250 N à 525 m de l'entrée,
- sixième batterie : 4 accélérateurs de 1 250 N à 625 m de l'entrée.

On obtient donc le dimensionnement nécessaire avec une poussée de 26 250 N.

d) dimensionnement en utilisant le logiciel Camatt et une durée de référence de 15+45 minutes

On retient encore un dimensionnement de la ventilation tel que le courant d'air soit de 4 m/s pendant 15 min et de 3 m/s pendant au moins 45 min supplémentaires pour des contre-pressions adverses non dépassées plus de 10 % du temps, et 3 m/s pendant 60 minutes pour des contre-pressions adverses non dépassées plus de 5 % du temps.

Les calculs Camatt conduisent à retenir les dispositions suivantes pour le tube montant :

- première batterie : 2 accélérateurs de 1 250 N immédiatement à l'entrée du tunnel (plus précisément, à 25 m de l'entrée dans les calculs),
- deuxième batterie : 2 accélérateurs de 1 250 N à 325 m de l'entrée,
- troisième batterie : 2 accélérateurs de 1 250 N à 525 m de l'entrée,
- quatrième batterie : 1 accélérateur de 1 250 N à 625 m de l'entrée.

On obtient donc le dimensionnement nécessaire avec une poussée de 8 750 N.

Les calculs Camatt conduisent à retenir la disposition suivante pour le tube descendant :

- première batterie : 4 accélérateurs de 1 250 N immédiatement à l'entrée du tunnel (plus précisément, à 25 m de l'entrée dans les calculs),
- deuxième batterie : 2 accélérateurs de 1 250 N à 325 m de l'entrée,
- troisième batterie : 3 accélérateurs de 1 250 N à 425 m de l'entrée,
- quatrième batterie : 4 accélérateurs de 1 250 N à 525 m de l'entrée,
- cinquième batterie : 4 accélérateurs de 1 250 N à 625 m de l'entrée.

On obtient donc le dimensionnement nécessaire avec une poussée de 21 250 N.

Le choix du dimensionnement à retenir dépend des contraintes particulières du tunnel considéré. Dans la pratique, si le tunnel n'a pas de contraintes particulières, on retiendra le dimensionnement du c), alors que si des contraintes particulières existent ou si le tunnel est peu sensible vis à vis des transports de marchandises dangereuses, on peut se contenter du dimensionnement du d).

En tout état de cause, il y a toujours intérêt à utiliser un logiciel de calcul anisotherme

transitoire pour déterminer la poussée nécessaire et la localisation des accélérateurs associée¹.

Ventilation sanitaire

Comme on a pu le voir dans le tableau A.1, le débit maximal à installer en tunnel pour la ventilation sanitaire est de 126 m³/s, ce qui correspond à un courant d'air de moins de 2 m/s.

Le dimensionnement de la poussée totale à installer en tunnel dans le cas du désenfumage est basé sur une vitesse de courant d'air de 4 m/s, supérieure aux besoins en ventilation sanitaire. La poussée totale déterminée dans le paragraphe précédent est donc suffisante².

A.4.3 Dispositions pratiques

Le tunnel étant voûté, les batteries d'accélérateurs sont disposées dans l'espace laissé libre entre le gabarit routier et la voûte. Lors de l'installation des accélérateurs composant la batterie, on doit veiller à respecter un écartement suffisant (au minimum 50 cm) entre les machines pour faciliter les opérations de maintenance. De plus, pour que les accélérateurs fonctionnent le plus correctement possible, il est recommandé de les éloigner de la voûte (au moins 30 cm).

Les accélérateurs retenus ont les caractéristiques suivantes :

- Diamètre de la virole : 1,20 m
- Diamètre de l'insonorisation : 1,40 m
- Longueur de la virole : 0,9 m
- Longueur d'une insonorisation : 1,275 m
- Longueur totale de la machine : 3,45 m
- Masse : 1 200 kg
- Poussée nominale : 1 250 N
- Vitesse de soufflage : 30 m/s
- Vitesse de rotation : 1 500 t/min
- Niveau sonore : 68 dBA à 10 mètres dans l'axe de soufflage
- Puissance nominale : 30 kW
- Résistance au feu : 400°C 2 heures

La hauteur du châssis-support est de 30 centimètres. La hauteur totale de l'ensemble machine, châssis-support et accrochage à la voûte est de 1,80 m. Un profil en travers typique est donné sur la figure A.1.

A.4.4 Commande de la ventilation

Exploitation normale

La ventilation sanitaire est asservie aux niveaux de pollution en tunnel. Ces niveaux sont donnés par des capteurs. On installera dans chaque tube :

- 2 capteurs de CO,
- 2 capteurs de NO,
- 2 opacimètres.

¹ En effet, un tel logiciel permet de raisonner en prenant en compte la poussée réelle des accélérateurs dans de l'air encore relativement frais au début de l'incendie, alors que les calculs basés sur la méthode simplifiée considèrent que la vitesse de l'air est égale à la vitesse de dimensionnement pendant toute la durée de l'incendie.

² Dans le cas du trafic fluide, on peut montrer par le calcul que les débits nécessaires pour ne pas dépasser les seuils de pollution admissibles sont atteints sans ventilation mécanique grâce au pistonement des véhicules.

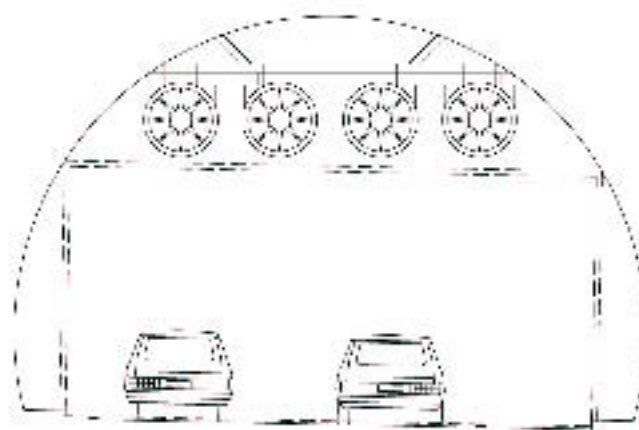


FIG. A.1 – Profil en travers au droit d'une batterie.

Deux anémomètres seront aussi installés dans chaque tube ; un seul serait suffisant, mais la présence de deux appareils permet d'éliminer plus facilement les valeurs aberrantes et de pallier la destruction de l'un d'eux en cas d'incendie.

On retiendra a priori une régulation par seuil visant à maintenir le taux de pollution à l'intérieur d'une plage compatible avec les prescriptions. Le choix effectif de la méthode de régulation sera fait ultérieurement.

Exploitation en cas d'incendie

Dans le cas d'un incendie, un seul scénario est a priori à utiliser : mise en route des accélérateurs à leur régime maximal pour repousser toutes les fumées dans le sens de la circulation. Le niveau de surveillance étant D4, ce démarrage se fera sur action de l'opérateur, qui dispose pour détecter les incendies des informations de la vidéo, de la DAI, des postes d'appel d'urgence et des alarmes pollution.

A.5 Ventilation des dispositifs d'évacuation

L'ouvrage considéré est un tunnel interurbain de 700 m de long. Il doit donc être équipé d'un aménagement d'évacuation des usagers, environ au milieu de l'ouvrage.

Les contraintes propres à l'ouvrage et qui ne sont pas dues à des considérations de ventilation font qu'il est très difficile d'aménager des communications directes avec l'extérieur, et que la mise en place d'un intertube a été retenue.

Cet intertube est ventilé à partir d'une gaine d'air frais placée sous la chaussée de l'un des tubes (voir figure 5.15a). Le débit d'air frais nécessaire en situation d'incendie est de $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Il est assuré par deux ventilateurs (un normal et un de secours) placés en local technique en tête de tunnel. La surpression d'environ 80 Pa est assurée par un clapet de décompression en direction de chacun des tubes.

Annexe **B**

EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT D'UNE INSTALLATION DE VENTILATION LONGITUDINALE AVEC EXTRACTION MASSIVE

B.1 *Présentation du tunnel*

B.1.1 Caractéristiques de l'itinéraire et du trafic routier

Itinéraire

Le tunnel pris comme exemple est une tranchée couverte urbaine unidirectionnelle de 1 600 m de longueur débouchant directement sur un axe autoroutier pré-existant. Le gabarit est de 4,50 m. L'altitude de l'ouvrage est faible (moins de 100 m). L'ouverture du tunnel est prévue pour 2010.

Trafic

La circulation dans le tunnel est unidirectionnelle, sur 2 voies. La vitesse des véhicules est limitée à 50 km/h. Les poids lourds constituent 11 % du trafic total exprimé en véhicules (et non en UVP), et les transports de marchandises dangereuses sont interdits.

Les données de trafic principales pour les horizons 2010 à 2020 sont regroupées dans le tableau B.1.

vitesse des véhicules (km/h)	0	10	50
trafic horaire par voie (UVP/h)	0	1100	2000
taux d'occupation du tunnel (UVP/km)	170	110	40

TAB. B.1 – *Données de trafic*

Dans l'hypothèse où le tunnel doit être fermé à la circulation, le nombre de véhicules bloqués est composé (voir §B.4.1) :

- des véhicules présents dans le tunnel à l'instant t ,
- des véhicules qui pénètrent dans le tunnel avant sa fermeture à la circulation ; leur nombre dépend donc du temps de fermeture.

	Tronçon 1	Tronçon 2
longueur	800 m	800 m
largeur	9 m	9 m
hauteur	6,5 m	5 m
section	58,5 m ²	45 m ²
déclivité	-2 %	+ 1 %

TAB. B.2 – Caractéristiques géométriques du tunnel.

B.1.2 Caractéristiques géométriques du tunnel

Le tableau B.2 donne les caractéristiques géométriques du tunnel, composé de 2 tronçons principaux (représentés sur la figure B.1).

B.1.3 Contraintes d'environnement

Le tunnel se situe en site urbain. Des problèmes particuliers peuvent donc être rencontrés lors des différentes phases allant de la réalisation jusqu'à la mise en service de l'ouvrage. On peut citer par exemple, outre les problèmes relatifs au chantier de construction du tunnel :

- Les problèmes d'architecture et d'intégration dans le site : la proximité de monuments classés entraîne le respect de certaines règles architecturales. L'implantation des stations d'extraction par exemple nécessite un volume utile important, souvent incompatible avec les réseaux souterrains existants. Les cheminées d'extraction doivent se fondre dans l'aménagement urbain.
- Le bruit : les machines en fonctionnement dans les stations d'extraction doivent être équipées d'insonorisation telles que le bruit émergent ne soit pas une gêne insupportable pour les riverains situés à proximité. Dans notre exemple, les machines ne doivent fonctionner qu'exceptionnellement lors d'un incendie, ce qui limite d'autant les nuisances sonores.
- La pollution : localisée à la tête de sortie du tunnel, elle peut gêner la population voisine qui se trouve proche de la tête de sortie du souterrain. Des études sur maquettes peuvent être réalisées afin de mesurer les taux de pollution susceptibles d'être atteints, relevés près des habitations.
- Les fumées d'incendie : des précautions doivent être prises pour empêcher l'accès aux baies de refoulement.

B.1.4 Exploitation du tunnel

Le niveau de surveillance retenu pour cet ouvrage est le niveau D4 au sens du §5.1.1 de l'instruction technique [17]. La surveillance humaine est permanente et assurée depuis un poste de commandement situé à quelques centaines de mètres du tunnel. En cas d'incendie, le temps de fermeture des barrières télécommandées est fixé à 2 minutes environ.

L'exploitation du tunnel est commune à divers ouvrages (PC commun).

B.2 Système de ventilation retenu

Le choix du système de ventilation est arrêté en fonction des contraintes liées au site (urbain) et des exigences de la réglementation (en particulier l'instruction technique [17]). En particulier,

- la circulation est unidirectionnelle, ce qui privilégie les systèmes longitudinaux,
- ce choix est renforcé par la difficulté voire l'impossibilité d'implanter des gaines de ventilation en plafond en continu ou en piédroit (contraintes géométriques propres au tunnel considéré),
- la longueur du tunnel est importante (supérieure à 800 m), ce qui implique pour un système longitudinal la mise en place d'extractions massives.

Par conséquent, le système de ventilation longitudinal avec 2 extractions massives est retenu. Il s'agit donc d'un tunnel comportant 3 cantons de ventilation, qui seront numérotés de 1 à 3 de l'entrée vers la sortie. Ils présentent des longueurs respectives de 450, 700 et 450 m. La figure B.1 représente schématiquement les équipements de ventilation sur le profil en long du tunnel.

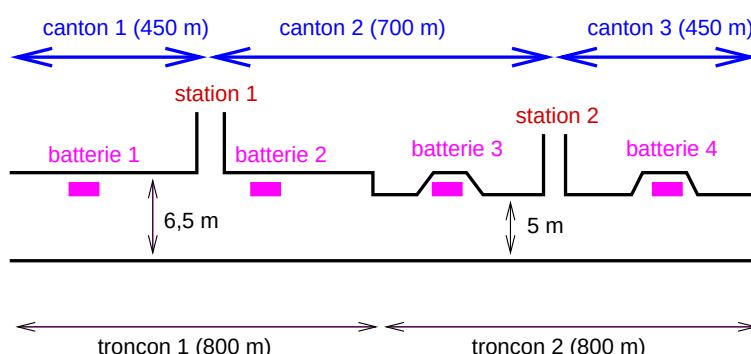


FIG. B.1 – Profil en long schématique du tunnel considéré, avec le repérage des cantons de ventilation, des batteries de ventilateurs et des stations d'extraction massive.

B.3 Besoins à satisfaire

B.3.1 Désenfumage en cas d'incendie

Le tunnel considéré est un tunnel à gabarit supérieur à 3,5 m, interdit aux transports de marchandises dangereuses. La puissance totale de l'incendie de dimensionnement est donc de 30 MW, et la puissance convectée, utilisée pour le dimensionnement de la ventilation, de 20 MW.

En l'absence de congestion à l'aval du foyer, la stratégie de désenfumage pour l'ensemble du tunnel est de mettre en route d'une part tout ou partie des accélérateurs et d'autre part la station d'extraction massive immédiatement à l'aval de l'incendie, sauf lorsque l'incendie se situe dans le canton n°3 (les fumées s'échappent alors par la tête de sortie). Le choix des batteries et de la station d'extraction à mettre en marche dépend de la position de l'incendie (voir §B.4.4). On doit respecter les conditions de courant d'air suivantes :

- une vitesse minimale de 3 m/s à l'amont de l'incendie, dans le sens du trafic,
- une vitesse minimale de 1 m/s entre la tête de sortie du tunnel et l'extraction, dans le sens inverse du trafic.

En situation de blocage du trafic à l'aval du foyer (véhicules bloqués dans tout le tunnel en cas de sur-accident ou de difficultés de circulation à l'aval), la stratégie du désenfumage est identique à la précédente pour les cantons de longueur inférieure à 500 m et est décomposée en deux phases comme indiqué ci-après pour les cantons de longueur supérieure à 500 m :

- 1ère phase : on s’efforce de maintenir un courant d’air de vitesse réduite (de 1 à 2 m/s) afin de permettre une certaine stratification des fumées pendant la phase d’évacuation du tunnel par les usagers bloqués. Dans le respect de cet objectif principal, on cherchera, dans toute la mesure du possible, à maintenir ce faible courant d’air dans le sens de la circulation de façon à limiter le reflux des fumées vers l’amont du foyer.
- 2ème phase : une fois les usagers sortis du tunnel, on désenfume le tunnel selon la même stratégie que dans la situation de trafic normal décrite ci-dessus.

B.3.2 Ventilation sanitaire

Les seuils de dimensionnement à retenir pour une ouverture en 2010 sont de 0,4 ppm pour le NO₂, 50 ppm pour le CO et une opacité de 5.10^{-3} m^{-1} pour le trafic fluide. En cas de blocage accidentel, les seuils sont de 150 ppm pour le CO et de 9.10^{-3} m^{-1} pour l’opacité. Ceci permet de déterminer les débits d’air qui seront nécessaires pour assurer une bonne dilution des polluants.

La pollution de fond a été estimée à 5 ppm de CO, 0,05 ppm de NO₂, et $0,3.10^{-3} \text{ m}^{-1}$ en opacité.

Le calcul s’effectue à partir des valeurs d’émissions unitaires des véhicules moyens et en fonction du nombre de véhicules présents par unité de longueur du tunnel.

Les trafics horaires, la proportion de poids lourds et les données géométriques du tunnel ont été données ci-dessus.

On obtient ainsi les débits d’air frais nécessaires présentés dans le tableau B.3 pour l’horizon 2010. Les besoins en air frais pour l’horizon 2020 sont plus faibles, car le trafic ne croît pas alors que les émissions unitaires décroissent fortement.

	NO ₂	CO	opacité
blocage accidentel	(sans objet)	9 m ³ /s	29 m ³ /s
trafic congestionné (10 km/h)	153 m ³ /s	48 m ³ /s	88 m ³ /s
trafic fluide (50 km/h)	151 m ³ /s	24 m ³ /s	72 m ³ /s

TAB. B.3 – Besoins en air frais à l’horizon 2010

Dans le tunnel considéré, les cas de trafic fluide (vitesse des véhicules de 50 km/h) et de trafic congestionné imposent des besoins en air frais comparables. Le débit d’air à assurer est de 153 m³/s, ce qui, ramené à la section des divers tronçons, donne une vitesse de courant d’air de 2,6 m/s et de 3,35 m/s.

Dans le cas du trafic fluide, ces vitesses sont atteintes sans ventilation mécanique grâce au pistonnement des véhicules. On se concentrera donc sur le cas de trafic congestionné pour lequel le pistonnement des véhicules ne permet pas de garantir les vitesses de courant d’air nécessaires à la bonne dilution des polluants.

B.3.3 Extraction d’air vicié

Le rejet d’air vicié en sortie de tunnel n’induit pas de risques de pollution inacceptable dans l’environnement, il n’est donc pas prévu d’extraction mécanique d’air vicié.

B.4 Conception et dimensionnement de la ventilation

B.4.1 Éléments de dimensionnement

Pertes de charge en tunnel

Les données aérauliques générales utilisées dans les calculs de pertes de charge sont les suivantes :

- vitesse de courant d'air de dimensionnement : 3 m/s ;
- coefficient de pertes de charges frictionnelles : $\lambda=0,025$ (du fait des nombreux équipements en tunnel) ;
- coefficient de perte de charge singulière à l'entrée du tunnel : $\xi_e=0,5$;
- coefficient de perte de charge singulière à la sortie du tunnel : $\xi_s=1$;
- diamètre hydraulique du tronçon 1 : 7,5 m ;
- diamètre hydraulique du tronçon 2 : 6,4 m.

Les pertes de charge évoluant en fonction de la température et de la vitesse de l'air, leur calcul doit s'effectuer en fonction des conditions propres à chaque type de ventilation, sanitaire ou incendie.

Pour le changement de section brusque entre les tronçons 1 et 2, on utilise par exemple le mémento [16] afin de déterminer le coefficient de perte de charge, et on trouve $\xi = 0,15$.

Le tunnel exemple présente une rampe de 1 % sur le tronçon 2 de longueur 800 m. Dans le cas où un incendie se produirait à environ 400 m de la sortie du tunnel, l'effet cheminée tendra donc à faire remonter les fumées dans le sens du trafic vers la sortie du tunnel.

La masse volumique de l'air ρ dépend de la température de l'air. Pour un feu de 30 MW de puissance totale et une vitesse de courant d'air à l'amont du foyer de 3 m/s, la température moyenne de l'air juste sous le vent du foyer est de 120°C soit 393 K. A cette température, $\rho = 0,90 \text{ kg/m}^3$.

Suivant le nombre de véhicules présents en tunnel, les pertes de charge induites par les véhicules sont plus ou moins importantes, ce qui influe directement sur l'écoulement de l'air. De la même manière, le pistonnement induit par les véhicules entrants génèrera un flux d'air non négligeable durant les premiers instants de développement de l'incendie. Le tableau B.4 donne le nombre total de véhicules bloqués en tunnel en fonction de l'abscisse de l'incendie pour un trafic total de 2 000 UVP/h, soit 1 700 véh/h.

Pour calculer la perte de charge causée par ces véhicules, on utilise la formule de la section 5.2.4 page 53, avec $C_x \Sigma \approx 0,9 \text{ m}^2$ pour les VL et $C_x \Sigma \approx 4,5 \text{ m}^2$ pour les PL.

Contre-pressions atmosphériques

Suivant le site et l'orientation du tunnel, les contre-pressions générées par le vent peuvent s'avérer favorables ou défavorables. Dans le cas présent, les contre-pressions peuvent jouer un rôle moteur aussi bien qu'un rôle résistant et peuvent être défavorables pour le contrôle du courant d'air dans les deux cas. En effet, l'effet néfaste du vent peut s'exercer dans les deux directions : à contresens de la circulation, il s'oppose à la poussée des accélérateurs ; dans le sens de la circulation, il s'oppose au courant d'air frais devant s'établir en sens opposé entre la tête de sortie du tunnel et l'extraction massive. L'intervalle de temps de référence (contre-pressions défavorables non dépassées pendant 95 % du temps) est donc à partager entre les deux sens. Dans le cas présent, cet intervalle est découpé en deux parties égales. Dans certains cas très critiques, il peut être intéressant de faire une étude de sensibilité.

abscisse de l'incendie	nombre de véhicules présents en tunnel avant l'incendie et bloqués par celui ci	nombre de véhicules susceptibles d'entrer dans le tunnel	capacité de stockage du tunnel	nombre de véhicules effectivement bloqués
200	14	114	61	61
400	27	114	122	122
600	41	114	184	156
800	55	114	245	169
1000	69	114	306	183
1200	82	114	367	197
1400	96	114	428	211
1600	110	114	490	224

TAB. B.4 – Nombre de véhicules bloqués en tunnel pour un temps de fermeture de 2 minutes.

Pour mesurer ces contre-pressions, on utilise la mesure des coefficients de prise au vent des têtes de tunnel réalisée sur une maquette, et les paramètres météorologiques du site (intensité et la direction des vents en particulier). Tous calculs faits, la figure B.2 donne les fréquences d'occurrence des contre-pressions atmosphériques. On trouve donc que pour 95 % du temps, $-12 \text{ Pa} < \Delta P_a < +17 \text{ Pa}$ (les contre-pressions négatives correspondent à un effet moteur, les contre-pressions positives à un effet résistant). Pour le dimensionnement, on retiendra $-15 \text{ Pa} < \Delta P_a < +20 \text{ Pa}$. Dans le cadre de la présente annexe, on ne développera que le cas $+20 \text{ Pa}$, mais dans un projet réel les deux cas $+20 \text{ Pa}$ et -15 Pa seraient à analyser.

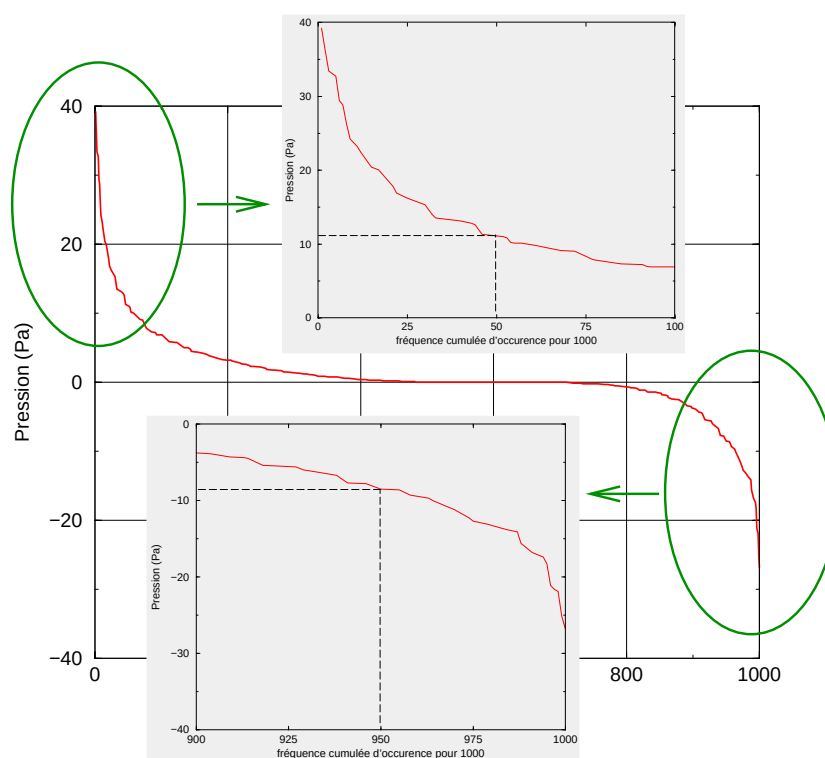


FIG. B.2 – Fréquences d'occurrence des contre-pressions, obtenues à partir des mesures de prise au vent des têtes et des paramètres météorologiques

Insonorisation

Les accélérateurs disposés en tunnel sont équipés de silencieux annulaires fixés de part et d'autre de la virole de la machine.

Les groupes moto-ventilateurs en station sont équipés de baffles acoustiques disposés au rejet, entre la machine et le plénum d'extraction.

Des seuils admissibles à ne pas dépasser sont indiqués dans les sections 5.3.3 et 5.4.9 :

- dans le tunnel : en considérant le bruit généré par le trafic routier, une batterie d'accélérateurs ne devra pas dépasser un niveau de pression sonore de l'ordre de 90 dBA,
- à l'intérieur de la station de ventilation, dans le local où sont installés les moto-ventilateurs, 92 dBA maximum sont recommandés, et entre 60 et 70 dBA dans les locaux techniques.

B.4.2 Détermination des poussées et des débits à installer

a) Ventilation de désenfumage

L'objet de ce paragraphe est de déterminer quelles seront les poussées des batteries d'accélérateurs et les débits d'extraction des stations de ventilation à installer pour arriver à satisfaire les besoins en débit et en courant d'air. Le raisonnement adopté est le suivant :

- dans un premier temps on détermine les poussées nécessaires pour assurer un courant d'air de 3 m/s dans le tunnel, sans extraction massive, ce qui correspond au cas d'un incendie dans le canton 3,
- dans un deuxième temps, on utilise un logiciel de calcul en utilisant comme point de départ la poussée des accélérateurs trouvée précédemment et les débits d'extraction calculés à partir de la formule de la section 5.3.5, page 68 ; l'équilibrage du courant d'air se fait par approches successives en modifiant les régimes de ventilation.

Cas de l'incendie dans le canton 3

Lorsqu'un incendie se produit dans ce canton, l'objectif est de pousser les fumées d'incendie vers la sortie (dans le sens du trafic).

On dimensionne donc la ventilation longitudinale de telle sorte que la poussée exercée par les batteries d'accélérateurs soit suffisante pour créer un courant d'air longitudinal d'au moins 3 m/s dans le sens de la circulation. Ce courant d'air doit pouvoir être établi pour des contre-pressions extérieures défavorables (en l'occurrence ici + 20 Pa). On fait ici le dimensionnement pour un incendie situé à 1400 m de l'entrée, soit environ au milieu du canton. Des calculs de vérification permettent ensuite de vérifier que ce dimensionnement est suffisant pour un incendie n'importe où dans le canton 3.

On prend les hypothèses suivantes :

- contre-pressions atmosphériques défavorables fixées à + 20 Pa,
- étant donnée la longueur du tunnel, on ne met pas en fonction les accélérateurs se trouvant dans le canton de l'incendie (qui de toutes façons risquent d'être détruits par l'incendie),
- les pertes de charge causées par les véhicules bloqués sont calculées en considérant un temps de fermeture des barrières de 2 min, le nombre de véhicules présents en tunnel est alors de 211 et ils occupent une longueur de près de 700 m au vent du foyer,
- le coefficient d'échanges thermiques apparent a été pris égal à 6 W/m²/K.

La somme des pressions résistantes contre lesquelles doivent faire face les pressions motrices des batteries d'accélérateurs est, tous calculs faits, d'environ 100 Pa¹.

¹ qui se décomposent ainsi : 32,7 Pa de pertes de charge linéaires ; 9,2 Pa de pertes de charge d'entrée, de sortie et de changement de section ; 14,7 Pa de perte de charge d'expansion des fumées ; 32,9 Pa de pertes de charge dues

On considère des accélérateurs de poussée en champ libre de 1250 N, avec un coefficient d'efficacité de 0,85 et une vitesse de soufflage de 28 m/s. Un tel accélérateur, placé dans le tronçon 1, développe une pression motrice d'environ 16,2 Pa. Pour un accélérateur placé dans le tronçon 2, du fait du bossage, le coefficient d'efficacité rapporté à la section courante du tunnel est de 0,65, mais comme cette section courante est plus faible que dans le tronçon 1, on trouve tous calculs faits une même pression motrice de 16,2 Pa².

Il suffirait donc de six accélérateurs développant chacun une poussée unitaire en champ libre de 1250 N placés dans le tronçon 1 ou le tronçon 2 pour développer une pression motrice supérieure à la somme des pressions résistantes en tunnel, et ainsi garantir une vitesse de courant d'air supérieure à 3 m/s au vent du foyer.

On retient donc le schéma de ventilation suivant :

- canton 1 : une batterie de deux accélérateurs (batterie 1) à environ 250 m de l'entrée du tunnel,
- canton 2 : une batterie de deux accélérateurs (batterie 2) à environ 650 m de l'entrée du tunnel et une batterie de deux accélérateurs (batterie 3) à environ 950 m de l'entrée du tunnel,
- canton 3 : une batterie de deux accélérateurs (batterie 4), à environ 1350 m de l'entrée du tunnel (cette batterie n'a pas été utilisée dans les calculs précédents).

Cas de l'incendie dans le canton 1

Lorsqu'un incendie se produit dans ce canton, l'objectif est d'extraire les fumées par la station d'extraction la plus proche à l'aval du foyer (station 1) tout en maintenant un courant d'air de plus de 3 m/s dans le sens du trafic au vent de l'incendie, et un courant d'air inverse d'au moins 1 m/s dans les cantons 2 et 3.

On calcule le débit à extraire d'après la formule donnée section 5.3.5, page 68. On trouve un débit volumique minimal à extraire de 290 m³/s.

Le logiciel de calcul utilisé pour déterminer l'équilibrage des poussées des accélérateurs est le logiciel Camatt [9]. L'état initial considéré pour la simulation (sur une durée d'une heure) est le suivant :

- trafic routier de 2 000 UVP/h, soit 1 700 véh/h, avec une vitesse des véhicules de 50 km/h,
- pas de ventilation mécanique en fonctionnement,
- contre-pressions atmosphériques de 20 Pa dans le sens opposé au trafic.

La figure B.3 donne la vitesse du courant d'air calculée par Camatt. Sur cette figure,

- l'incendie commence 5 min après le début de la simulation,
- l'extraction 1 et la batterie 3 sont mises au régime 100 % et la batterie 4 au régime 50 % deux minutes après le début de l'incendie.

Cas de l'incendie dans le canton 2

Le raisonnement est identique à celui mené pour le cas d'un incendie dans le canton 1. L'extraction massive en fonctionnement est maintenant l'extraction massive 2, qui doit extraire un débit de 240 m³/s, et les batteries d'accélérateurs à mettre éventuellement en route sont les batteries 1 et 4 (situées hors du canton de l'incendie).

Un premier calcul utilisant 2 accélérateurs pour chacune des batteries 1 et 4 montre que la poussée est sous-dimensionnée pour contrôler le courant d'air quand la contre-pression est

au blocage par les véhicules ; 20 Pa de contre-pression ; 9,6 Pa d'effet moteur dû à la flottabilité (l'effet cheminée joue un rôle moteur car la pente est de +1 % dans le canton 3, considéré ici).

² On manque encore de données sur l'efficacité réelle des accélérateurs montés en bossage ; du fait du soin apporté à la géométrie du bossage (figure B.5 page 122), ce mode de calcul est certainement pénalisant.

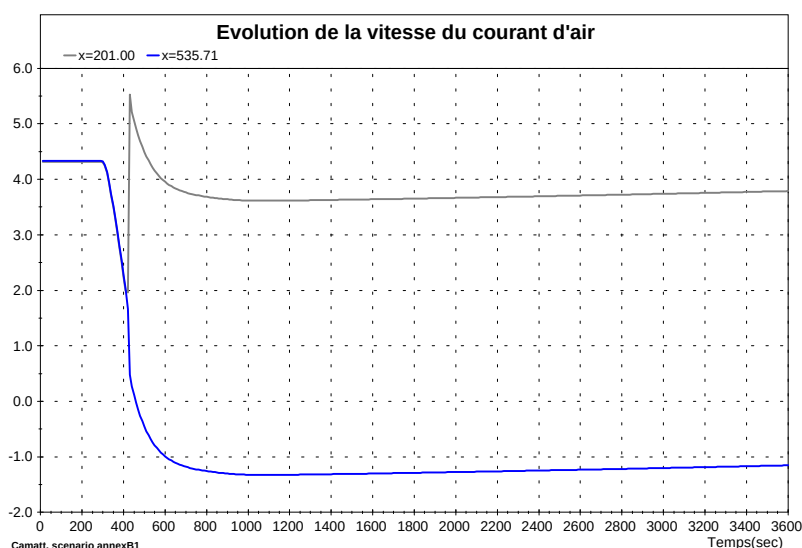


FIG. B.3 – Evolution de la vitesse du courant d'air pour un incendie à 350 m de l'entrée du tunnel (canton 1); trait gris : vitesse de l'air au vent de l'incendie; trait bleu : vitesse de l'air dans le canton 2.

de +20 Pa. On recommence donc le calcul en prévoyant trois accélérateurs de 1250 N dans la batterie 1 et deux accélérateurs de 1250 N dans la batterie 4. Les calculs menés alors montrent que ce dimensionnement convient (voir figure B.4).

Dimensionnement retenu pour les besoins de désenfumage

On retient finalement le dimensionnement suivant :

- station d'extraction 1 : débit d'extraction de $290 \text{ m}^3/\text{s}$ à 450 m de l'entrée,
- station d'extraction 2 : débit d'extraction de $240 \text{ m}^3/\text{s}$ à 1150 m de l'entrée,
- batterie d'accélérateurs 1 : 3 accélérateurs de 1250 N à 250 m de l'entrée,
- batterie d'accélérateurs 2 : 2 accélérateurs de 1250 N à 650 m de l'entrée,
- batterie d'accélérateurs 3 : 2 accélérateurs de 1250 N à 950 m de l'entrée,
- batterie d'accélérateurs 4 : 2 accélérateurs de 1250 N à 1350 m de l'entrée.

b) Ventilation sanitaire

Comme on a pu le voir dans la section B.3.2, le débit maximal à installer en tunnel est de $151 \text{ m}^3/\text{s}$, soit un courant d'air de 2,6 m/s dans le tronçon 1 et de 3,35 m/s dans le tronçon 2. Ce besoin en air frais correspond à une circulation à 50 km/h, et le calcul montre que ces vitesses d'air sont atteintes sans ventilation mécanique, grâce au pistonnement des véhicules.

En revanche, pour le cas du trafic congestionné, le pistonnement des véhicules est faible, les débits d'air frais nécessaires à une dilution correcte des polluants ne peuvent être atteints qu'avec la ventilation mécanique. Le débit d'air frais à installer en tunnel est de $153 \text{ m}^3/\text{s}$, soit des courants d'air de 2,6 m/s dans le tronçon 1 et de 3,35 m/s dans le tronçon 2.

Un calcul isotherme montre que la ventilation telle que dimensionnée pour l'incendie est largement suffisante pour assurer ce renouvellement d'air.

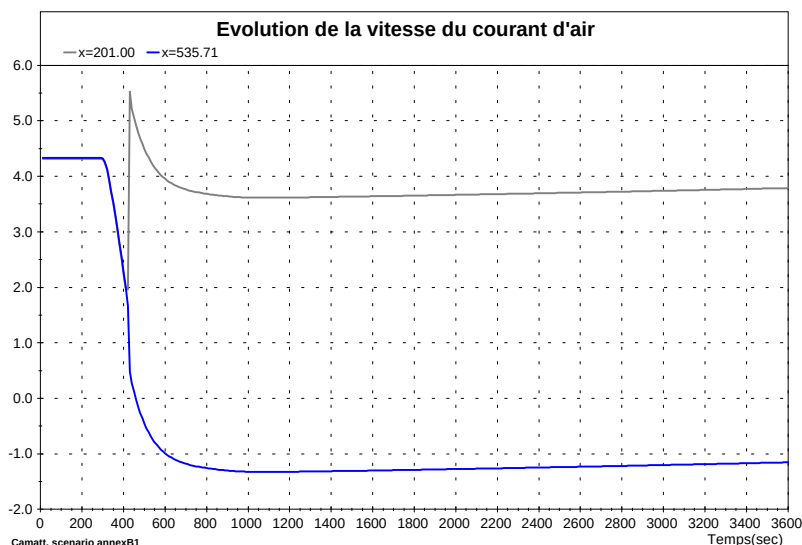


FIG. B.4 – Evolution de la vitesse du courant d'air pour un incendie à 850 m de l'entrée du tunnel (canton 2); trait gris : vitesse de l'air au vent de l'incendie; trait bleu : vitesse de l'air dans le canton 2.

B.4.3 Dispositions pratiques

Accélérateurs

Lorsqu'on dispose d'une hauteur de souterrain suffisante, comme dans le tronçon 1, l'implantation d'une batterie d'accélérateurs ne pose pas de difficulté. Dans le cas du tronçon 2 où la hauteur ne permet pas d'installer une batterie d'accélérateurs sans empiéter sur le gabarit routier, il est nécessaire de créer un bossage permettant de loger les machines (voir figure B.5).

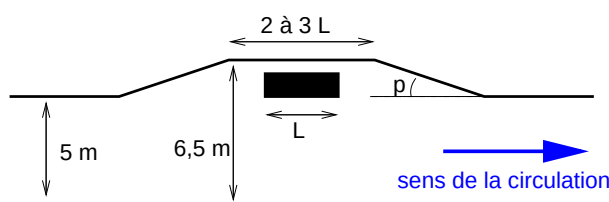


FIG. B.5 – Réalisation d'un bossage pour mettre en place les accélérateurs dans le tronçon 2; l'angle p , situé dans le jet des machines, doit être compris entre 7,5 et 12,5 degrés.

Lors de l'installation des accélérateurs composant une batterie, on doit veiller à respecter un écartement suffisant (au minimum 50 cm) entre les machines pour faciliter les opérations futures de maintenance. De plus, pour que les accélérateurs fonctionnent le plus correctement possible, il est recommandé de les éloigner de la voûte (au moins 30 cm).

Typiquement, on retiendra des accélérateurs identiques à ceux retenus dans l'annexe A, et leurs caractéristiques ne sont pas répétées ici.

Station d'extraction massive

Les caractéristiques typiques des ventilateurs retenus pour la station 2, qui en comportera deux, sont les suivantes :

- diamètre de la virole : 2,40 m,
- longueur de la virole : 1,7 m,
- masse (dont moteur 500 kg) : 2 500 kg,
- débit volumique : 120 m³/s,
- vitesse de rotation : 900 t/min,
- niveau sonore : environ 120 dBA à 2 mètres de la virole,
- puissance nominale : 155 kW,
- pression totale : 900 Pa,
- résistance au feu : 200°C 2 heures.

On prévoira aussi un registre d'isolement d'environ 2,80 m × 2,80 m (masse : 200 kg environ). L'insonorisation sera faite avec des baffles acoustiques de longueur 3 m et de hauteur 3,6 m environ. Les figures B.6 et B.7 présentent des aménagements possibles pour cette station d'extraction.

On doit prévoir dans des locaux annexes tous les équipements nécessaires au fonctionnement de la ventilation mécanique (transformateurs, automates, armoires de commande...).

B.4.4 Commande de la ventilation

La commande de la ventilation en cas d'incendie pourra se faire ou bien par scénarios préprogrammés ou bien par algorithme de contrôle utilisant directement les informations des anémomètres. En tout état de cause, des anémomètres doivent être installés. Pour la ventilation sanitaire, on asservira les régimes aux niveaux de pollution constatés en tunnel. En phase projet, on se limitera à ce qui est décrit dans les paragraphes suivants.

Capteurs

La ventilation mécanique à but sanitaire est asservie aux niveaux de pollution en tunnel. Le tunnel sera muni pour ce faire de 4 capteurs de CO, 4 capteurs de NO et 4 capteurs d'opacité (c'est à dire un de chaque type dans les cantons 1 et 3 et 2 de chaque type dans le canton 2).

On installera aussi des anémomètres aux mêmes 4 emplacements.

Exploitation normale

Dans le cadre de l'exploitation normale, l'objectif à atteindre est de respecter les seuils de pollution admissibles en tunnel.

On retiendra a priori une régulation par seuil visant à maintenir le taux de pollution à l'intérieur d'une plage de mesure.

Exploitation en cas d'incendie

Dans le cas d'un incendie, des scénarios pré-programmés seront établis dans les phases ultérieures du projet, pour que l'opérateur en charge de la surveillance du tunnel (qui est de niveau D4) puisse déclencher la ventilation le plus rapidement et le plus efficacement possible.

Lorsqu'il n'y a pas de blocage du trafic sous le vent de l'incendie, on appliquera des scénarios du type de ceux schématisés sur la figure B.8, selon le canton dans lequel a lieu l'incendie (on vérifiera si un même scénario peut convenir pour la plage de variation des contre-pressions atmosphériques ou s'il y a lieu de prévoir des scénarios différents).

Lorsqu'il y a un blocage du trafic sous le vent de l'incendie, les scénarios seront différents dans les cantons 1 et 3, qui mesurent moins de 500 m de long, et dans le canton 2, long de 700 m.

- dans les cantons 1 et 3, on appliquera des scénarios identiques à ceux prévus en l'absence de blocage,

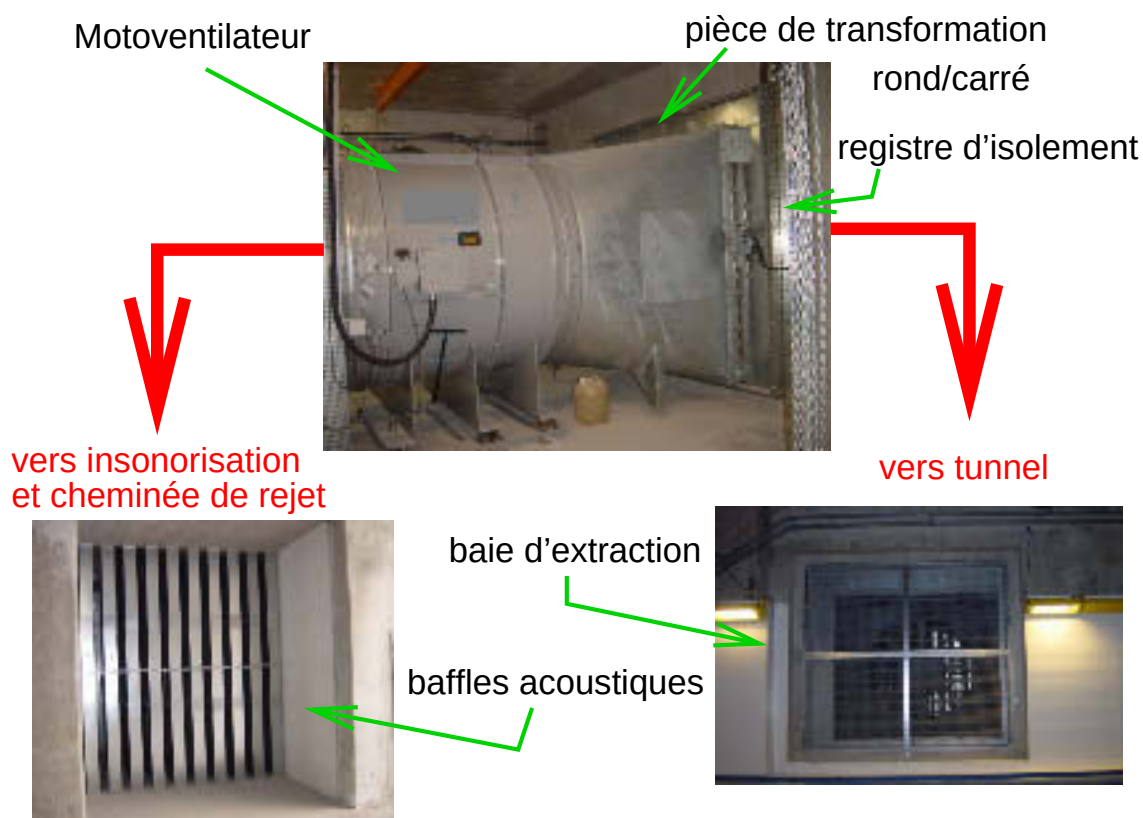


FIG. B.6 – Représentation de quelques éléments d'un circuit de ventilation en station.

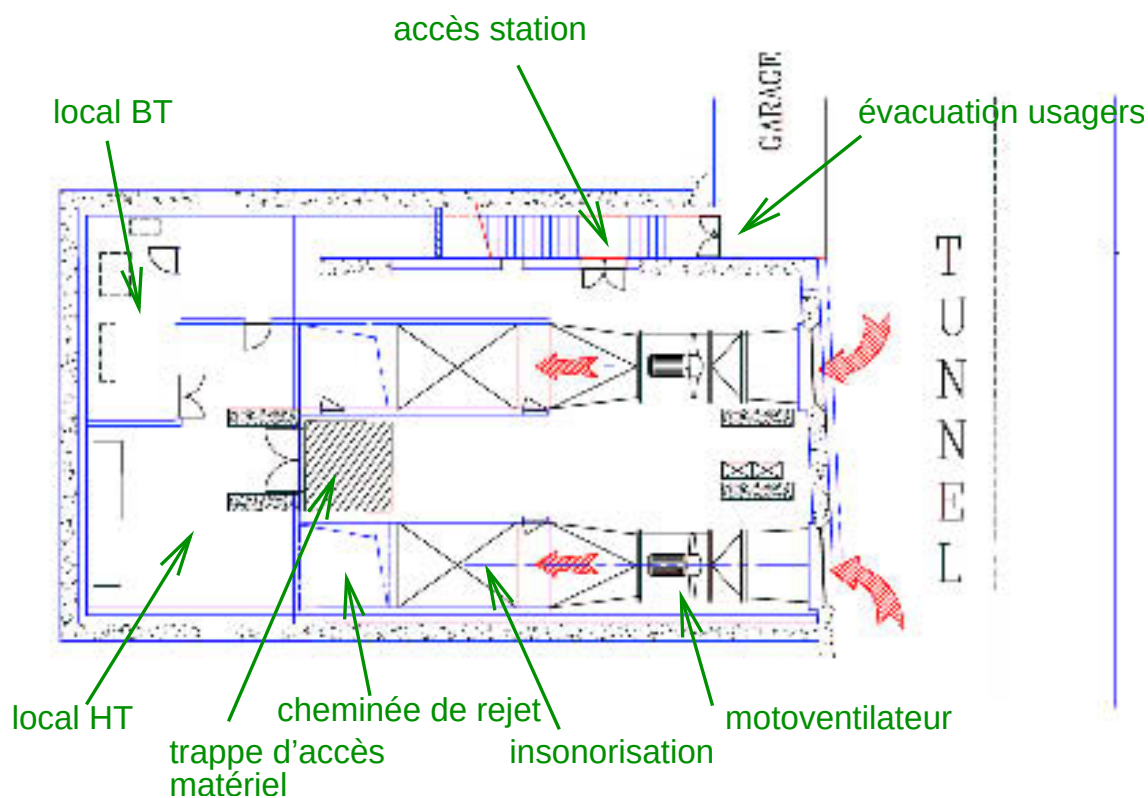


FIG. B.7 – Plan simplifié de la station d'extraction 2 ; dans ce cas particulier, des contraintes de site ont conduit à choisir de disposer les baies d'extraction massives latéralement dans le tunnel, mais en général on préfère les disposer en voûte.

- dans le canton 2, on appliquera dans un premier temps un scénario visant à limiter la vitesse du courant d'air longitudinal à environ 1,5 m/s dans le canton 2 tout en s'efforçant d'extraire par l'extraction 2 ; dans un second temps, après s'être assuré de l'évacuation des usagers bloqués dans le tunnel, on activera un scénario identique au cas d'absence de blocage.

En tout état de cause, les services de secours doivent pouvoir demander des changements manuels de régime de ventilation afin de faciliter leur intervention en tunnel (les ventilateurs doivent de ce fait être partiellement réversibles).

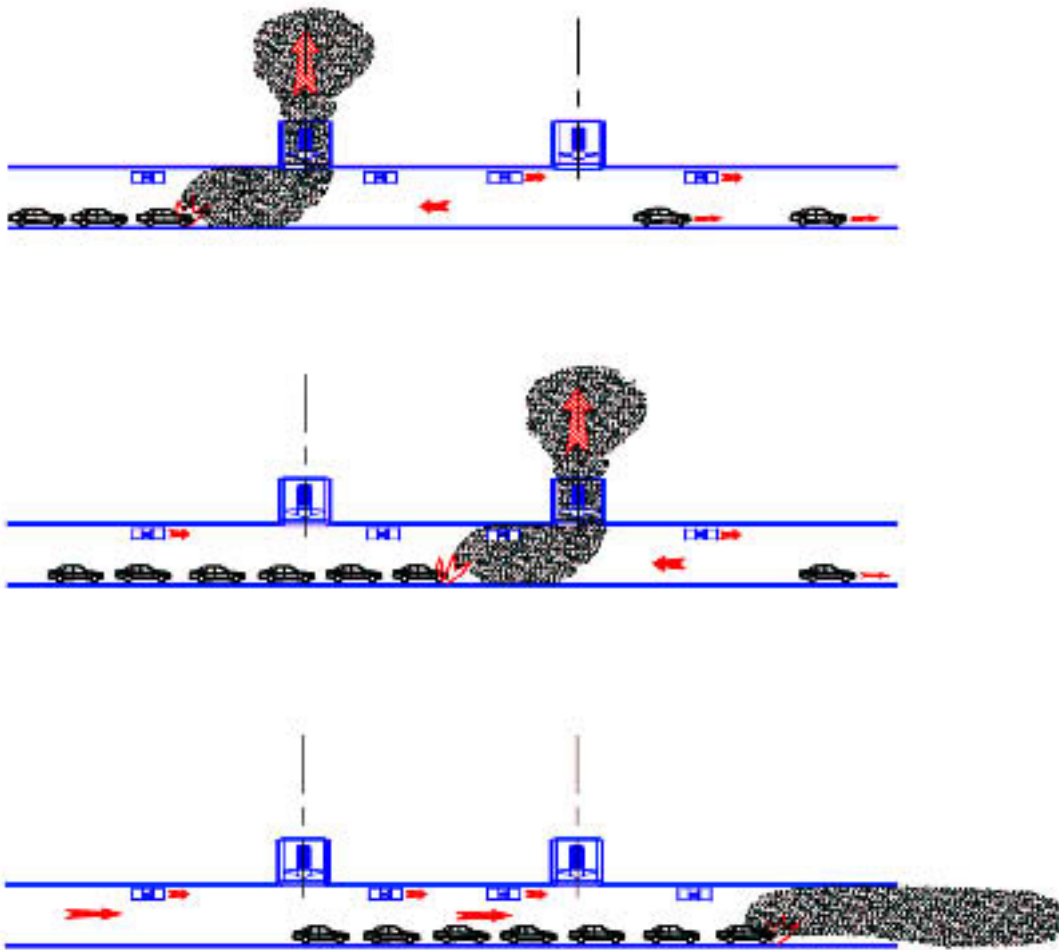


FIG. B.8 – Présentation schématique des trois scénarios de désenfumage.

Annexe C

EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT D'UNE INSTALLATION DE VENTILATION TRANSVERSALE

C.1 *Présentation de l'exemple*

C.1.1 Caractéristiques de l'itinéraire et du trafic

Itinéraire

Le projet décrit dans cette annexe est la réalisation, en région montagneuse, d'un maillon autoroutier reliant deux vallées selon une direction générale est-ouest. En section courante, l'autoroute comportera deux voies de circulation par sens et franchira, à terme, le massif par un tunnel bi-tube de faîte de 4 km de longueur constituant le point culminant du tracé. En première phase d'exploitation prévue sur 10 ans environ, le niveau de trafic estimé sur l'itinéraire ne justifie pas la réalisation du deuxième tube, la capacité du premier tube, en circulation bidirectionnelle à une voie par sens, étant jugée suffisante jusqu'à cet horizon.

Grâce aux bonnes caractéristiques géométriques du tube, la limite de capacité est estimée à environ 1500 UVP/h par voie.

La vitesse autorisée en tunnel est de 90 km/h, mais en pratique, à cause de la présence des PL, il est probable que la vitesse de circulation sera plus faible, de l'ordre de 70 km/h en montée et de 80 km/h en descente.

L'ouverture de ce premier tube est prévue pour 2010 et celle du second en 2020. La présente annexe analyse le dimensionnement de la ventilation du premier tube exploité en bidirectionnel, cas plus contraignant que l'exploitation ultérieure en unidirectionnel.

Trafic

Le trafic est essentiellement de transit. Il comporte, en semaine, une proportion de poids lourds évaluée à 15 %, même en heure de pointe. Le transport international représente une part importante si bien que le poids moyen des PL est estimé à 27 t. Le transport de marchandises dangereuses est autorisé.

Les pointes de trafic (2 sens) progressent annuellement de 2,2 % (en croissance linéaire) pour la pointe du matin et de 2,5 % pour la pointe du soir. L'horizon de saturation du tunnel sera proche en 2020, sans toutefois atteindre la congestion en tunnel.

Quelques jours de week-end par an, une intensité de trafic plus élevée sera possible. Il s'agit de périodes exceptionnelles de grande migration touristique hivernale (trafic VL exclusivement), pour lesquelles des mesures d'exploitation spéciales seront prévues pour préserver la circulation fluide en tunnel.

L'étude de trafic donne, pour la 30ème heure de pointe, les estimations suivantes en véh/h :

	Pointe du matin		Pointe du soir	
	sens ouest-est	sens est-ouest	sens ouest-est	sens est-ouest
2010	1000	600	800	1000
2015	1075	700	950	1075
2020	1150	800	1100	1150

Le calcul de la ventilation doit aussi considérer les situations exceptionnelles de blocage de la circulation en tunnel (panne, accident) avec un taux d'occupation de l'ordre de 120 UVP par kilomètre de voie, soit 105 véh/km de voie (avec 15 % de PL). La longueur de voie occupée dépend du trafic et du délai de fermeture du tunnel mais de toute façon, pour la ventilation sanitaire, il est nécessaire de pouvoir assurer le ratio d'air frais requis en n'importe quel point du tunnel.

C.1.2 Caractéristiques géométriques du tunnel

Situé à une altitude de 800 m environ et orienté est-ouest, le tube présente un profil en long en forme de toit, avec d'ouest en est, une rampe à 2,75 % sur 1500 m suivie d'une pente à 1,25 % sur les 2500 m restants. La hauteur maximale de couverture est de 300 m environ (voir figure C.1a).

Le creusement du tube est effectué en technique traditionnelle avec une section en fer à cheval (voir figure C.1b). La hauteur libre minimale est de 4,50 m et la largeur roulable de 9,00 m. Lors du chantier, il est prévu de creuser une galerie pilote parallèle qui servira de cheminement protégé pour l'évacuation des abris. Il n'est pas prévu que des usagers empruntent cette galerie sans être accompagnés par les services de secours. Après l'ouverture du second tube, les dispositifs d'évacuation seront des intertubes.

C.1.3 Contraintes d'environnement

Les têtes se situent dans des zones bien dégagées, ce qui limite les nuisances dans l'environnement :

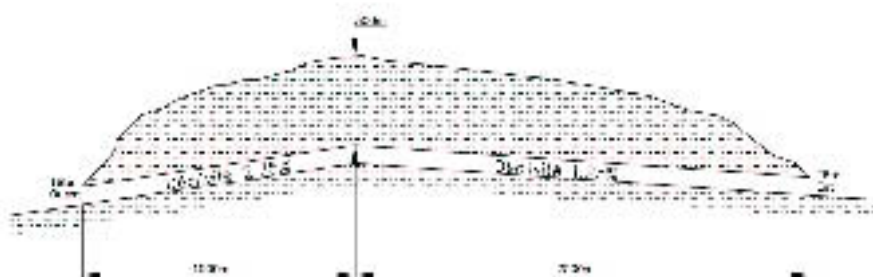
- en tête ouest, débouché en remblai, les premières habitations étant à 300 m environ,
- en tête est, débouché sur un viaduc sans aucune construction à proximité.

C.1.4 Exploitation du tunnel

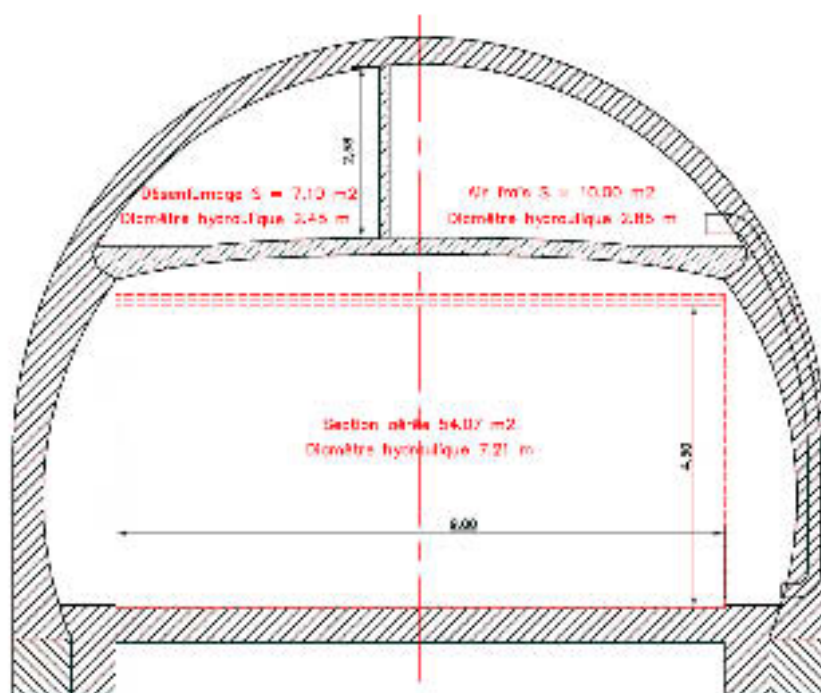
La surveillance et l'exploitation du tunnel et du nouveau maillon autoroutier sont intégrées au centre de gestion déjà existant de la société d'autoroute. Le tunnel bénéficie ainsi d'un degré de permanence et surveillance D4 au sens de l'instruction technique [17].

En cas d'incident grave dans un tube, il est prévu de fermer les accès par des barrières télécommandées. Pour le désenfumage en cas d'incendie, le comportement du système est évalué en prenant en compte les délais suivants :

- $t=0$: arrêt du véhicule en feu,



(a)



(b)

FIG. C.1 – (a) profil en long du tunnel ; (b) profil en travers.

- $t=1$ min : détection du feu,
- $t=3$ min : validation de l'alarme incendie, fermeture des barrières et démarrage du scénario de désenfumage,
- $t = 4$ min : désenfumage à plein régime.

C.2 Système de ventilation retenu

En raison de la longueur importante du tube, de son trafic non faible et surtout de l'exploitation durable (10 ans) en circulation bidirectionnelle, le système de ventilation de type longitudinal est à écarter (cf. tableau 2.8 page 32). C'est donc un système de type transversal qui sera retenu. Du fait du creusement en méthode traditionnelle, on logera les galeries de ventilation en voûte.

C.3 Besoins à satisfaire

C.3.1 Désenfumage en cas d'incendie

Dans les tunnels ventilés transversalement et autorisés aux transports de marchandises dangereuses, on ne retient comme incendie de dimensionnement de la ventilation qu'un incendie de poids lourd ordinaire dégageant une puissance calorifique de 30 MW et un débit de fumées supposées stratifiées de $80 \text{ m}^3/\text{s}$ (cf. [17]). Toutefois, d'une part l'étude du comportement au feu de l'ouvrage doit prendre en compte la courbe température-temps HCM (cf. [17]) et, d'autre part les conséquences d'un incendie TMD restent à considérer dans l'étude spécifique des dangers.

Le courant d'air longitudinal au droit du feu doit être maintenu à une vitesse inférieure à 1,5 m/s dans la zone de l'incendie, et les fumées doivent pouvoir être extraites avec un débit minimal de $110 \text{ m}^3/\text{s}$ sur toute longueur de 600 m en tunnel.

Les importants moyens de surveillance et de maintenance du réseau autoroutier permettent d'assurer la possibilité d'un contrôle du courant d'air et une gestion adéquate de l'extraction des fumées par trappes motorisées télécommandées.

A terme, en circulation unidirectionnelle (après 2020), les moyens de désenfumage mis en oeuvre en première phase resteront adaptés aux besoins.

C.3.2 Ventilation sanitaire

Besoins en insufflation d'air frais

Les besoins en renouvellement d'air dépendent :

- du taux d'occupation des voies du tunnel par les véhicules ;
- de l'émission moyenne en polluants des véhicules à une vitesse de circulation et pour une déclivité données ;
- du seuil de concentration en polluant admissible dans l'air ;
- de la concentration initiale de l'air frais insufflé.

Les calculs des besoins en air frais sont effectués à la date estimée d'ouverture de l'ouvrage (2010), mais aussi 10 ans plus tard, de manière à apprécier l'influence sur le dimensionnement de l'accroissement du trafic et de la baisse progressive plausible des émissions. Au delà, les calculs ne s'avèrent pas nécessaires, principalement en raison du partage du trafic entre les deux tubes.

Les ratios en véh/km de voie sont indiqués dans le tableau ci-dessous, en retenant une vitesse de 70 km/h en montée et de 80 km/h en descente :

	Pointe du matin				Pointe du soir			
	sens ouest-est		sens est-ouest		sens ouest-est		sens est-ouest	
déclivité	2,75 %	-1,25 %	1,25 %	-2,75 %	2,75 %	-1,25 %	1,25 %	-2,75 %
2010	14,3	12,5	8,6	7,5	11,4	10	14,3	12,5
2020	17,1	15	11,4	10	15,7	13,7	17,1	15

Comme déjà indiqué, le taux d'occupation d'une voie retenu en situation de blocage du trafic est de 120 UVP/km, soit 105 véh/km.

Les données d'émission sont issues de la note [8], qui permet de calculer l'émission moyenne des véhicules en polluants donnée dans le tableau C.1.

		monoxyde de carbone (l/h)					
		VL moyen		PL moyen		véhicule moyen	
vitesse	déclivité	2010	2020	2010	2020	2010	2020
(blocage)	(-)	11	11	40	28	16	14
70 km/h	+ 2,75 %	98	46	340	240	134	75
70 km/h	+ 1,25 %	63	30	270	193	94	55
80 km/h	- 2,75 %	39	20	187	133	61	37
80 km/h	- 1,25 %	42	22	217	154	68	41

		oxydes d'azote (NO _x) (l/h)					
		VL moyen		PL moyen		véhicule moyen	
vitesse	déclivité	2010	2020	2010	2020	2010	2020
(blocage)	(-)	1,1	0,75	48	38	8	6
70 km/h	+ 2,75 %	14	8	470	374	82	63
70 km/h	+ 1,25 %	11	7	360	287	63	49
80 km/h	- 2,75 %	7	4	238	190	41	32
80 km/h	- 1,25 %	9	5	276	220	49	38

		opacité (m ² /h)					
		VL moyen		PL moyen		véhicule moyen	
vitesse	déclivité	2010	2020	2010	2020	2010	2020
(blocage)	(-)	0,6	0,6	19	8,5	3,4	1,8
70 km/h	+ 2,75 %	13	8	127	43	30	13
70 km/h	+ 1,25 %	10	7	107	38	25	11
80 km/h	- 2,75 %	7	5	83	36	18	9
80 km/h	- 1,25 %	7	5	93	38	20	10

TAB. C.1 – Dégagements unitaires moyens calculés pour le dimensionnement de la ventilation

On retiendra les seuils de pollution admissibles en tunnel suivants :

- en situation normale de trafic :
 - concentration en CO : 50 ppm en moyenne sur la longueur du tunnel,
 - concentration en NO₂ : 0,4 ppm en moyenne sur la longueur du tunnel,
 - opacité : $5 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ en tout point du tunnel ;
- en situation exceptionnelle de blocage :
 - concentration en CO : 150 ppm en tout point du tunnel,
 - opacité : $9 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ en tout point du tunnel.

Compte tenu de la bonne qualité de l'air du site de montagne et de l'éloignement des prises d'air par rapport au trafic, on peut négliger la concentration initiale en polluant dans l'air frais de ventilation.

Tous calculs de dilution faits, les besoins en air frais exprimés en m³/s par kilomètre de voie pour chaque cas de trafic fluide sont données dans le tableau C.2. Pour la circulation bloquée, les résultats sont sur le tableau C.3.

		pointe du matin				pointe du soir			
		sens ouest-est		sens est-ouest		sens ouest-est		sens est-ouest	
		2,75 %	-1,25 %	1,25 %	-2,75 %	2,75 %	-1,25 %	1,25 %	-2,75 %
2010	CO	11	5	5	2,5	9	4	8	4
	NO _x	82	43	38	22	65	34	63	36
	opacité	24	14	12	8	19	11	20	13
2020	CO	7	3	4	2	7	3	5	3
	NO _x	75	39	39	22	69	36	56	30
	opacité	13	8	7	5	12	8	11	8

TAB. C.2 – Besoins en air frais par kilomètre de voie exprimés en m³/s, en circulation fluide et selon le type de polluant considéré.

	CO	opacité
2010	9	20
2020	5	11

TAB. C.3 – Besoins en air frais par kilomètre de voie exprimés en m³/s, en circulation bloquée et selon le type de polluant considéré.

La sommation des besoins ainsi trouvés pour les deux voies du tunnel donne les résultats suivants, exprimés en m³/s par kilomètre, pour chacun des deux tronçons à déclivité constante, repérés **O** pour le tronçon de déclivité 2,75 % et de longueur 1500 m situé à l'ouest et **E** pour le tronçon de déclivité 1,25 % et de longueur 2500 m situé à l'est.

		pointe du matin		pointe du soir	
		tronçon O	tronçon E	tronçon O	tronçon E
2010	CO	13	9	13	11
	NO _x	103	80	101	97
	opacité	31	26	32	31
2020	CO	9	7	10	8
	NO _x	97	78	101	91
	opacité	18	16	20	18

En circulation bloquée, le besoin en air frais ne dépend pas du tronçon. On trouve, par kilomètre et pour les deux voies, $18 \text{ m}^3/\text{s}$ d'après le critère CO et $40 \text{ m}^3/\text{s}$ d'après le critère opacité pour 2010, et $10 \text{ m}^3/\text{s}$ d'après le critère CO et $22 \text{ m}^3/\text{s}$ d'après le critère opacité pour 2020.

Les besoins maximaux en renouvellement d'air sont donc obtenus pour satisfaire au critère des oxydes d'azote avec les trafics de pointe à l'horizon 2010 :

- pour le tronçon O : $103 \text{ m}^3/\text{s}$ par kilomètre, obtenu en pointe du matin,
- pour le tronçon E : $97 \text{ m}^3/\text{s}$ par kilomètre, obtenu en pointe du soir.

Sur la base d'une longueur de 1,5 km pour le tronçon O et de 2,5 km pour le tronçon E, le débit total à installer est de $1,5 \times 103 + 2,5 \times 97 = 397 \text{ m}^3/\text{s}$, qu'on arrondira à $400 \text{ m}^3/\text{s}$.

Besoins en extraction de l'air pollué

Afin de déterminer les besoins en extraction en exploitation normale, deux conditions sont à considérer :

- que la vitesse longitudinale de l'air reste en dessous du seuil de 8 m/s malgré l'action de la ventilation mécanique ;
- que le rejet d'air pollué par les têtes n'induisse pas de risque de pollution inacceptable pour l'environnement.

Pour la première condition, les calculs doivent prendre en compte l'effet de pistonement des véhicules combiné à celui des contre-pressions atmosphériques. Le calcul du comportement aéraulique du tunnel montre que cette condition est respectée sans mesure corrective particulière d'extraction, même avec la conjugaison défavorable d'une dissymétrie de trafic de 1/3-2/3 (575 véh/h dans un sens et 1150 véh/h dans l'autre) et d'une contre-pression de 250 Pa. Ce calcul a été mené à l'aide d'un logiciel de modélisation monodimensionnelle de la ventilation en tunnel.

Pour la seconde condition, on vérifie que l'extraction de l'air vicié en tunnel n'est pas nécessaire, le rejet par les têtes s'effectuant dans un espace très ouvert et dégagé de toute habitation.

C.4 Conception et dimensionnement de la ventilation

C.4.1 Éléments de calculs aérauliques

Cette section présente les données utilisées pour les calculs, menés à l'aide d'un logiciel de modélisation de la ventilation et de simulation des incendies en tunnel. Il s'agit du modèle monodimensionnel anisotherme transitoire Camatt [9].

Données météorologiques

Sur le plan météorologique, la situation particulière du tunnel entre deux vallées conduit à devoir prendre en compte des différences de contre-pressions atmosphériques aux têtes parfois assez importantes. Grâce à une campagne préliminaire de mesures barométriques sur une longue période, il ressort que la valeur de contre-pression négative de -250 Pa (par convention de signe, pression en tête est inférieure à la pression en tête ouest) n'est pas dépassée 95 % du temps. La contre-pression positive de 220 Pa n'est jamais dépassée¹.

¹ Dans le cas du tunnel étudié ici, la dissymétrie des contre-pressions, mais aussi le type de méthode retenue pour contrôler le courant d'air, ont conduit à considérer que les contre-pressions défavorables correspondaient toutes au cas des pressions négatives ; ce raisonnement dépend du tunnel et la répartition des 5 % du temps entre les deux sens doit être faite au cas par cas.

Pour les simulations d'incendie, la température de l'air ambiant a été fixée à 15°C, soit une masse volumique de l'air de 1,115 kg/m³.

Paramètres géométriques et physiques du tunnel

Le tunnel, long de 4 km, a une section de 56,9 m² et un périmètre de 31,6 m. Les parois du tunnel sont en béton, et on retient donc les caractéristiques thermophysiques suivantes :

- masse volumique : 2400 kg/m³,
- conductivité thermique : 1,6 Wm⁻¹K⁻¹,
- capacité thermique massique : 920 Jkg⁻¹K⁻¹,
- émissivité de la paroi : 0,7,
- facteur de forme entre la paroi et le tunnel : 1.

Un coefficient de perte de charge $\lambda_c = 0,02$ a été retenu. Les coefficients de perte de charge singulière à l'entrée et à la sortie du tunnel sont respectivement de 0,5 et 1.

Caractéristiques du trafic et des véhicules

Le coefficient $C_x \Sigma$ des véhicules légers a été retenu égal à 0,90 m², et celui des poids lourds égal à 4,5 m². Le taux d'occupation des voies dans ce tunnel interurbain est de 120 UVP/km, soit 105 véh/km de voie avec 15 % de poids lourds. L'interdistance à l'arrêt des véhicules a par conséquent été choisie égale à 9,5 mètres (mesurée entre pare-chocs avant).

Les calculs de désenfumage ont été effectués à l'horizon 2010. Dans tous les cas, c'est l'heure de pointe du matin (1000 véh/h dans le sens ouest-est et 600 véh/h dans le sens est-ouest) qui a été retenue, car compte tenu de la dissymétrie du trafic, elle contribue à provoquer un pistonnement qui s'ajoute aux effets de la contre-pression. Dans tous les cas, la proportion de PL a été maintenue à 15 %. Les vitesses des véhicules ont été prises constantes sur toute la longueur du tunnel, égales à 70 km/h pour chaque sens de circulation.

Scénarios analysés

En début de simulation, le soufflage réparti est de 400 m³/s, soit 0,1 m³/s par mètre linéaire sur toute la longueur du tunnel. Cette valeur correspond au débit d'air frais maximal nécessaire pour la ventilation sanitaire.

Comme il n'est pas possible a priori de savoir quelle est la position de l'incendie la plus défavorable, plusieurs doivent être testées. Cinq positions ont été retenues, à 200 m des têtes puis réparties tous les 900 m, voir figure C.2.

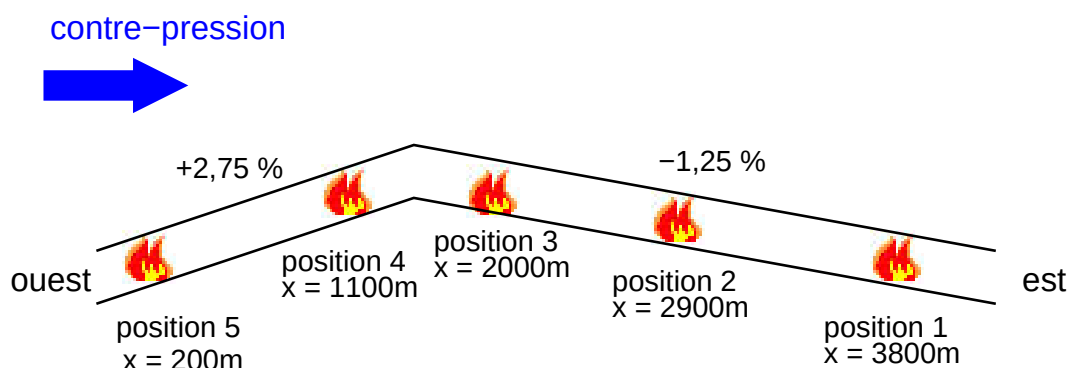


FIG. C.2 – Repérages des incendies utilisés pour les calculs.

Pour tous les scénarios testés, la simulation démarre à $t = 0$ s, et le début de l'incendie a lieu à $t = 300$ s (5 min). L'incendie de dimensionnement de 30 MW a été retenu, avec augmentation de puissance linéaire pendant les 10 premières minutes de l'incendie, jusqu'à ce que la puissance de 30 MW soit atteinte. La mise en route de la ventilation et la fermeture des barrières

empêchant l'entrée de véhicules supplémentaires dans le tunnel (une barrière à chaque extrémité du tunnel) sont effectives 3 minutes après le début de l'incendie, c'est-à-dire à $t = 480$ s (8 min). On considère que la ventilation fonctionne à plein régime une minute après sa mise en route, soit à $t = 540$ s (9 min). Ces événements successifs sont représentés sur la figure C.3.

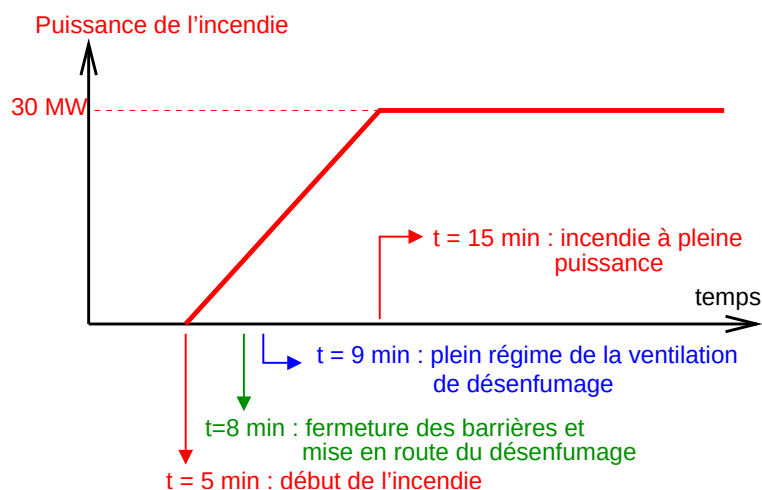


FIG. C.3 – Déroulement des scénarios incendie.

C.4.2 Détermination des caractéristiques de l'installation

Parti général

Le parti général retenu est d'assurer, par des circuits totalement indépendants, l'amenée d'air frais en tunnel d'une part, et l'extraction des fumées en cas d'incendie d'autre part. L'espace disponible en voûte au-dessus du gabarit routier est donc divisé en galerie spécifique de soufflage et en galerie spécifique d'extraction.

Vérification de l'impossibilité de maîtriser le courant d'air avec les seuls circuits de soufflage et d'extraction

La solution la plus simple pour maîtriser le courant d'air est d'utiliser le cantonnement de la ventilation pour adapter le régime de ventilation dans les cantons externes à l'incendie (soufflage ou extraction) en vue d'obtenir le faible courant d'air requis au droit du feu (vitesse longitudinale inférieure à 1,5 m/s dans la zone de l'incendie).

Dans le tunnel étudié ici, cette technique ne permet pas d'atteindre l'objectif en raison de l'importance de l'effet des contre-pressions atmosphériques sur le courant d'air en tunnel. Cela se vérifie par exemple avec un incendie en position 2. Le régime de ventilation à mettre en oeuvre pour lutter contre l'incendie consisterait à :

- réduire le soufflage à 20 % du régime maximal,
- actionner 6 trappes d'extraction sur une longueur de 600 mètres centrée sur la position de l'incendie, le débit extrait par chaque trappe étant de $18,3 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $110 \text{ m}^3/\text{s}$ sur 600 m ;
- actionner 6 trappes d'extraction dans la partie ouest du tunnel pour limiter l'apport d'air dû à la contre-pression (dans la simulation, comme cette zone est éloignée de celle de l'incendie, on peut modéliser les six trappes par un seul point d'extraction de $110 \text{ m}^3/\text{s}$).

Le calcul montre que dans ces conditions, il est impossible de lutter contre des valeurs de contre-pressions supérieures à 35 Pa (voir figure C.4 et C.5).

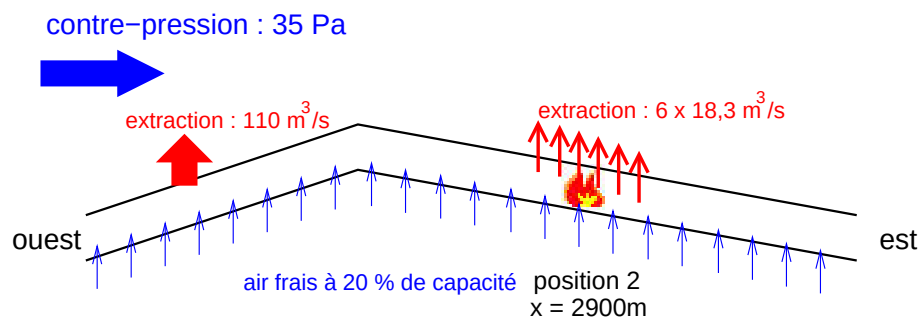


FIG. C.4 – Contrôle du courant d'air par le jeu des cantons (incendie en position 2) : schéma des dispositions retenues.

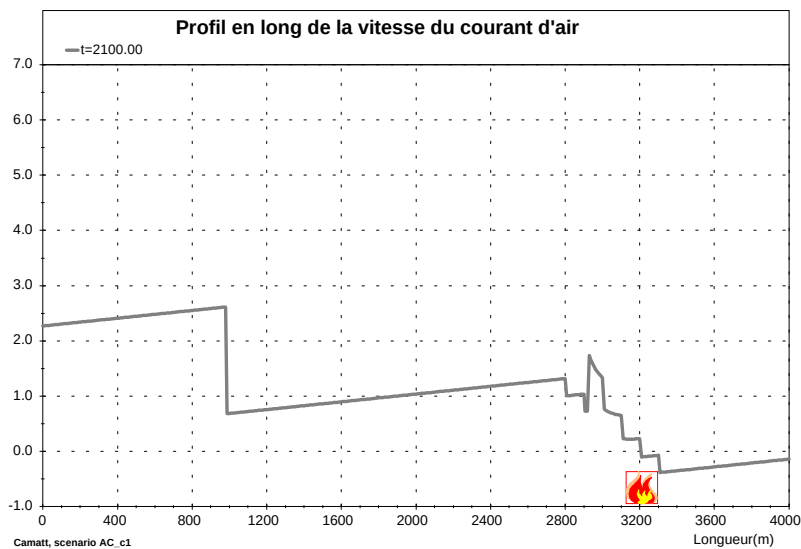


FIG. C.5 – Contrôle du courant d'air par le jeu des cantons (incendie en position 2) : profil en long de la vitesse de l'air dans le tunnel en régime stabilisé.

Contrôle du courant d'air avec des injecteurs en tête de tunnel

Un dispositif spécifique complémentaire nécessaire à la maîtrise du courant d'air en cas d'incendie s'avère donc indispensable. Son rôle est essentiellement de générer une poussée en tunnel pour neutraliser l'action des contre-pressions atmosphériques aux têtes. Cette poussée peut être introduite selon plusieurs techniques : accélérateurs en tunnel, injecteurs utilisant l'effet Saccardo ou même, ce qui n'est pas usuel, utilisation de l'impulsion du jet d'air des bouches de soufflage des galeries d'air frais (ce jet est alors volontairement orienté selon l'axe du tunnel par des déflecteurs mais cette technique peut alors occasionner la déstratification des fumées si le soufflage est trop fort dans la zone enfumée).

La solution choisie ici est celle d'injecteurs disposés en plafond à chacune des têtes et intégrés aux stations de ventilation. Pour ces injecteurs, on utilise des ventilateurs spécifiques. On aurait pu chercher à utiliser les ventilateurs d'insufflation d'air frais pour réaliser l'injection grâce à un jeu de registres, mais cette disposition n'a pas été retenue car elle n'aurait pas permis de maintenir l'insufflation d'air frais à régime réduit dans la zone de l'incendie. De plus, le dimensionnement des injecteurs et le contrôle du courant d'air sont vérifiés sans faire appel à des extractions en dehors de la zone de 600 mètres centrée sur l'incendie, car le principe retenu est que les scénarios de désenfumage doivent rester les plus simples possibles.

La poussée de l'injection à chaque tête est dirigée vers l'intérieur du tunnel. On injecte donc soit à une tête, soit à l'autre selon le signe des contre-pressions à contrecarrer. Si un incendie se produit sous le jet de l'injecteur qui serait nécessaire pour maîtriser le courant d'air, cet injecteur ne doit pas être mis en marche. Le courant d'air naturel poussera alors les fumées vers la tête correspondante, située à moins de 150 m environ.

La poussée d'injection nécessaire pour maintenir la vitesse du courant d'air inférieure à 1,5 m/s varie en fonction de la position de l'incendie, en particulier parce que l'effet cheminée dépend de cette position. Les calculs qui suivent montrent, pour chaque position d'incendie, quelle doit être la poussée minimale disponible. A l'issue des calculs, le dimensionnement des injecteurs se fera en retenant le maximum des valeurs obtenues.

Le calcul correspondant à un incendie en position 2, une contre-pression de 250 Pa et un injecteur de 14 000 N est détaillé ci-après. Dans ce cas, le régime de ventilation mis en oeuvre pour lutter contre l'incendie consiste à :

- réduire le soufflage à 20 % du régime maximal ;
- actionner 6 trappes de désenfumage sur une longueur de 600 mètres centrée sur la position de l'incendie, le débit extrait par chaque trappe étant de 18,3 m³/s, soit 110 m³/s sur 600 m ;
- actionner un injecteur, placé à 30 m de la tête est, ayant un débit de 360 m³/s, pour une vitesse d'air injecté de 35 m/s, avec un angle d'inclinaison de 10° par rapport à l'horizontale (poussée $F = Q \rho v = 14\,000$ N).

La figure C.6 résume ces dispositions. La vitesse du courant d'air en régime stabilisé est représentée sur la figure C.7, et l'établissement de cette vitesse en fonction du temps sur la figure C.8.

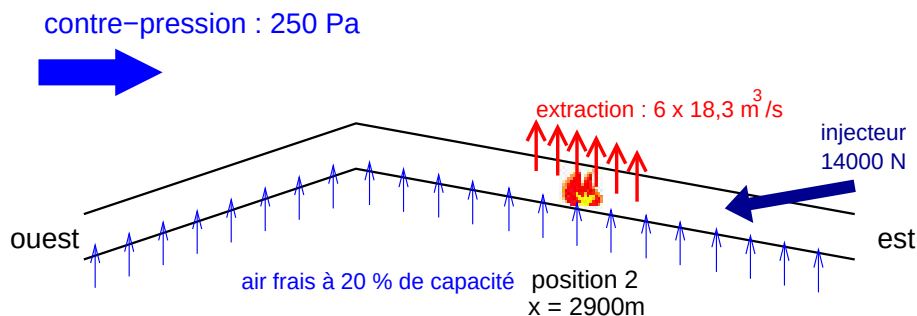


FIG. C.6 – Incendie en position 2 : schéma des dispositions retenues

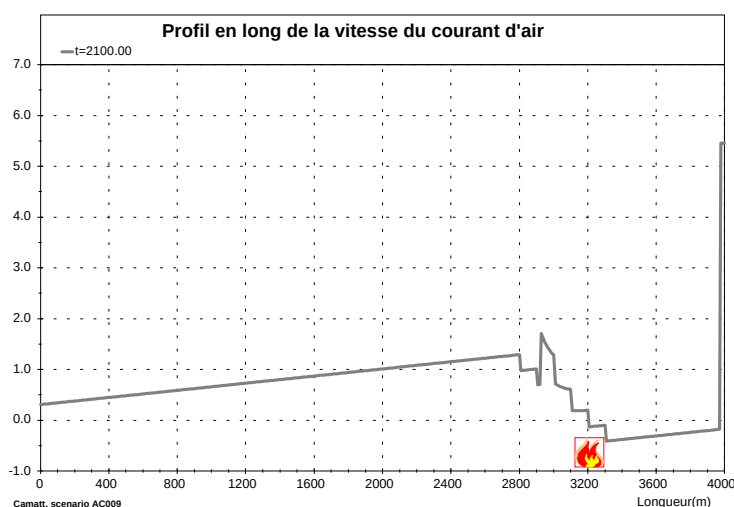


FIG. C.7 – Vitesse de l'air en régime stabilisé pour un incendie en position 2 et une contre-pression de 250 Pa.

La vérification du dimensionnement pour des incendies situés aux positions 1,3, 4 et 5 a été réalisée. On retient pour les injecteurs des poussées de

- 13 000 N pour un incendie en position 1,
- 12 500 N pour un incendie en position 3,
- 13 500 N pour un incendie en position 4,
- 14 000 N pour un incendie en position 5.

Ces vérifications sont résumées sur les figures C.9 à C.12, pages 139 à 142. On retient donc l'installation d'un injecteur dimensionné pour fournir une poussée de 14000 N.

Vérifications complémentaires

Les calculs précédents ont permis de contrôler le bon dimensionnement de la ventilation sous l'effet d'une contre-pression de 250 Pa de l'ouest vers l'est, pour des données de trafic 2010. La vérification complète du dimensionnement du système de contrôle du courant d'air en cas d'incendie nécessite un examen des autres horizons d'étude et d'une contre-pression inverse (220 Pa de l'est vers l'ouest).

Les calculs (non présentés dans cette annexe) montrent que l'augmentation de trafic n'a pas d'effet sensible et que le dimensionnement des injecteurs à 14 000 N de poussée permet de couvrir tous les cas de contre-pression.

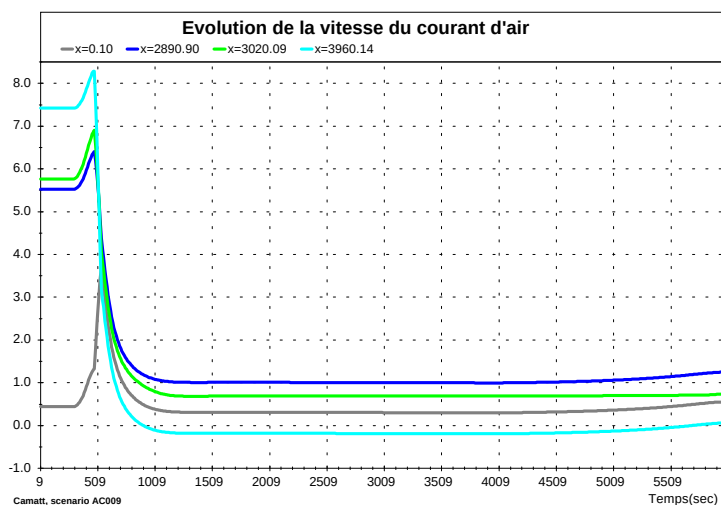


FIG. C.8 – Vitesse de l'air pour un incendie en position 2 et une contre-pression de 250 Pa, évolution en fonction du temps aux têtes et de part et d'autre de l'incendie.

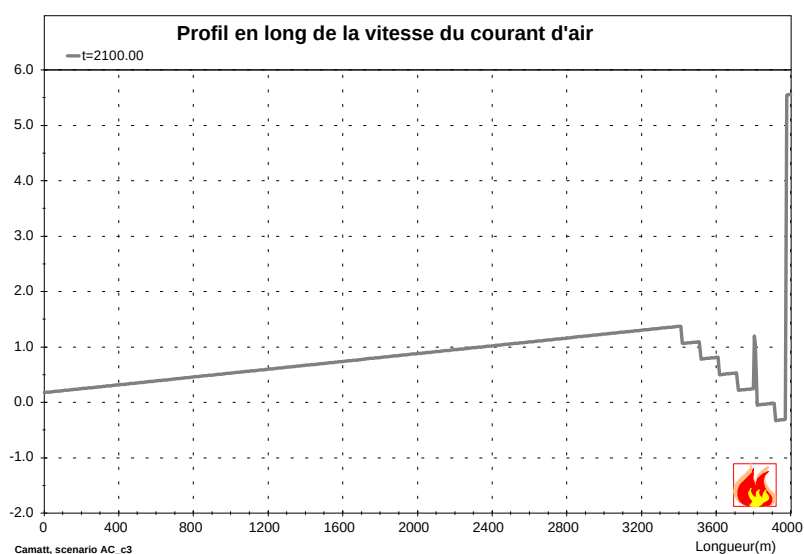
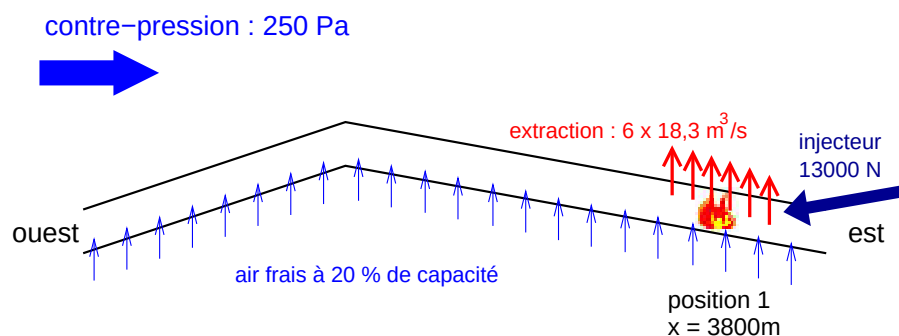


FIG. C.9 – Cas d'un incendie en position 1, avec contre-pression de 250 Pa : schéma des dispositions retenues et profil en long de la vitesse de l'air dans le tunnel en régime stabilisé.

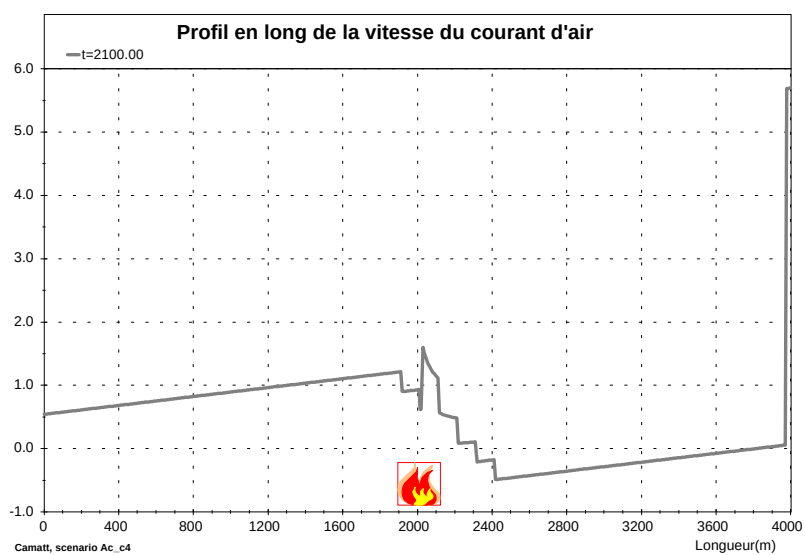
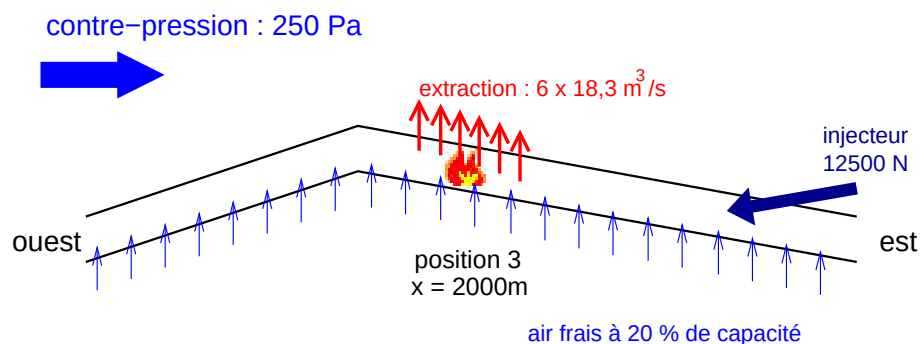


FIG. C.10 – Cas d'un incendie en position 3, avec contre-pression de 250 Pa : schéma des dispositions retenues et profil en long de la vitesse de l'air dans le tunnel en régime stabilisé.

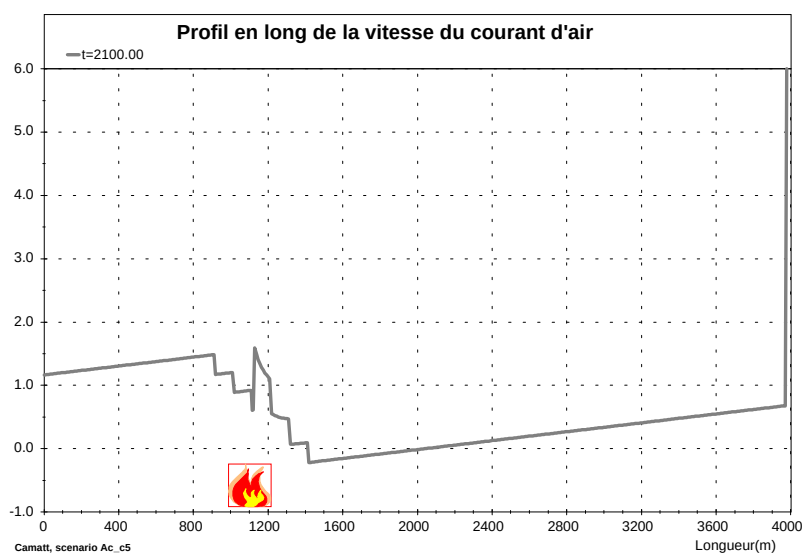
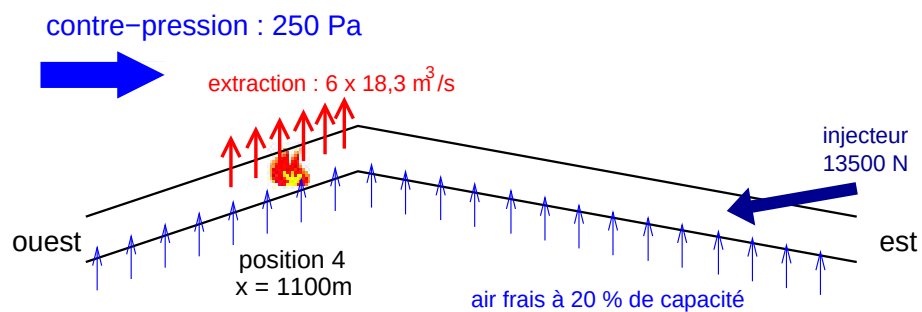


FIG. C.11 – Cas d'un incendie en position 4, avec contre-pression de 250 Pa : schéma des dispositions retenues et profil en long de la vitesse de l'air dans le tunnel en régime stabilisé.

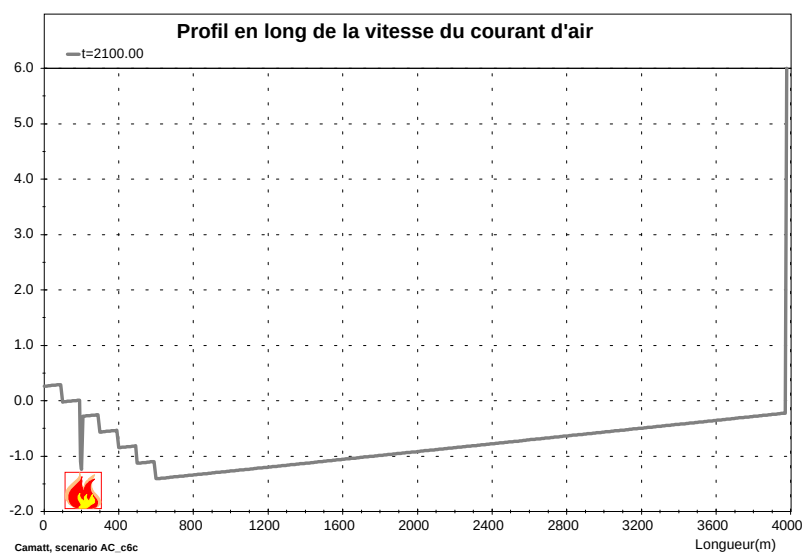
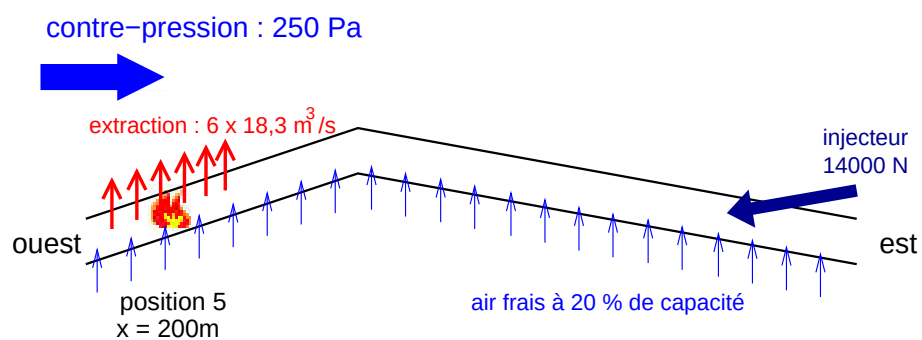


FIG. C.12 – Cas d'un incendie en position 5, avec contre-pression de 250 Pa : schéma des dispositions retenues et profil en long de la vitesse de l'air dans le tunnel en régime stabilisé.

Nombre et implantation des stations de ventilation

Compte tenu de l'importance des débits d'air à véhiculer, de la longueur de distribution sur 4 km et de la topographie favorable du débouché du tunnel pour y construire des bâtiments, il est prévu une station de ventilation à chacune des têtes chargée chacune de la moitié du tunnel (soit 2 000 m). Les injecteurs sont intégrés aux stations de ventilation.

Par rapport à la solution d'une seule station de tête, cette disposition permet d'éviter un surcoût important pour agrandir l'espace résiduel disponible en voûte. Elle améliore aussi les possibilités de secours, notamment pour le désenfumage, en cas d'indisponibilité des ventilateurs d'une station.

Cantonement de la ventilation

Le tunnel se décompose en deux cantons de 2 000 m, chacun desservi par une station. Cette longueur est acceptable, car :

- pour le désenfumage, la longueur de gaine d'extraction à ne pas dépasser pour un tunnel équipé de trappes télécommandées est de 3 000 m,
- pour l'air frais, une longueur de distribution de 2 000 m est acceptable dans la mesure où est prévu le soufflage en bas de piédroit grâce à des carneaux, et une stratégie de réduction à 20 % du régime de ventilation en cas d'incendie.

La division en quatre cantons de 1 000 m a été examinée mais n'a pas été retenue en raison de plusieurs inconvénients :

- malgré la présence de quatre cantons, les injecteurs restent nécessaires pour contrôler le courant d'air,
- il aurait été nécessaire de construire des gaines de transit, et donc une cloison supplémentaire sur les 1 000 m premiers mètres depuis chaque tête,
- les pertes de charge en galerie auraient été nettement supérieures, ce qui aurait conduit à augmenter la puissance des ventilateurs,
- les visites des gaines de distribution des cantons de tête auraient été difficiles (hauteur réduite).

Dispositions de secours pour les ventilateurs

Il est très important de concevoir les installations pour qu'en cas d'avarie ou de travaux sur un ventilateur, l'ouvrage continue à bénéficier de ressources en ventilation sanitaire et en désenfumage compatibles avec le maintien du trafic. Cela permet d'assurer que les conditions minimales d'exploitation ne conduisent pas à la fermeture totale ou partielle du tunnel lors des opérations d'entretien des ventilateurs ou lors de pannes localisées.

Pour l'alimentation de la galerie de soufflage, comme de celle d'extraction, on branche donc deux ventilateurs en parallèle capables chacun d'assurer la moitié du débit nécessaire. En cas de panne d'une machine :

- en soufflage, la perte d'une partie de la capacité du débit sur un canton (moins de la moitié en raison de la baisse importante de la charge lorsqu'un seul ventilateur est en marche) peut être admise et il n'est pas nécessaire de recourir à un ventilateur de secours,
- en extraction, en revanche, la capacité nominale en désenfumage doit être maintenue et l'on prévoit pour cela d'utiliser l'aspiration par l'autre station en mettant en communication la gaine d'extraction des deux cantons par l'ouverture d'un registre situé entre les deux cantons.

Pour l'injection, trois buses équipées chacune de son propre ventilateur sont prévues. En cas de panne d'une machine, les deux tiers de la capacité de poussée restent assurés.

Schéma de ventilation

Le schéma de ventilation retenu est donc celui représenté sur la figure C.13.

C.4.3 Débit et pression totale des ventilateurs

Débits

Pour les ventilateurs d'air frais, on retient un débit total de $200 \text{ m}^3/\text{s}$ par canton, ce qui conduit à un débit unitaire des ventilateurs en parallèle de chaque tête de $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

Pour les ventilateurs d'extraction, chaque tronçon devant disposer d'un débit effectif aux trappes ouvertes de $110 \text{ m}^3/\text{s}$, on retient une valeur de $120 \text{ m}^3/\text{s}$ extraits en tête de galerie, d'où un débit unitaire des ventilateurs en parallèle de $60 \text{ m}^3/\text{s}$. La réserve de 10 % permet de prendre en compte des fuites aux trappes fermées.

Pour les ventilateurs d'injection, sur la base d'une vitesse d'injection limitée à 35 m/s (pour des raisons de sécurité pour les usagers en tunnel – risque physique de déstabilisation), et pour obtenir une poussée de $14\,000 \text{ N}$ le débit requis ressort à $360 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $120 \text{ m}^3/\text{s}$ par ventilateur.

Pression totale des ventilateurs

Pour les ventilateurs raccordés aux galeries du tunnel, les pertes de charge dans celles-ci représentent une part importante de la charge des machines. De plus, en raison du caractère bidirectionnel de la circulation (effet de pistonnement peu efficace), la ventilation sanitaire sera fréquemment sollicitée, conduisant à des dépenses en énergie électrique importantes. En revanche, l'installation de désenfumage sera très peu utilisée, essentiellement pour des tests périodiques de bon fonctionnement. Il est donc préférable de limiter la charge des ventilateurs de soufflage au détriment de ceux d'extraction. Dans une étude réelle de détail, les répercussions sur le coût des matériels et sur le coût du contrat d'abonnement électrique seraient bien sûr à considérer dans la comparaison économique.

Dans le présent exemple, on choisit d'installer pour l'insufflation d'air frais et l'extraction des ventilateurs de puissances électriques comparables malgré les différences de débit, ce qui conduit à choisir des vitesses d'air maximales en galerie de 20 m/s pour l'air frais et d'environ 17 m/s pour l'extraction². Les calculs prennent en compte une masse volumique de l'air de $1,2 \text{ kg/m}^3$, retenue car chargeant plus les ventilateurs qu'une masse volumique plus faible.

Pour le calcul de la charge totale des ventilateurs de soufflage, présenté dans le tableau ci-dessous en suivant le circuit dans le sens du flux d'air, on prend en compte la distribution répartie, comme indiqué dans la section 5.4.4 page 76. Pour les gaines, on retient une rugosité des parois de $0,001 \text{ m}$, ce qui, pour un diamètre hydraulique de $2,85 \text{ m}$, conduit à un coefficient de perte de charge linéique $\lambda_c = 0,016$. Les éventuelles fuites des gaines ne sont pas prises en compte explicitement dans le calcul, ce qui conduit à des pertes de charge par excès.

² En termes de pertes de charge, la différence des vitesses maximales est amplifiée par le fait que le débit d'air frais décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne du ventilateur, alors que l'extraction des fumées dans la partie centrale de l'ouvrage conduit à un transit à vitesse constante sur une grande longueur.

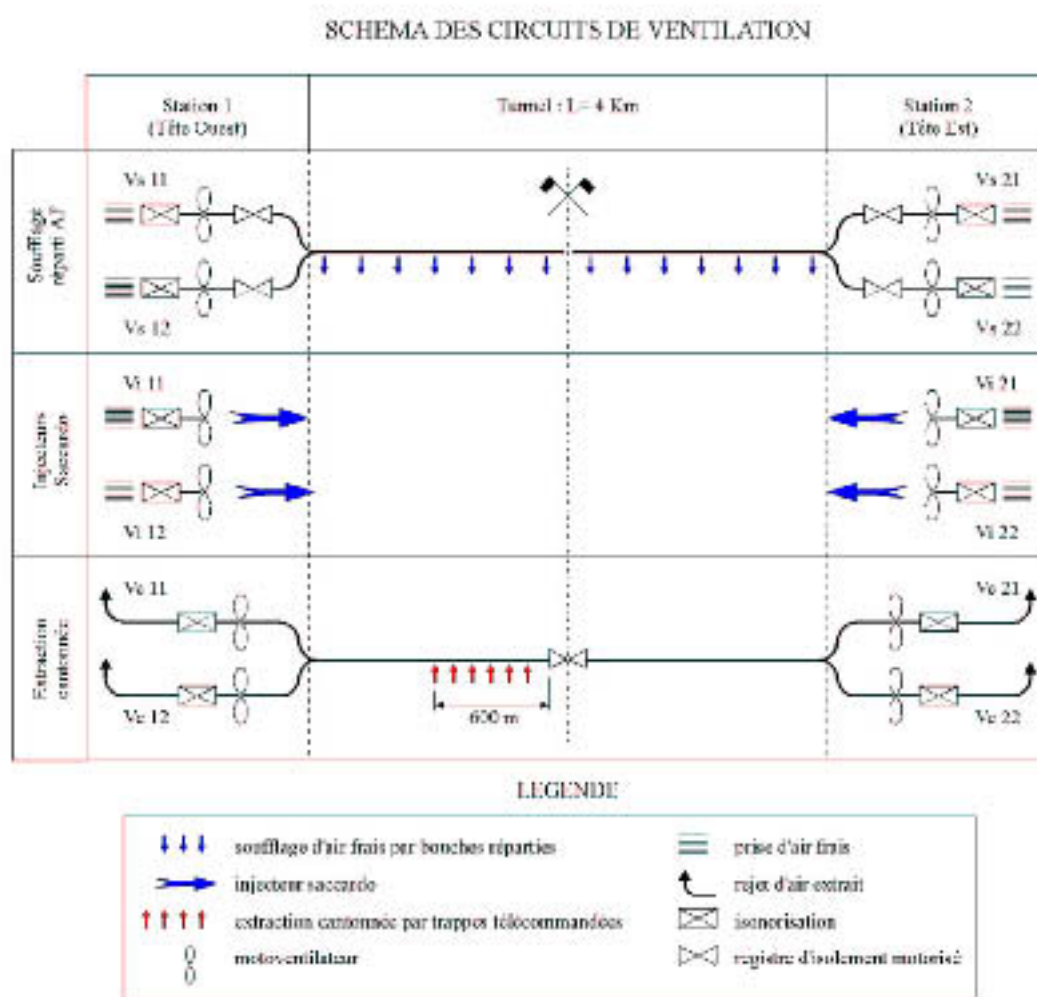


FIG. C.13 – Schéma de ventilation retenu.

élément de circuit	débit (m ³ /s)	vitesse de référence (m/s)	coefficient de pertes de charge (-)	perte de charge (Pa)
circuit de soufflage d'air frais				
prise d'air (ventelle pare-pluie, grillage)	200+360	4,0	5	48
forfait insonorisation + élargissement brusque	200+360	-	-	100
ouïe d'aspiration	100	32,0	0,1	80
ventilateur	-	-	-	-
pièce rond/carré	100	32,0/25,0	0,05	31
registre	100	25,0	0,05	19
culotte/diffuseur	100/200	25,0/20,0	0,1	38
pièce de raccordement	200	20,0	0,1	24
distribution sur 2000 m	200	20,0	$\lambda_c = 0,016$	898
forfait dernière bouche et carneau	1	-	-	200
forfait surpression tunnel	-	-	-	50
total				1488

En prenant par précaution une marge de 10 %, la pression totale de chacun des ventilateurs d'insufflation d'air frais peut donc être arrondie à 1640 Pa.

Pour le calcul de la charge totale des ventilateurs d'extraction, présenté dans le tableau ci-dessous en suivant le circuit dans le sens du flux d'air, on retient le cas le plus défavorable qui correspond à l'ouverture des trappes les plus éloignées du ventilateur. Pour les gaines, on retient comme pour le circuit d'insufflation une rugosité des parois de 0,001 m, ce qui, pour un diamètre hydraulique de 2,45 m, conduit à un coefficient de perte de charge linéique $\lambda_c = 0,016$. Les fuites des gaines et des trappes fermées dans la section en transit sont évaluées à 10 % en débit, qui est pris en compte explicitement dans le calcul de la perte de charge dans la section de transit, car il est impossible de réaliser des trappes qui, fermées, ne laissent passer aucune fuite. En plus de ce calcul, on vérifie (calcul non inclus dans cette annexe) que s'il n'y a aucune fuite (c'est à dire un débit de 120 m³/s sur la section de transit) la perte de charge totale reste compatible avec le type de ventilateur choisi.

élément de circuit	débit (m ³ /s)	vitesse de référence (m/s)	coefficient de pertes de charge (-)	perte de charge (Pa)
circuit d'extraction d'air vicié				
forfait dépression tunnel	-	-	-	50
dernière trappe	18,3	10	7,5	450
aspiration sur 600 m	110	15,5	$\lambda_c = 0,0165$	191
transit sur 1400 m	110/120	15,5/16,9	$\lambda_c = 0,0165$	1468
pièce de raccordement et coudes	120	16,9/20	0,3	72
culotte /convergent	120/60	20/28	0,1	47
pièce rond/carré	60	28/35	0,05	37
ventilateur	-	-	-	-
pièce rond/carré	60	35/28	0,05	37
diffuseur	60	28/15	0,1	47
coude à 90°	60	15	0,2	27
transit et coudes	60	15/10	0,4	54
échappement rejet	60	10	1	60
			total	2540

En prenant par précaution une marge de sécurité de 10 %, la pression totale du ventilateur s'élève donc à 2795 Pa.

En ce qui concerne les ventilateurs d'injection, la part essentielle des pertes de charge correspond, comme pour des accélérateurs, à la pression dynamique du jet. Les calculs sont présentés ci-dessous.

élément de circuit	débit (m ³ /s)	vitesse de référence (m/s)	coefficient de pertes de charge (-)	perte de charge (Pa)
circuit d'injection				
prise d'air (ventelle pare-pluie, grillage)	200+360	4	5	48
forfait insonorisation + élargissement brusque	200+360	-	-	100
ouïe d'aspiration	120	32	0,1	61
ventilateur	-	-	-	-
pièce rond/carré	120	32/25	0,05	31
registre	120	25	0,05	19
changement de forme/ convergence buse	120	25/35	0,05	37
échappement/injection	120	35	1	735
			total	1031

Avec une marge de sécurité de 5 %, la pression totale de chaque ventilateur peut donc être évaluée à 1080 Pa. Cette marge de sécurité de 5 % est suffisante du fait de la simplicité du circuit.

C.4.4 Puissance installée des moto-ventilateurs

La puissance électrique à fournir aux ventilateurs se calcule en utilisant la formule (voir note 12 page 79)

$$P = \frac{Q \cdot H}{1000 \eta}$$

où

- la puissance P est exprimée en kW,
- le débit volumique Q est exprimé en m^3/s ,
- la pression totale H est exprimée en Pa,
- et η , le rendement global du moto-ventilateur, est de l'ordre de 0,7 pour les ventilateurs ayant des caractéristiques correspondant au calcul développé dans cette annexe.

La puissance unitaire de chaque machine est donc de

- 234 kW pour l'air frais,
- 240 kW pour l'extraction,
- et 185 kW pour l'injection.

Avec quatre machines de soufflage d'air frais, quatre machines d'extraction et six machines d'injection nécessaires à l'ensemble de l'installation de ventilation de l'ouvrage, la puissance totale installée est de 3 006 kW dont 936 kW pour le soufflage, 960 kW pour l'extraction et 1 110 kW pour l'injection. Il est à noter que toutes les machines ne fonctionneront jamais simultanément : pour l'extraction, seuls 2 ventilateurs fonctionneront ensemble, et pour l'injection, seuls 3 ventilateurs fonctionneront ensemble. La puissance électrique appelée sera donc toujours très nettement inférieure à 3 006 kW.

C.4.5 Dispositions constructives pour les stations de tête

Comme indiqué dans la section 5.4.9 (page 84), la conception d'une station de ventilation est basée sur l'analyse d'un grand nombre d'options fonctionnelles possibles, et le choix final doit de plus faire l'objet d'un projet d'intégration architecturale.

La figure C.14 page 149 montre, à titre indicatif, une solution possible pour les stations de tête dans le cas présent. Il est entendu que d'autres principes organisationnels du bâtiment auraient pu être proposés selon les contraintes spécifiques du projet et la priorité accordée à tel ou tel élément de choix.

Les principaux principes retenus dans le présent exemple sont les suivants :

- bâtiment construit à cheval sur la chaussée de manière à implanter des ventilateurs hélicoïdes à axe horizontal dans le prolongement des galeries de ventilation en voûte ;
- injection Saccardo intégrée au bâtiment ;
- baie de prise d'air commune aux deux ventilateurs de soufflage et aux deux ventilateurs d'injection ; l'air frais est prélevé à l'arrière du bâtiment, loin du rejet pollué de tête du tunnel pour éviter le risque de recyclage ; la baie est décollée du sol pour éviter son obstruction l'hiver par la neige ;
- cheminée de rejet déportée et intégrée plus en hauteur à la pente du massif ;
- accès et manutention du matériel lourd par pont roulant et trappe donnant sur une voie à gabarit PL latérale à la chaussée ;
- implantation des armoires électriques des ventilateurs dans un local séparé du hall de ventilation où règne une ambiance plus hostile (niveau de bruit élevé de machines et conditions climatiques sévères dues au balayage de l'air extérieur aspiré par les ventilateurs d'air frais) ;

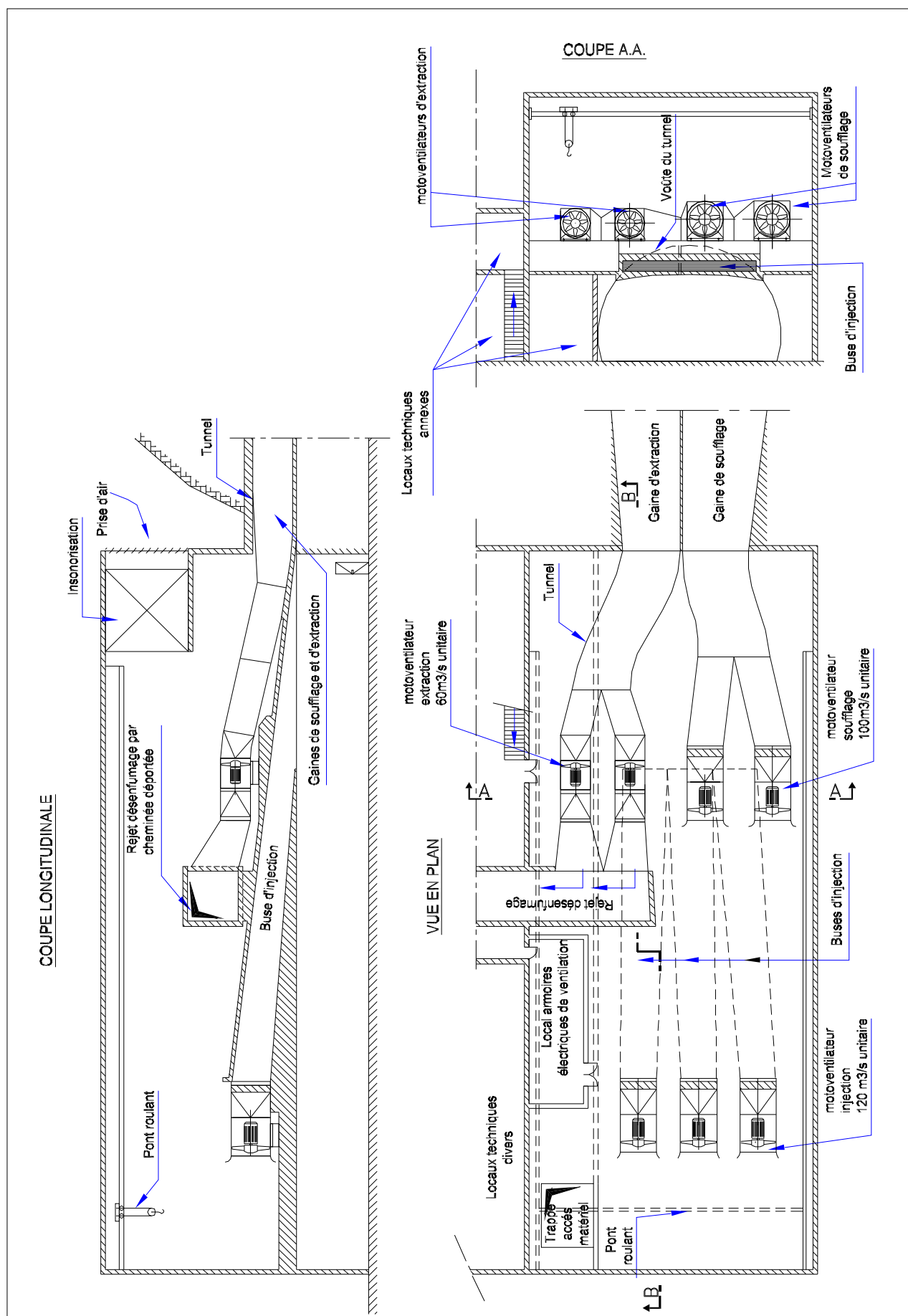


FIG. C.14 – Aménagement possible pour les stations de ventilation de tête.

- protection acoustique de l'environnement par des silencieux à baffles parallèles disposés d'une part dans la baie commune de prise d'air et d'autre part à l'aval de la cheminée de rejet ;
- chaque moto-ventilateur peut être isolé de son circuit aéraulique par un registre motorisé, soit pour des raisons fonctionnelles (démarrage successif des machines), soit pour les opérations de maintenance ;
- toutes les machines sont à vitesse variable et alimentées par armoire électrique avec convertisseur de fréquences afin de limiter l'appel de courant de démarrage, mais aussi,
 - pour l'air frais, afin d'ajuster au mieux le débit aux besoins variables ;
 - pour l'injection, afin d'asservir la poussée produite aux besoins de la maîtrise du courant d'air en cas d'incendie.

Les caractéristiques absorbantes du dispositif d'insonorisation sont calculées sur la base d'un niveau de bruit limite admissible à l'extérieur peu sévère compte tenu de l'absence d'habitation aux alentours. Du côté intérieur au tunnel le respect d'un niveau de bruit limite de 85 dBA peut conduire à prévoir un traitement acoustique des parois des buses d'injection ou à la mise en place d'un silencieux.

Le schéma d'aménagement présenté montre l'importance des bâtiments à prévoir pour ventiler un ouvrage en système de type transversal. Les dimensions de la station à construire à chaque tête sont : 42 m de long, 23 m de large et 19 m de haut.

C.4.6 Commande de la ventilation

Exploitation de la ventilation sanitaire

Le suivi du niveau de pollution et de la vitesse longitudinale en tunnel sera effectué en 6 points de mesures répartis selon un pas de 600 m environ, soit trois points par canton de ventilation. Chaque point sera équipé d'un analyseur de CO, d'un opacimètre, d'un analyseur de NO et d'un anémomètre.

Le fonctionnement de la ventilation sera entièrement automatique grâce à son asservissement aux informations délivrées par les capteurs de pollution. Le principe de la régulation fera l'objet d'une étude ultérieure visant à optimiser les dépenses en énergie électrique. On prévoira notamment un fonctionnement coordonné des deux stations pour éviter le recours à de hauts régimes sur une seule d'entre elles.

Exploitation du désenfumage en cas d'incendie

La détection d'un incendie en tunnel sera suivie d'une action de validation par l'opérateur du poste de commandement. La mise en oeuvre du désenfumage sera alors enclenchée automatiquement dans un scénario préprogrammé qui intégrera aussi la commande adaptée des autres systèmes de sécurité.

Le bon repérage de l'abscisse du véhicule en feu est d'une importance capitale pour une bonne gestion de la ventilation en cas d'incendie, tant pour l'ouverture télécommandée des bonnes trappes extractrices, que pour la régulation du courant d'air longitudinal au droit du feu. Cette localisation se fera par l'utilisation conjointe des différents équipements du tunnel, en particulier celle des caméras de surveillance.

Le régime de soufflage d'air frais sera réduit à 20 % dans l'ensemble du tunnel. La poussée variable des injecteurs de tête sera mobilisée sur la base d'un asservissement à la mesure des anémomètres en tunnel. Un recours aux commandes manuelles pour la modification de régimes sera possible, permettant notamment de modifier l'effet des injecteurs en fonction des demandes du responsable des opérations de secours.

Des baromètres placés aux têtes fourniront une estimation des contre-pressions atmosphériques utile à la connaissance des conditions de désenfumage. Le cas échéant, cette information pourrait être utilisée pour établir les conditions minimales d'exploitation ou pour prendre des mesures particulières de gestion du trafic en cas de contre-pressions exceptionnellement fortes.

L'installation de désenfumage fera l'objet d'essais périodiques d'ouverture et fermeture des trappes et de tests de la bonne maîtrise automatique du courant d'air en simulant des lieux d'incendie différents au pupitre du poste de commande.

C.5 Ventilation des dispositifs d'évacuation

Ce point n'est pas abordé dans cette annexe, car le choix des dispositifs d'évacuation n'est pas précisé ici.

C.6 Variante en tunnel creusé au tunnelier

En fonction des autres éléments du projet de tunnel, il se peut qu'un profil en travers de forme circulaire soit retenu. Dans ce cas, le dimensionnement de la ventilation serait différent. En effet, pour une même largeur roulable, la section excavée est alors plus grande, et donc l'espace disponible pour les gaines est plus grand, ce qui conduirait à analyser :

- la diminution de la puissance électrique nécessaire pour le circuit d'air frais,
- l'opportunité de renforcer les débits d'extraction de fumée pour améliorer la prise en compte des incendies de marchandises dangereuses.

La gaine d'extraction serait positionnée en plafond et la gaine d'air frais sous chaussée. Afin de ne pas avoir à élargir la section excavée, il serait opportun d'analyser la possibilité d'utiliser cette dernière comme cheminement d'évacuation des usagers, et de la ventiler en conséquence.

Responsable de la production : Pierre Carlotti - Cetu

Conception couverture - Edition : SEVEN Lyon

 04 72 19 83 83 -  04 72 19 83 80

 seven-lyon@cogetefi.com

25 avenue François Mitterrand
Case n°1

69674 BRON cedex

☎ 04 72 14 34 00

☎ 04 72 14 34 30

✉ cetu@equipement.gouv.fr

www.equipement.gouv.fr/cetu

