

VENTILATION DES OUVRAGES D'ÉVACUATION ET D'ACCÈS DES SECOURS EN TUNNEL ROUTIER



AVERTISSEMENT

Les documents d'information ont pour but de fournir une information sur une technique ou un problème nouveau ou insuffisamment traité par ailleurs. Le lecteur pourra y trouver des repères susceptibles de l'aider dans son activité. Le contenu et les éventuelles conclusions présentés ne doivent pas être considérés comme des recommandations du CETU. Bien que le maximum soit fait pour s'assurer de la fiabilité des sources utilisées, la responsabilité du CETU ou des auteurs du document ne saurait être engagée.

*Ventilation des ouvrages d'évacuation
et d'accès des secours en tunnel routier*

Décembre 2016

Centre d'Études des Tunnels

25, avenue François Mitterrand

69674 BRON cedex - FRANCE

Tél. +33 (0)4 72 14 34 00

Fax. +33 (0)4 72 14 34 30

cetu@developpement-durable.gouv.fr

www.cetu.developpement-durable.gouv.fr

TABLE DES MATIÈRES

Objet du document	2
1. Prescriptions réglementaires	6
1.1. Prescriptions générales et typologie des issues	6
1.2. Ventilation	6
1.3. Résistance au feu	7
2. Analyse du fonctionnement d'un système de ventilation d'issue	8
2.1. Notions utiles de mécanique des fluides	8
2.2. Objectif fonctionnel du système de ventilation	9
2.3. Origine et maîtrise de la surpression	9
2.4. Valeur de surpression recommandée	10
2.5. Variation des conditions de fonctionnement	10
3. Démarche de conception	11
3.1. Architecture du système	11
3.2. Dimensionnement du débit de ventilation	13
3.3. Dimensionnement des organes de décompression	13
3.4. Choix d'un ventilateur	15
3.5. Prescriptions réglementaires sur les matériels	15
4. Mesures palliatives en cas de surpression excessive	16
4.1. Systèmes d'assistance à l'ouverture	16
4.2. Portes coulissantes	17
4.3. Ventilateurs bi-vitesse	17
4.4. Ventilateur asservi	17
4.5. Sas multiples	17
5. Ventilation sanitaire des issues	18
6. Impact sur les autres lots techniques	19
6.1. Génie civil	19
6.2. Alimentation électrique	20
6.3. Courants faibles	20
Références	20
Annexe A Exemple traité : communication directe avec l'extérieur	21
Annexe B Exemple traité : rameau de communication intertube	22

OBJET DU DOCUMENT

Dans un tunnel routier, certains ouvrages destinés à l'évacuation des usagers et à l'accès des services de secours doivent être ventilés. L'application de la réglementation, complétée par différents textes de doctrine, n'est pas toujours évidente sur ce point; de plus, elle génère certaines contraintes qui ne sont pas toujours prises en compte à un stade adapté dans les projets de construction ou de rénovation. Le présent document, élaboré à l'intention de tous les techniciens prenant part à un projet où ces exigences s'appliquent, vise donc à :

- rappeler les prescriptions réglementaires applicables sur la ventilation de ces ouvrages,
- préciser certaines notions de mécanique des fluides utiles pour la compréhension du fonctionnement du système,

- décrire les solutions techniques possibles et la méthodologie de conception,
- fournir des éléments relatifs aux contraintes générées par la ventilation de ces ouvrages sur d'autres lots techniques (génie civil, électricité),
- proposer des recommandations spécifiques sur certains matériels.

Les principes décrits peuvent s'appliquer à d'autres types d'ouvrages souterrains, sans préjudice des éventuelles réglementations applicables à ceux-ci.

PRESCRIPTIONS RÉGLEMENTAIRES

1.1 PRESCRIPTIONS GÉNÉRALES ET TYPOLOGIE DES ISSUES

L'instruction technique [1] demande la réalisation d'aménagements pour l'évacuation et la protection des usagers et l'accès des secours, généralement appelés « issues de secours ». Différents types d'issues peuvent être envisagés. Elles ont cependant toutes un point commun : la zone d'attente sécurisée est séparée du tube de circulation potentiellement incendié par au moins deux portes formant un sas. L'interdistance normale des issues est de 400 m en tunnel non urbain et 200 m en tunnel urbain. Elle est réduite (sans que l'exigence soit quantifiée) pour les tubes fréquemment congestionnés à plus de trois voies et les ouvrages accessibles aux transports de marchandises dangereuses.

1.1.1 Communications directes avec l'extérieur

Ce type d'issue se trouve dans les ouvrages souterrains de profondeur modérée, en particulier les tranchées couvertes. Il existe également quelques tunnels creusés « de vallée » équipés de ce type d'issue, avec un débouché sur une chaussée à l'air libre parallèle au tunnel.

Pour l'application de la réglementation, les issues sont considérées de ce type si la distance à l'air libre est inférieure à 15 mètres.

1.1.2 Communications entre tubes

Les rameaux de communication entre tubes sont généralement le moyen le plus simple et le plus économique de réaliser des issues de secours en tunnel creusé bitube. On parle indifféremment de « communications entre tubes » ou « rameaux intertubes », ou plus simplement d'« intertubes » ou « bypass ».

En plus des intertubes accessibles aux piétons, les tunnels de plus de 1000 m de longueur doivent être pourvus d'un intertube accessible aux véhicules de secours (fourgon pompe-tonne) tous les 800 m, soit un intertube sur deux pour un tunnel non urbain.

1.1.3 Galerie de sécurité

L'instruction technique [1] prévoit la possibilité d'utiliser une galerie parallèle au tunnel pour les ouvrages monotubes « *si elle est justifiée pour des raisons techniques (galerie de reconnaissance par exemple)* ». En pratique, la galerie peut aussi être justifiée par le besoin de continuité d'un itinéraire piéton ou cycliste, ou encore par la nécessité d'augmenter la section des gaines de ventilation lors de la rénovation d'un ouvrage. Elle peut donc être ou non accessible au public en situation normale. On peut en outre rencontrer des galeries de sécurité dans des ouvrages bitubes (ancienne galerie de reconnaissance d'un ouvrage monotube ayant été doublé par la suite).

1.1.4 Abris

Les abris sont des zones d'attente contiguës au tunnel et qui offrent des refuges sécurisés en cas d'incendie dans le tunnel. Ils sont obligatoirement reliés à l'extérieur par un itinéraire autre que la zone incendiée du tunnel, mais le cheminement est souvent long et inconfortable (il s'agit en général d'une gaine d'air frais débouchant dans une usine de ventilation). Il est donc prévu que les services de secours interviennent pour escorter les usagers par le cheminement le mieux adapté à la situation : gaine ou tunnel. Un séjour relativement prolongé dans ces abris est possible.

1.2 VENTILATION

Le système de ventilation est obligatoire dans les ouvrages d'évacuation et d'accès des secours, sauf pour les issues débouchant directement à l'extérieur (instruction technique [1], § 3.2.3). Il peut cependant être utile de ventiler ces dernières si leur longueur est importante ou pour compenser certains défauts d'accessibilité aux personnes à mobilité réduite. Ces besoins seront détaillés au § 3.1.1 ci-dessous.

Une issue ventilée doit être en surpression « d'environ 80 Pa » par rapport au tube sinistré. Les paragraphes 2.3, 2.4 et 2.5 ci-dessous sont consacrés à l'interprétation de cette exigence et à une discussion des problèmes posés par son application.

L'activation de la ventilation des issues fait partie de la séquence « incendie » automatisée et intervient donc dès le début de l'événement.

L'instruction technique [1] dispose que dans le cas d'abris, trois d'entre eux doivent pouvoir être alimentés en air simultanément. Aucune prescription analogue n'est faite pour les autres types d'issues. Il semble logique de chercher à ventiler autant d'issues que possible en cas d'incendie de façon à réduire le risque de pénétration de fumée, mais certains effets indésirables doivent être évités.

Dans le cas des abris, la ventilation utilise souvent un circuit commun pour l'alimentation en air frais des différents ouvrages. L'activation de la ventilation dans un grand nombre d'abris impose une contrainte forte sur le dimensionnement de ce circuit d'alimentation, et peut faire augmenter son coût de

façon disproportionnée, et parfois avoir une incidence sur le coût de creusement en raison des sections de gaine totales nécessaires.

Par ailleurs, dans les tunnels longs ventilés transversalement, le débit d'air total injecté dans le tunnel depuis les issues (indépendamment de leur type) peut, en raison du grand nombre d'issues, devenir significatif par rapport aux débits de ventilation du tube et perturber la stratégie de désenfumage.

Si on se trouve confronté à l'un de ces problèmes, le nombre d'issues dans lesquelles la ventilation est activée est à définir en prenant en compte les paramètres suivants :

- la longueur de la zone d'extraction des fumées (les issues doivent être ventilées sur l'ensemble de cette zone au moins) ;
- la probabilité d'un contrôle du courant d'air imparfait et de fumées non confinées dans la zone d'extraction, une probabilité élevée devant conduire à ventiler des issues supplémentaires de part et d'autre de l'extraction ;
- la possibilité de localisation précise de l'incendie et le risque d'erreur, qui doit également conduire à étendre la zone dans laquelle les issues seront ventilées.

Il faut en outre prévoir la possibilité d'activer manuellement la ventilation d'une ou plusieurs issues supplémentaires qui viendraient à être enfumées de façon inattendue en cours d'événement, dans les limites permises par le dimensionnement du circuit d'alimentation en air frais.

1.3 RÉSISTANCE AU FEU

Cette exigence est rappelée car elle a un impact non négligeable sur les caractéristiques des matériels à installer, notamment les portes mais aussi les clapets et registres de ventilation sur les voiles en interface entre l'issue et le tube circulé.

Dans le cas des issues directes à l'extérieur, l'exigence formulée par l'instruction technique [1] est une tenue globale CN 60 du sas. Dans le cas (non conforme à l'instruction technique) où les personnes à mobilité réduite doivent attendre à l'intérieur d'un sas et non après avoir franchi celui-ci, l'exigence est portée à N2 (HCM 120) pour la porte donnant sur le tunnel par la doctrine de la CNESOR [2]. En pratique, cette situation est assez fréquente dans les tranchées couvertes rénovées. Si la zone d'attente se trouve après le sas, la porte N2 est superflue. Elle représente, par son poids, une difficulté supplémentaire pour l'évacuation et induit des coûts d'investissement et de maintenance plus importants qu'une porte CN 60.

Pour les autres types d'issues, on demande également une tenue globale N2 du sas ou du rameau intertube.

Notons qu'en raison des essais au four nécessaires, il est très difficile de justifier la résistance globale d'un ensemble d'éléments dans une configuration géométrique réaliste (par exemple, démontrer que deux cloisons et portes N1 espacées de quelques mètres permettent d'obtenir la résistance globale N2). En pratique, on devra donc prévoir au moins une séparation de niveau N2 (voile et porte) entre un tube circulé et un ouvrage d'évacuation. Dans le cas des intertubes, rien ne justifie *a priori* de renforcer le voile donnant sur un tube plutôt que sur l'autre. On équipe donc généralement ces ouvrages de deux voiles N2 et des portes correspondantes.

ANALYSE DU FONCTIONNEMENT D'UN SYSTÈME DE VENTILATION D'ISSUE

Dans cette partie, on considérera le cas général d'un système permettant de ventiler un ouvrage d'évacuation (issue de secours ou sas) relié à un tunnel par une porte. L'analyse est

valable quelle que soit l'architecture exacte du système; les différentes configurations possibles seront détaillées dans la partie suivante.

2.1 NOTIONS UTILES DE MÉCANIQUE DES FLUIDES

2.1.1 Pression, écoulement en charge

La pression est la contrainte normale (par opposition aux contraintes de cisaillement) existant au sein d'un fluide. En régime établi, ***l'écoulement d'un fluide se fait toujours en sens inverse du gradient de pression***. En d'autres termes, si la pression dans un local A est supérieure à la pression dans un local voisin B (le local A est en surpression par rapport à B), alors l'écoulement de l'air dans un conduit reliant A à B se fera de A vers B. L'écoulement en sens inverse est instable et ne pourra exister que de manière très provisoire. Cela est valable aussi bien pour les écoulements créés volontairement que pour les fuites. Il faut également retenir que pour les cas dont il est question ici, ***la valeur absolue de la pression n'a pas d'influence sur un écoulement; seules les différences de pression entrent en jeu***.

Si on considère l'écoulement d'un fluide dans un circuit constitué de locaux, de conduites et d'organes de coupure, il existe une relation univoque entre le débit traversant le circuit, d'une part, et la différence de pression entre l'entrée et la sortie de ce circuit, d'autre part. Les circuits usuels en ventilation peuvent être décrits par la théorie des pertes de charge, qui suppose que la différence de pression est proportionnelle au carré du débit :

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho \xi \left(\frac{Q}{S} \right)^2 \quad (1)$$

où ΔP est la différence de pression, ρ la masse volumique du fluide, Q le débit volumique, S la section de passage de l'écoulement et ξ le coefficient de ***perte de charge***. Pour les applications décrites dans ce document, on peut considérer que ξ ***dépend uniquement des caractéristiques du circuit d'écoulement, indépendamment du débit***. Les caractéristiques importantes sont notamment la géométrie et l'état de surface des parois. Des ouvrages spécialisés [3] ou la documentation du matériel de ventilation donnent la valeur de ce coefficient. La section S prend généralement des valeurs différentes sur un circuit donné; on additionne alors les pertes de charge calculées sur chaque tronçon de section constante.

On obtient toujours une différence de pression proportionnelle au carré du débit.

On peut retenir les points suivants :

- L'écoulement d'un fluide se fait toujours des hautes vers les basses pressions.
- Pour un circuit d'écoulement de géométrie fixée, la différence de pression entre l'entrée et la sortie augmente rapidement avec le débit (relation quadratique).
- La modification de la géométrie modifie le coefficient de proportionnalité entre la différence de pression et le carré du débit.

2.1.2 Écoulement des fumées entre un tunnel et une issue ventilée

Les fumées chaudes ont des propriétés dynamiques particulières. Des «fumées froides», qui sont en fait de simples particules en suspension, suivraient l'écoulement, et pourraient donc être maintenues à l'extérieur d'un local donné par un écoulement d'air sortant de ce local, aussi faible soit-il. Les gaz chauds chargés de particules de suie produits par un incendie ont la faculté de se propager à contre-courant d'un écoulement ambiant si la vitesse de celui-ci est inférieure à une valeur appelée vitesse critique. C'est pourquoi, dans les tunnels ventilés longitudinalement, on dimensionne le système de ventilation pour qu'il soit capable de créer un courant d'air de 3 m/s au minimum; en-deçà de cette vitesse, un retour de fumées en amont du foyer est possible pour les puissances d'incendie généralement considérées (voir figure 1).

De même, l'écoulement d'air sortant d'une issue ou d'un sas doit avoir une certaine vitesse pour pouvoir maintenir les fumées à l'extérieur de ce local. La vitesse nécessaire est cependant plus faible que celle requise pour ventiler longitudinalement un tunnel; les fumées sont en effet beaucoup moins chaudes au niveau de la porte qu'en plafond du tunnel, et leur faculté à se propager à contre-courant est donc moindre. On estime à environ 0,5 m/s la vitesse nécessaire pour empêcher la pénétration d'une quantité significative de fumée dans l'ouvrage d'évacuation.

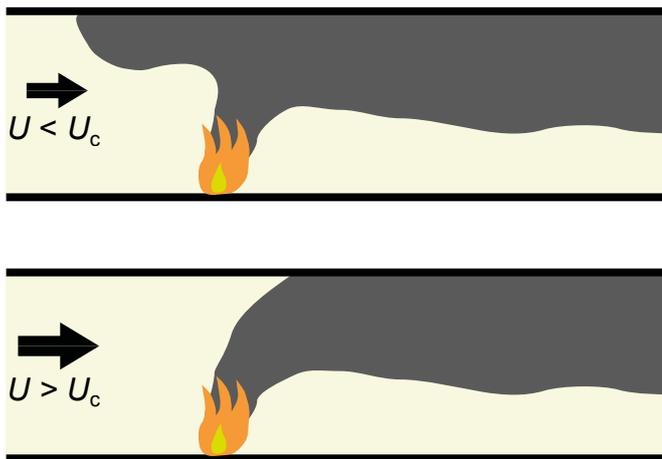


Figure 1 : comportement des fumées chaudes en présence d'un courant d'air de vitesse inférieure ou supérieure à la vitesse critique

La notion de surpression n'intervient pas dans cette analyse. La surpression n'est significative que lorsque les portes sont fermées ; une porte ouverte offre en effet une grande section de passage S ainsi qu'un coefficient de perte de charge ξ modeste, ce qui donne, d'après l'équation (1), une différence de pression également faible. Si on prend les valeurs typiques $Q = 0,9 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 1,8 \text{ m}^2$ et $\xi = 1,5$, on obtient une surpression $\Delta P = 0,2 \text{ Pa}$ environ. Lorsque les portes sont fermées, l'écoulement de l'air se fait à travers des clapets de section plus réduite (typiquement 400×400 ou $600 \times 600 \text{ mm}$) et la surpression devient significative. Les vitesses d'écoulement à travers ces clapets ou dans les éventuelles fuites sont élevées, empêchant également la pénétration de fumées dans l'ouvrage d'évacuation.

2.2 OBJECTIF FONCTIONNEL DU SYSTÈME DE VENTILATION

La difficulté de compréhension du fonctionnement du système de ventilation des issues vient en partie du fait que la surpression mentionnée dans l'instruction technique [1] ne peut pas être un critère d'évaluation de la capacité du système à remplir sa fonction.

L'instruction technique [1] n'explicite pas les objectifs fonctionnels du système et se limite à la mention de la surpression. Cela implique que l'écoulement de l'air se fera de l'issue vers le tunnel. Cependant, comme on l'a vu ci-dessus, la possibilité d'une pénétration de fumée dans l'ouvrage d'évacuation dépend avant tout de la vitesse de l'air dans les différents circuits d'écoulement possibles jusqu'au tunnel, en particulier les portes.

Le dossier pilote Ventilation [4] est plus précis car il mentionne un objectif de vitesse d'air à travers une porte ouverte. Ceci est indispensable pour la conception du système. En effet, si on analyse l'équation (1), on constate que n'importe quelle différence de pression peut être atteinte avec un débit très faible, pourvu que le coefficient de perte de charge soit suffisamment grand ou la section de passage suffisamment petite. L'objectif de vitesse d'air fixé par le dossier pilote à $0,5 \text{ m/s}$ sous-entend qu'on souhaite **empêcher complètement les fumées de pénétrer dans l'issue ou le sas**. D'autres stratégies auraient pu être adoptées, par exemple celle consistant à admettre la pénétration d'une petite quantité de fumées dans l'issue tout en s'assurant d'une purge rapide par renouvellement d'air une fois la porte refermée.

2.3 ORIGINE ET MAÎTRISE DE LA SURPRESSION

Comme on l'a vu plus haut, la surpression de l'ouvrage d'évacuation par rapport au tunnel n'existe que lorsque les portes sont fermées. En effet, la ventilation est alors maintenue en fonctionnement avec un débit presque égal à celui injecté lorsque la porte est ouverte. Ceci permet de s'affranchir du délai de remise en fonctionnement de la ventilation à chaque ouverture de porte et d'éviter des démarrages fréquents pouvant endommager les ventilateurs. L'écoulement s'effectue à travers un ou plusieurs clapets de décompression (ou de décharge) dont la section est largement inférieure à celle d'une porte. La vitesse d'écoulement dans les clapets garantit donc l'absence de pénétration de fumée. Plus les clapets sont petits, plus la surpression est élevée.

La surpression dépend uniquement du débit de ventilation et des caractéristiques des clapets de décompression : nombre, dimensions et réglage.

L'enjeu de protection contre la pénétration des fumées est donc dissocié de celui du réglage de la surpression.

- **Porte ouverte** : la surpression est toujours quasi nulle, un débit minimal est nécessaire pour empêcher les fumées de pénétrer dans l'ouvrage d'évacuation.
- **Porte fermée** : le débit est maintenu, la vitesse d'air dans le circuit d'écoulement est largement suffisante pour empêcher la pénétration des fumées, la surpression existe du fait de la section d'écoulement réduite.

En d'autres termes, au-delà d'un seuil d'environ 20 Pa correspondant à un écoulement significatif et stable d'air vers l'extérieur (absence de risque d'inversion de l'écoulement), **une surpression élevée ne représente absolument pas une garantie de sécurité; c'est le débit de ventilation qui est déterminant pour évaluer le risque d'une pénétration de fumée lors de l'ouverture de la porte.**

En revanche, la surpression a un impact significatif sur l'effort nécessaire pour ouvrir la porte. Une surpression trop élevée peut empêcher l'ouverture par les personnes les plus faibles physiquement. En outre, même si une personne a la capacité physique d'ouvrir une porte, la résistance initiale de celle-ci peut laisser penser qu'elle est verrouillée. La notion de « personne faible physiquement » ne se limite pas aux personnes affectées d'un handicap physique permanent; les personnes âgées, blessées ou portant de jeunes enfants peuvent rencontrer des difficultés similaires.

Le bon fonctionnement d'une issue de secours nécessite une ouverture suffisamment facile des portes, donc entre autres une

surpression modérée. L'instruction technique n° 246 relative au désenfumage dans les établissements recevant du public [5] demande ainsi pour les escaliers une surpression « comprise entre 20 et 80 Pa ». Les autres facteurs conditionnant la facilité d'ouverture d'une porte sont le réglage du ferme-porte, le poids propre de la porte et le bon fonctionnement de la serrurerie (graissage, ajustage). Le ferme-porte obligatoire et le poids important des portes utilisées en tunnel laissent peu de latitude quant au réglage de la surpression.

Obtenir une surpression faible pose des difficultés techniques. Diminuer la surpression nécessite en effet d'agrandir le clapet de décompression. L'espace disponible dans le génie civil est parfois problématique, l'encombrement des clapets étant souvent insuffisamment pris en compte dans la phase de conception des ouvrages (voir § 6.1). Une autre difficulté réside dans la tenue au feu de clapets de grandes dimensions; l'instruction technique [1] demande généralement une résistance de 2 heures sous courbe HCM, c'est-à-dire à 1350 °C environ.

2.4 VALEUR DE SURPRESSION RECOMMANDÉE

L'instruction technique [1] demande une surpression de « 80 Pa environ ». Cependant, en pratique, une telle surpression rend assez difficile l'ouverture des portes par une personne aux moyens physiques limités. De plus, la surpression effective peut différer de celle mesurée à la mise en service. Les conditions de ventilation du tunnel, mais aussi la dégradation de l'état général et du réglage des différents équipements peuvent faire varier la surpression dans les deux sens, et éventuellement conduire à des valeurs trop élevées. La dégradation du fonctionnement de la serrurerie peut également accroître la difficulté d'ouverture de la porte au cours du temps.

En conséquence, il est préférable de dimensionner les équipements sur la base d'une surpression nominale de 40 à 50 Pa, en prenant en compte une augmentation possible jusqu'à 80 Pa. La valeur de 40 Pa dimensionnera les clapets de décompression et celle de 80 Pa le ventilateur (voir ci-dessous).

Cette réduction de la surpression ne dégrade pas le niveau de sécurité car la pénétration ou non de fumée dans l'issue dépend du *débit* de ventilation, et non de la surpression.

2.5 VARIATION DES CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT

Le débit nominal de ventilation est calculé à partir de la vitesse d'air requise à travers les portes ouvertes. Différents facteurs peuvent cependant influencer le débit réel, et donc la surpression quand les portes sont fermées.

En premier lieu, le débit d'un ventilateur dépend toujours de sa charge, c'est-à-dire de la résistance du circuit d'écoulement, ou encore de la différence de pression entre l'entrée du circuit et le ventilateur, d'une part, et entre le ventilateur et la sortie du circuit, d'autre part. Une augmentation de la charge fait baisser

le débit réel. La principale source de ce type de variation dans le cas d'une issue est l'ouverture ou fermeture de la porte. Le débit porte ouverte sera supérieur au débit porte fermée. Cependant, les ventilateurs utilisés pour cette application ont généralement un débit peu dépendant de la charge; cette variation sera donc faible.

D'autres variations peuvent être dues à l'évolution des conditions aux limites du circuit. La pression dans le tunnel, en particulier, peut varier en fonction de son régime de ventilation.

DÉMARCHE DE CONCEPTION

3.1 ARCHITECTURE DU SYSTÈME

3.1.1 Cas des communications directes à l'extérieur

L'instruction technique [1] n'exige pas la présence d'un système de ventilation dans ce type d'issues si les autres prescriptions sont respectées, en particulier la présence d'un sas attendant au tunnel et d'une zone d'attente pour les personnes à mobilité réduite située après la seconde porte du sas (si la configuration de l'issue ne permet pas à ces personnes d'évacuer de façon autonome, ce qui est le cas dans la majorité des ouvrages en raison de la présence d'escaliers). D'autres textes complètent la réglementation :

- Le dossier pilote Ventilation [4] recommande la mise en place d'un système de ventilation lorsque la longueur de l'issue dépasse 15 à 25 m, par souci de cohérence entre les différents types d'issues réalisables dans les ouvrages de « grande » profondeur.
- La doctrine de la CNESOR [2] demande que ces issues soient ventilées si leur conception implique qu'une personne à mobilité réduite puisse être contrainte d'attendre les secours en n'étant protégée que par une seule porte (cas des tunnels existants où la réalisation d'un sas entre le tunnel et l'escalier d'évacuation est impossible).

Dans les autres cas, les coûts d'installation et d'exploitation, ainsi que les effets indésirables de la surpression, peuvent être évités en n'installant pas de système de ventilation.

Les communications directes à l'extérieur sont généralement composées d'un sas attendant au tunnel et de l'issue proprement dite. La surpression à assurer est celle mesurée entre l'issue et le tunnel. Il est donc théoriquement possible de ventiler soit le sas, soit l'issue. Cependant, la mise en surpression de l'issue ne fonctionne que si celle-ci est fermée par une porte étanche côté extérieur, ce qui suppose, d'une part, que la sortie s'effectue par un ouvrage entièrement clos et couvert, et d'autre part que la porte reste autant que possible fermée durant l'incendie. Cette dernière condition est très difficile à garantir lorsque les services de secours interviennent par l'issue, ce qui est toujours possible même si ce n'est pas prévu dans la procédure théorique. Il est donc préférable d'injecter l'air directement dans le sas de façon à limiter les incertitudes sur le comportement effectif du système. Cela minimise également le nombre d'organes de décompression dont le réglage peut se dégrader avec le temps.

Le prélèvement d'air frais peut s'effectuer dans l'issue au-delà du sas ou directement à l'extérieur. Ces deux options diffèrent essentiellement lorsqu'il s'agit de purger l'issue de fumées qui auraient pu y pénétrer lors de l'ouverture simultanée de plusieurs portes. Un ventilateur prélevant l'air frais à l'extérieur injecte de l'air frais dans le sas en toutes circonstances; cependant, il ne permet pas d'éliminer la fumée éventuellement présente dans l'issue (suite à l'ouverture prolongée de toutes les portes). À l'inverse, le prélèvement de l'air frais dans l'issue permet de purger celle-ci par balayage : cependant, cela nécessite la fermeture de la porte séparant le sas de l'issue. Pour choisir l'une de ces solutions, il est recommandé de considérer l'emplacement où une personne (notamment personne à mobilité réduite) peut être contrainte de séjourner de façon prolongée. Si le lieu d'attente est le sas, il est préférable de recourir à un prélèvement à l'extérieur afin de rétablir au plus vite des conditions satisfaisantes dans le sas si l'issue venait à être enfumée. À l'inverse, si le lieu d'attente est situé au-delà du sas, il est préférable de faire transiter l'air frais dans l'ensemble de l'issue (voir figure 2).

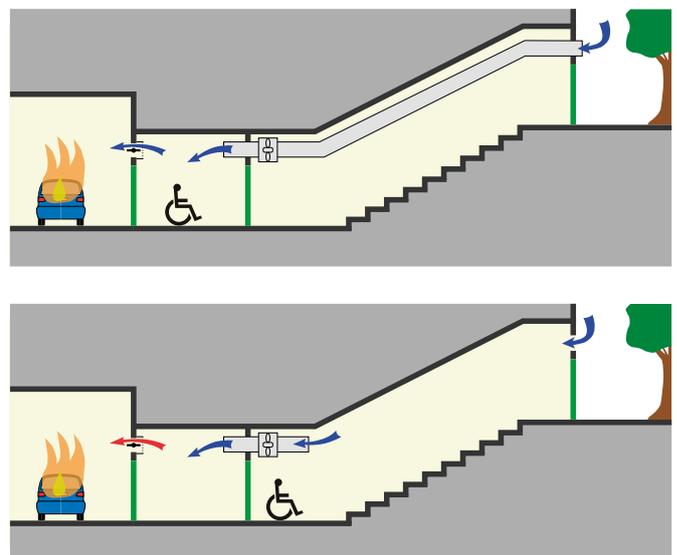


Figure 2 : alimentation en air frais de l'espace d'attente PMR en fonction du point de prélèvement

Le positionnement exact du ventilateur n'a pas d'incidence fonctionnelle et peut être adapté à la configuration des ouvrages, notamment pour réduire le niveau de bruit au niveau des postes d'appel d'urgence, faciliter la maintenance, prévenir les dégradations, ou encore simplifier la mise en œuvre de l'alimentation électrique et du contrôle-commande.

3.1.2 Cas des intertubes



Figure 3 : vue générale de l'intérieur d'un rameau intertube (tunnel de Violay, autoroute A89). On distingue notamment un ventilateur et son silencieux (1) et un clapet de décompression (2)

Bien qu'il soit possible de recourir à un réseau de ventilation distribuant l'air aux différents intertubes, il est très souvent plus économique d'équiper chaque rameau d'un système de ventilation indépendant. L'architecture de ces systèmes est très simple. Un ensemble de ventilation (ventilateur et équipements associés : dispositif coupe-feu, registre d'isolement, silencieux) prélève de l'air frais dans l'un des tubes à travers la voile séparatif et l'injecte dans le rameau. La sortie de l'air (décompression) s'effectue à travers la voile opposée, par un clapet. Un système symétrique permet de réaliser la ventilation dans le sens opposé.

En cas d'incendie, l'air frais est prélevé dans le tube sain et la décompression s'effectue dans le tube sinistré. Cette architecture permet d'assurer une surpression de l'intertube par rapport au tube sinistré peu dépendante des conditions de ventilation dans les tubes.

Une décompression simultanée dans les deux tubes est également envisageable. Elle permet de réduire le nombre de clapets à installer, mais les différents régimes de fonctionnement en fonction de la ventilation des tubes doivent être étudiés finement (voir Annexe B).

Les intertubes ne sont pas supposés être des zones d'attente prolongée, mais des zones de transit ou de séjour provisoire avant évacuation vers le tube sain, qui constitue le lieu sécurisé séparé du tube incendié par deux portes formant sas. Il est donc vraisemblable que les deux portes seront ouvertes simultanément dans de nombreuses situations d'évacuation et d'intervention. Cependant, à la différence des communications directes à l'extérieur, les conditions aux limites du rameau sont influencées des deux côtés par la ventilation des tubes; les têtes étant voisines, on peut considérer les conditions aux limites des deux tubes comme identiques; la différence de régime de ventilation entre tube sain et tube sinistré modifie cependant les conditions aux extrémités des rameaux. Dans

la plupart des cas, il reste possible d'empêcher la fumée de pénétrer dans l'intertube avec les deux portes ouvertes.

La ventilation d'un intertube pourrait même souvent être obtenue par un calepinage judicieux des rameaux et des accélérateurs, sans qu'il soit nécessaire d'installer de système spécifique. Ceci suppose néanmoins que le système de ventilation des tubes reste fonctionnel pendant toute la durée de l'incendie. La possibilité d'une défaillance ou d'un arrêt volontaire du système par les services de secours ne pouvant être exclue, la ventilation reste donc nécessaire pour maintenir la fonction de refuge du tube sain et des intertubes.

3.1.3 Cas des galeries de sécurité

Une galerie de sécurité se comporte aérauliquement comme un second (ou un troisième) tube. Il en existe assez peu d'exemples. On ne ventilera pas l'ensemble de la galerie si elle est ouverte aux deux extrémités, le courant d'air naturel permettant d'y assurer la qualité de l'air. En cas de fermeture étanche de l'une au moins des extrémités (pour prévenir les intrusions ou la pénétration de fumées en provenance du tube incendié par exemple), on prévoira un dispositif de ventilation sanitaire, en particulier pour éviter la pollution liée aux fuites de gaz d'échappement depuis le tube circulé.

La galerie est reliée au tube circulé par des sas. Le niveau de pression relatif de la galerie par rapport au tube circulé dépend du système de ventilation du tunnel. Pour un tube ventilé longitudinalement, ce niveau varie dans le tube suivant la position des accélérateurs. Pour un tube ventilé transversalement, la zone d'extraction des fumées est en dépression par rapport au reste du tube, mais pas nécessairement par rapport à la galerie car certaines dispositions prises pour le contrôle du courant d'air (utilisation d'accélérateurs ou soufflage d'air frais notamment) peuvent compenser cet effet dans certaines zones. Il paraît en outre difficile de garantir une surpression de l'ensemble de la galerie car cela suppose des portes étanches aux deux extrémités; or en cas d'évacuation, ces portes seront probablement ouvertes de façon fréquente, voire permanente, par les usagers et les services de secours.

3.1.4 Cas des abris

L'abri est relié à un cheminement donnant sur l'extérieur, mais celui-ci ne doit en principe être utilisé que sur instruction des services de secours. On peut donc considérer que seule la communication avec le tunnel sera utilisée sans «encadrement» particulier.

Le délai d'attente pouvant être prolongé, une alimentation en air frais de l'abri, et non du sas, est préférable. L'instruction technique [1] demande une ventilation sanitaire de 2500 m³/h, soit 0,7 m³/s; comme on le verra, cette exigence n'est pas dimensionnante, sauf si on lui applique une majoration dans le cas d'un abri de grande surface au sol.

L'air frais doit être amené dans l'abri par un réseau de gaines dédié cheminant dans un espace protégé d'un incendie dans le tunnel avec un niveau de résistance N2 au minimum. Cet espace est souvent la gaine d'air frais du tunnel ; lorsque celle-ci sert de cheminement d'évacuation, l'exigence de résistance N2 s'applique et les communications avec les abris existent. Les longueurs de gaine à installer sont souvent importantes, ce qui peut obliger à augmenter leur section. Elles peuvent alors occuper une section non négligeable de la gaine d'air frais du tunnel. Il faudra donc tenir compte de leur présence dans la conception du système de ventilation principal, voire dans le dimensionnement de la section excavée.

La surpression s'entend entre abri et tunnel. Il existera donc deux « étages » de décompression à travers les deux voiles du

sas. Il est judicieux d'équilibrer les pertes de charge des deux étages pour faciliter l'ouverture des portes.

Le délai d'attente prolongé doit conduire à renforcer les exigences sur certains points. Une redondance du système de ventilation est obligatoire ; l'instruction technique [1] demande *a minima* d'assurer la ventilation par deux ventilateurs, permettant de conserver au moins 50 % du débit en cas de panne. Une redondance complète (deux ventilateurs pouvant chacun fournir seul le débit nominal) n'entraîne cependant qu'un faible surcoût et semble donc préférable. On peut également recommander de limiter fortement le niveau de bruit pour faciliter les communications et éviter les situations de stress.

3.2 DIMENSIONNEMENT DU DÉBIT DE VENTILATION

La section de passage maximale des portes est généralement de 1,40 m × 2,00 m, soit 2,8 m². Cependant, sauf situation particulière, seul le vantail principal comportant une barre anti-panique est utilisé, et la section de passage est donc de 0,90 m × 2,00 m, soit 1,8 m². Dans le cas des communications directes avec l'extérieur, on demande des portes de 0,90 m de large seulement. On rappelle que la vitesse moyenne de l'air recherchée à travers la porte est de 0,5 m/s.

Le débit de ventilation nécessaire est donc de 0,9 m³/s pour chaque porte ouverte sur un cheminement débouchant à l'extérieur (tunnel ou galerie ouverte à l'autre extrémité).

Le nombre de portes supposées ouvertes peut également dépendre du comportement attendu de l'écoulement lors de

l'ouverture des portes. Pour un sas, par exemple, il s'agit de prévoir le comportement de l'écoulement lors de l'ouverture simultanée des deux portes. Si on montre que l'air a de grandes chances de sortir simultanément par les deux portes, il faut prévoir un débit permettant d'assurer la vitesse de 0,5 m/s à travers chaque porte, soit 1,8 m³/s. Dans certains cas, on pourra avoir un écoulement uniquement vers le tunnel, par exemple en raison de la présence d'une troisième porte en extrémité de galerie. Dans ce type de cas, on peut faire l'économie du doublement de débit. Enfin, il existe des configurations sensibles aux conditions de ventilation dans et à l'extérieur du tunnel, et où le sens d'écoulement est pratiquement imprévisible. Un surdimensionnement du débit ne rendra pas forcément le système plus robuste. Son opportunité est à apprécier au cas par cas en estimant la probabilité des différents scénarios.

3.3 DIMENSIONNEMENT DES ORGANES DE DÉCOMPRESSION

Le débit injecté doit être évacué, de préférence vers le tube sinistré, par un ou plusieurs clapets ou registres.

3.3.1 Construction et fonctionnement des clapets de décompression

On demande généralement une tenue au feu N2 (120 minutes sous courbe HCM) pour ces équipements¹, ce qui représente une contrainte forte sur leur conception. Les parties exposées au feu doivent en effet être réalisées en matériau inerte ; on utilise en général des plaques destinées à la protection thermique des structures. Le clapet se ferme automatiquement lorsque la

température à son voisinage excède 100 °C environ ; en effet, il est techniquement impossible de garantir le fonctionnement au-delà de cette température. La ventilation peut alors ne plus être fonctionnelle si aucun autre circuit de décompression n'existe, et en tout cas ne fonctionne plus dans son régime nominal. Dans le même temps, la porte aura également été condamnée par ses fusibles thermiques ou son joint intumescent qui agissent à des températures du même ordre. Il n'y a donc plus lieu de prévenir la pénétration de fumée dans l'issue par la ventilation. Cette situation correspond à un feu développé à proximité de l'issue et ne peut exister qu'après un certain temps, nécessairement supérieur à la durée d'évacuation pour des usagers se trouvant aussi près du feu.

1. La règle générale pour les communications directes avec l'extérieur est une tenue CN60, sauf dans les cas particuliers visés par la CNESOR [2]. Dans le cas des sas d'abris et des intertubes, une tenue globale N2 du sas ou de l'intertube est demandée, mais il est très difficile de la justifier sans prévoir au moins une paroi assurant à elle seule ce niveau de résistance.

L'équipement désigné par « clapet coupe-feu » peut parfois consister en un ensemble fixe de plaques de matériau inerte (similaires aux protections passives de structures) assemblées de façon à isoler l'issue du rayonnement thermique très intense du foyer, et adossé à un registre résistant à une température élevée. Ce registre doit pouvoir se fermer automatiquement

à partir d'un seuil de température fixé et rester ensuite stable mécaniquement jusqu'à la fin de l'incendie. Dans d'autres cas, l'équipement comporte une plaque mobile en matériau inerte assurant la fermeture du clapet et est associé à un registre servant uniquement à ajuster la surpression, et donc soumis à des exigences de tenue en température moins sévères.



Figure 4 : clapets de décompression coupe-feu N2. À gauche : côté tunnel, la protection contre le rayonnement thermique est assurée par des plaques de matériau inerte. Au centre : côté issue, le registre ne s'ouvre que partiellement pour doser la surpression. À droite : clapet « tout en un » avec volet mobile en matériau inerte (position ouverte, vue depuis le tunnel)

3.3.2 Dimensionnement

Il s'agit de prévoir un ou plusieurs clapets offrant une section totale de passage de l'air suffisante pour maintenir la surpression de l'issue à une valeur suffisamment faible pour ne pas gêner excessivement l'ouverture des portes.

L'ensemble génère une perte de charge caractérisée par un coefficient ξ de 3 à 3,5 avec le registre de dosage entièrement ouvert. En prenant $\xi = 3,5$, on obtient :

- Pour un débit de $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$, la section minimale est de $0,21 \text{ m}^2$. Deux clapets de $400 \times 400 \text{ mm}$ permettent d'obtenir cette section, augmentée d'une marge permettant de s'adapter aux caractéristiques exactes du ventilateur installé et de conserver une décompression acceptable en cas de défaillance de l'un des clapets.
- Pour un débit de $1,8 \text{ m}^3/\text{s}$, la section minimale est de $0,42 \text{ m}^2$. On pourra retenir deux clapets de $600 \times 600 \text{ mm}$.

Le dimensionnement est à préciser au stade des études d'exécution avec les caractéristiques exactes des matériels retenus : clapets, portes, ventilateurs, registres, grilles, etc.

3.3.3 Réglage

La perte de charge générée par les clapets de décompression doit être réglable pour compenser les incertitudes liées aux méthodes de calcul et aux caractéristiques précises des équipements disponibles sur le marché pour répondre à un cahier des charges donné.

Deux méthodes de réglage sont possibles :

- ouverture partielle d'un registre à ventelles, ajustée par le biais d'un capteur de fin de course (voir figure 4),
- ajout d'un organe réglable, mais non motorisé, sur le clapet ou registre motorisé qui s'ouvrira, lui, entièrement.

Les deux solutions donnent des résultats équivalents. Suivant la configuration exacte du système, la facilité de réglage et la tenue de celui-ci dans le temps peuvent varier.

3.4 CHOIX D'UN VENTILATEUR

Comme pour tout circuit de ventilation, un calcul de pertes de charge est à mener pour sélectionner les ventilateurs à installer.

Le ventilateur devra :

- pouvoir fournir le débit nécessaire pour obtenir une vitesse de 0,5 m/s à travers les portes considérées ouvertes, et

- pouvoir fonctionner sans pompage une fois les portes fermées, l'écoulement se faisant uniquement à travers les clapets de décompression.

3.5 PRESCRIPTIONS RÉGLEMENTAIRES SUR LES MATÉRIELS

Les clapets doivent, lorsqu'ils sont fermés, présenter un degré coupe-feu identique à celui de la paroi dans laquelle ils sont montés. Ce degré coupe-feu est CN 60 dans le cas d'une communication directe avec l'extérieur aménagée de façon à permettre une attente sécurisée des personnes à mobilité réduite, et N2 dans les autres cas. Le degré N2 est très contraignant pour la conception des matériels. Il ne peut être atteint qu'en utilisant des matériaux spécifiques (similaires à ceux utilisés pour la protection au feu des structures) et en refermant le clapet automatiquement lorsque la température à son voisinage atteint un certain seuil, généralement de l'ordre de 100 °C. Des températures supérieures pourraient déformer le clapet et empêcher sa fermeture ultérieure. En raison de cette caractéristique, il est préférable d'installer les clapets à

une hauteur de 1 m à 1,50 m maximum. En effet, des clapets en partie haute pourraient se refermer alors que les conditions de température à hauteur d'homme sont encore compatibles avec la présence de personnes susceptibles d'utiliser l'issue. Il est en outre préférable de n'installer ces clapets que lorsqu'ils sont réglementairement requis.

Si le clapet est ouvert, c'est l'écoulement d'air vers l'extérieur qui protège le sas ou l'issue du feu ; en cas d'arrêt de la ventilation, le clapet doit se refermer immédiatement.

Les ventilateurs fonctionnent dans de l'air frais. Il n'y a donc pas lieu de leur appliquer une exigence de tenue au feu.

MESURES PALLIATIVES EN CAS DE SURPRESSION EXCESSIVE

Pour des raisons liées à la longueur de l'ouvrage, à son système de ventilation ou aux conditions extérieures, il peut exister des cas dans lesquels la surpression ne peut être maintenue à

un niveau compatible avec une manœuvre aisée des portes en toutes circonstances. Différentes mesures peuvent permettre de pallier ce problème.

4.1 SYSTÈMES D'ASSISTANCE À L'OUVERTURE

Une assistance mécanisée peut être ajoutée sur les portes. Elle peut être assurée par un vérin, un système de contrepoids, etc.

À ce jour, le retour d'expérience en France concerne uniquement les systèmes à vérin électrique (voir figure). Le vérin agit lorsque la barre anti-panique (côté tunnel) ou la poignée (côté issue) de la porte sont manœuvrées. Sa course d'environ 15 cm permet d'entrouvrir la porte sans que l'utilisateur n'exerce de poussée ou de traction. L'effet de la surpression s'en trouve significativement réduit. Il n'est cependant pas totalement supprimé car compte tenu de l'épaisseur de la porte, la largeur de passage de l'air n'est que de quelques centimètres. Après action du système, le ferme-porte est en outre toujours dans une position où son action est forte. Ce type de système, s'il a un impact positif indéniable en termes de facilité d'ouverture de la porte, ne peut donc pallier que des excès de surpression limités.

D'autres systèmes, basés sur ce principe ou sur d'autres, sont cependant envisageables. D'une manière générale, compte tenu du risque de défaillance toujours présent sur un système actif, leur application se limitera à des cas où les difficultés d'ouverture restent modérées. Ils devront en outre répondre aux exigences suivantes :

- Un dysfonctionnement du système d'assistance ne doit en aucun cas empêcher ou rendre plus difficile l'ouverture de la porte. Il ne doit pas non plus conduire à bloquer la porte en position ouverte.
- La présence du système et sa fixation sur la porte ne doivent pas remettre en cause la tenue au feu de celle-ci. En cas de modification structurelle de la porte, toutes mesures devront être prises pour en garantir la stabilité au feu, y compris un nouvel essai si nécessaire.
- L'opportunité de la redondance du système ou de son alimentation sera à apprécier en fonction des difficultés d'ouverture des portes et de leur impact sur la sécurité du tunnel.



Figure 5 : système d'assistance à l'ouverture par vérin électrique (tunnel de Violay, autoroute A89). À gauche : porte fermée, à droite : porte ouverte

4.2 PORTES COULISSANTES

Contrairement aux portes battantes, la force nécessaire à l'ouverture d'une porte coulissante est indépendante de la différence de pression entre ses deux faces. Elles pourraient donc constituer une solution intéressante en cas de très forte surpression. Il faut cependant noter les points suivants :

- L'ouverture d'une porte coulissante est généralement beaucoup moins intuitive que celle d'une porte battante pour les usagers. Les portes coulissantes non motorisées sont d'ailleurs interdites dans les cheminements d'évacuation des établissements recevant du public².
- Le poids propre de la porte et le système de rappel opposent, comme pour les portes battantes, une résistance significative à l'ouverture, accentuée par le caractère inhabituel du mouvement à effectuer. La résistance perçue par l'utilisateur n'est ainsi pas forcément réduite significativement par rapport à une porte battante, surtout en situation de stress.

- Les portes coulissantes ne permettent pas, à ce jour, d'obtenir le niveau de résistance au feu N2.

En conséquence, l'utilisation de portes coulissantes ne devrait être envisagée que pour les secondes portes de sas, à des emplacements où l'utilisateur évacuant est déjà isolé du tunnel par une première porte battante résistante N2. Une signalétique explicative sur la manœuvre des portes est fortement recommandée. Un système d'assistance à l'ouverture est également utile, au moins pour mettre en évidence le fait que la porte est coulissante et non battante par une ouverture automatique partielle.

Les problèmes liés au poids de la porte coulissante pourraient être atténués par le choix d'un vantail coulissant de 90 cm accolé à un vantail battant de 50 cm, qui sera essentiellement utilisé par les services de secours pour le transport de brancards ou de matériel. À la date de publication du présent document, de tels produits ne sont à notre connaissance pas commercialisés.

4.3 VENTILATEURS BI-VITESSE

Un ventilateur bi-vitesse permet de réduire le débit de ventilation, et donc la surpression, lorsque le nombre de portes ouvertes le permet. Le nombre de portes ouvertes à partir duquel la grande vitesse est enclenchée dépend de la configuration exacte du projet. Cette solution peut être intéressante lorsque des contraintes de génie civil empêchent d'installer des

clapets de décompression de taille suffisante. Elle est un peu plus complexe que la solution «standard» (il faut contrôler le changement de vitesse en fonction des portes ouvertes) et des changements de vitesse fréquents peuvent tendre à réduire légèrement la durée de vie des ventilateurs, mais ces inconvénients restent acceptables si le génie civil est très contraint.

4.4 VENTILATEURS ASSERVIS

Dans certaines configurations particulières, les conditions aux limites du système peuvent être très variables et entraîner des variations trop importantes de la surpression. Un système auto-ajustable asservi à une mesure de pression différentielle entre le tunnel et le sas (ou l'issue) peut être une solution appropriée dans de tels cas, si les études montrent qu'un système passif ne peut pas convenir. Le système peut agir sur le ventilateur (par variation de vitesse), l'ouverture du clapet ou les deux à la fois. Les caractéristiques souhaitables d'un tel système sont les suivantes :

- Existence d'un régime de repli en cas de défaillance de la mesure ou de l'automatisme, réglé sur la situation la plus courante.
- Interface minimale avec la GTC-supervision du tunnel afin de ne pas complexifier le système par des entrées-sorties supplémentaires.
- Étalonnage automatique périodique de la mesure de pression différentielle.

4.5 SAS MULTIPLES

L'ajout de portes supplémentaires permet de répartir la différence de pression entre plusieurs «étages» de décompression. Cette solution est robuste et permet en principe de gérer des différences de pression très importantes. Elle est cependant coûteuse en investissement (notamment en génie civil) et

l'encombrement de l'ensemble ne permet pas de l'insérer dans tous les ouvrages. En outre, elle complique le cheminement de l'utilisateur, en particulier des personnes à mobilité réduite, et des services de secours. Elle n'est donc à appliquer qu'en dernier recours.

2. Règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public, article CO 48, § 4.

VENTILATION SANITAIRE DES ISSUES

Les parties précédentes ont été essentiellement consacrées aux systèmes de ventilation destinés à protéger les issues des fumées en cas d'incendie dans le tunnel. Cependant, comme tout local, les sas et issues de secours doivent faire l'objet d'un renouvellement d'air suffisant pour :

- éviter la détérioration du génie civil et des équipements par l'humidité et les autres polluants,
- prévenir l'accumulation de gaz d'échappement toxiques venant du tunnel par des fuites,
- assurer des conditions de température compatibles avec le fonctionnement des équipements installés et le travail du personnel de maintenance.

Dans le cas des locaux faisant partie du circuit aéraulique du système de ventilation incendie, la méthode la plus simple consiste à faire fonctionner ce système pendant de courtes périodes à intervalles réguliers, ainsi que quand un seuil de température prédéfini est dépassé. Cette méthode permet en outre de surveiller simplement le bon fonctionnement du système de ventilation incendie.

Le système pourra être activé plusieurs fois par jour pour une durée de quelques minutes. En effet, le débit de ventilation incendie étant important par rapport au volume des locaux

concernés, le renouvellement de l'air est très rapide. Il est inutile de continuer à ventiler avec un tel débit une fois ce renouvellement effectué ; à consommation énergétique égale, il est préférable de renouveler l'opération plus fréquemment, en conservant un intervalle suffisant entre deux démarrages pour ne pas réduire la durée de vie du ventilateur.

Dans le cas de locaux sur lesquels le système de ventilation incendie n'agit pas, plusieurs solutions sont envisageables :

- faciliter le renouvellement d'air naturel en ouvrant le local sur l'extérieur, si cela est compatible avec le bon fonctionnement de la ventilation incendie (cas des communications directes avec l'extérieur notamment),
- installer un système de ventilation dédié dans lesdits locaux,
- prévoir un circuit aéraulique spécifique activé grâce à des registres, différent du circuit de décompression utilisé en cas d'incendie, et permettant de renouveler l'air de l'ensemble des locaux lors de la mise en marche périodique du système de ventilation incendie.

La solution la plus avantageuse dépend fortement du projet considéré et une étude technico-économique sera donc à réaliser.

IMPACT SUR LES AUTRES LOTS TECHNIQUES

6.1 GÉNIE CIVIL

Comme on l'a vu, la réalisation des systèmes de ventilation des issues nécessite l'implantation d'équipements encombrants, à la fois dans l'issue et sur les voiles la séparant des tubes circulés. Il faut également garder à l'esprit que les issues abritent fréquemment d'autres équipements liés à la distribution d'énergie et au contrôle-commande (GTC), contenus dans des armoires électriques. Les dimensions du génie civil nécessaires à une installation de tous ces matériels, sans perturbation de leur fonctionnement ni difficultés d'accès pour la maintenance, sont donc nettement supérieures au minimum imposé par la simple circulation des usagers à évacuer. Ces contraintes sont souvent sous-estimées au stade de la conception géométrique, y compris pour les ouvrages neufs. La conception détaillée ne peut être finalisée qu'au stade des études d'exécution, une fois les caractéristiques exactes des équipements connues. On peut retenir pour les études d'avant-projet et de projet les préconisations suivantes :

Pour les communications directes avec l'extérieur :

- Prévoir dans chaque voile séparatif entre sas et tube circulé la possibilité d'installer, outre la porte (largeur de passage 900 mm, surlargeur du dormant 200 à 300 mm de chaque côté), un clapet de décompression N2 nécessitant une réservation de 700 × 700 mm, une profondeur de 400 mm à l'intérieur du sas et un dégagement périphérique d'environ 200 mm (installation et câblage du moteur, accès pour maintenance) ; ce clapet sera préférentiellement situé à hauteur d'homme pour en faciliter le réglage.
- Prévoir par défaut l'installation, a priori en partie haute, d'une gaine de diamètre 400 mm reliant le sas à l'extérieur ainsi que d'un ensemble de ventilation (ventilateur, registre, silencieux) de 2000 mm de long, 600 mm de large et 600 mm de haut. Si cet ensemble n'est pas situé dans le sas, le débouché de la gaine devra être équipé d'un silencieux de 1000 mm de longueur et 600 mm de diamètre environ (si l'ensemble de ventilation est dans le sas, le(s) silencieux sont inclus dans les dimensions données).
- Si la ventilation sanitaire est réalisée au moyen d'un système dédié, un clapet supplémentaire est à installer. Il est *a priori* de dimensions nettement inférieures à celles des clapets de ventilation incendie.

- Prévoir l'implantation d'armoires électriques d'alimentation et de commande des équipements de ventilation, soit une surface au sol de 0,5 m² environ, avec un espace suffisant pour l'ouverture des portes et l'intervention sur ces équipements.

Pour les intertubes et les sas de communication avec une galerie de sécurité :

- On rappelle que la largeur de passage minimale de la porte est de 1400 mm pour les communications entre tubes et de 900 mm pour les sas donnant sur une galerie de sécurité.
- Le nombre de clapets de décompression à prévoir est de deux pour chaque voile séparatif ; leurs caractéristiques sont identiques à celles données ci-dessus pour les communications directes avec l'extérieur.
- Si la ventilation sanitaire est réalisée au moyen d'un système dédié, un clapet supplémentaire est à installer. Il est *a priori* de dimensions nettement inférieures à celles des clapets de ventilation incendie.
- Prévoir en sus l'installation sur chaque voile séparatif d'un clapet de prise d'air avec les mêmes contraintes géométriques que pour les clapets de décompression. Les équipements de ventilation raccordés à ces clapets sont généralement fixés en plafond du fait de leur encombrement et des interventions assez peu fréquentes de l'exploitant. Les clapets de prise d'air sont donc en général situés au-dessus des portes.
- Prévoir la possibilité d'installer, *a priori* en plafond du rameau, un ensemble de ventilation par voile, dont la longueur peut atteindre 2 à 3 m (registres, ventilateurs, silencieux, pièces de raccordement) et la hauteur environ 800 mm.
- Prévoir l'implantation d'armoires électriques comme pour les communications directes avec l'extérieur.

Pour les abris :

- La largeur de passage minimale de la porte est de 900 mm.
- Prévoir un clapet de décompression dans le voile entre l'abri et le sas, toujours avec les caractéristiques géométriques précédentes, et un dans le voile entre le sas et le tunnel.

- Si la ventilation sanitaire est réalisée au moyen d'un système dédié, un clapet supplémentaire est à installer. Il est a priori de dimensions nettement inférieures à celles des clapets de ventilation incendie.
- La surface au sol minimale réglementaire de l'abri (50 m²) permet en principe l'installation en plafond de l'ensemble des équipements de ventilation nécessaires. La hauteur sous plafond doit toutefois être suffisante pour installer les équipements (hauteur 800 mm environ) tout en évitant une trop forte impression de confinement pour les usagers en attente prolongée.
- Prévoir l'implantation d'armoires électriques comme pour les autres types d'issues.
- Les tunnels équipés d'abris comportent un réseau spécifique protégé du feu permettant l'alimentation en air de ces abris. La présence de ce réseau doit être prise en compte dans la conception de l'ensemble du génie civil,

y compris le profil en travers type. En particulier, un cheminement dans la gaine d'air frais du tunnel peut avoir un impact sur le dimensionnement du système de ventilation principal de l'ouvrage.

Les ouvrages d'évacuation sont protégés du feu et de l'atmosphère agressive du tunnel, et constituent donc un emplacement intéressant pour bon nombre d'équipements sensibles. Il faudra donc souvent ajouter des réserves supplémentaires d'espace au sol et des dégagements pour l'implantation d'armoires électriques et les interventions sur celles-ci.

Rappelons que les préconisations ci-dessus ne sont que des données «enveloppe», à utiliser pour le dimensionnement en phase amont des ouvrages de génie civil, et ne préjugent en rien des résultats des études de conception des systèmes de ventilation eux-mêmes.

6.2 ALIMENTATION ÉLECTRIQUE

Les équipements de ventilation des issues nécessitent évidemment une alimentation électrique. La puissance absorbée par les ventilateurs est de l'ordre de 1 à 3 kW par machine.

La ventilation des issues ne fait pas partie des équipements devant être raccordés à l'alimentation secourue sans coupure (onduleurs).

6.3 COURANTS FAIBLES

Sur l'ensemble d'un système de ventilation d'issue, il existera un nombre significatif de capteurs susceptibles de remonter des informations à divers niveaux du système de contrôle-commande : alimentation des ventilateurs, position des clapets, etc. Il n'est pas forcément utile que toutes ces informations soient remontées à la supervision. Le non-démarrage d'un ventilateur peut par exemple s'expliquer par différents défauts

(sur le ventilateur lui-même, son registre d'isolement, etc.), mais une intervention sur site sera de toute façon nécessaire ; l'information de non-démarrage peut donc suffire au niveau supervision, les informations de position des registres peuvent être superflues. Ces spécifications sont à adapter en fonction des moyens et de la politique interne de l'exploitant.

RÉFÉRENCES

- [1] Ministère de l'Intérieur, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, *Circulaire interministérielle n° 2000-63 du 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national*, Annexe 2 : instruction technique relative aux dispositions de sécurité dans les nouveaux tunnels routiers (conception et exploitation).
- [2] Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, Ministère de l'Intérieur, de l'Outre-Mer et des Collectivités territoriales, Commission nationale d'évaluation de la sécurité des ouvrages routiers (CNESOR), *Rapport d'activité 2006, 2007 et 2008*, février 2010.
- [3] I.E. Idel'cik, *Mémento des pertes de charge*, Eyrolles, 1969.
- [4] Centre d'Études des Tunnels (CETU), *Dossier pilote des tunnels – Ventilation*, novembre 2003.
- [5] Ministère de l'Intérieur, *Arrêté du 22 mars 2004 portant approbation de dispositions complétant et modifiant le règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public (dispositions relatives au désenfumage)*, Annexe III : instruction technique n° 246. Journal officiel de la République française, 1^{er} avril 2004, page 6343.

ANNEXE A – EXEMPLE TRAITÉ : COMMUNICATION DIRECTE AVEC L'EXTÉRIEUR

Le cas traité est celui d'une communication directe avec l'extérieur dans le cas d'une tranchée couverte ancienne. Un sas contigu au tunnel est aménagé, mais en raison du manque d'espace entre la seconde porte du sas et l'escalier, les personnes à mobilité réduite sont contraintes d'attendre de l'aide à l'intérieur du sas, c'est-à-dire en n'étant isolées du tunnel que par une porte unique. La ventilation mécanique du sas est donc nécessaire.

Architecture du système

On apporte l'air directement dans le sas afin de rendre l'écoulement indépendant de l'ouverture de la porte située en haut de l'escalier d'évacuation. Il est donc possible de fermer l'issue côté voirie de surface par un édifice non étanche, voire un simple grillage.

On choisit d'acheminer l'air frais depuis la surface jusqu'au sas par une gaine.

Calcul du débit de ventilation

En cas d'ouverture simultanée des deux portes du sas, l'air peut s'écouler soit vers le tunnel, soit vers l'extérieur, soit dans les deux directions avec une répartition variable. Il est très difficile de prévoir a priori le comportement de l'écoulement. Plusieurs cas sont possibles en fonction du type de ventilation du tunnel et de la position de l'issue considérée :

- Si le tunnel est localement en dépression, l'air injecté dans le sas s'écoulera naturellement vers le tunnel, et un courant d'air se créera même depuis la surface et s'ajoutera à la ventilation mécanique. Il est donc inutile d'augmenter le débit injecté dans le sas.

- Si le tunnel est localement en surpression, l'air du tunnel et la fumée auront tendance à pénétrer dans l'issue. Compte tenu des niveaux de pression en jeu et des capacités de ventilation installées en issue, il est très peu probable qu'une augmentation du débit injecté dans le sas puisse contrecarrer cet effet. La seule solution consiste à refermer le plus rapidement possible l'une des portes du sas afin que la ventilation puisse jouer son rôle. Là encore, il est inutile de considérer pour le dimensionnement un écoulement simultané à travers les deux portes du sas.

Le débit de dimensionnement est donc celui correspondant à un écoulement de 0,5 m/s à travers l'une des portes du sas, soit 0,9 m³/s.

Dimensionnement des clapets de décompression

Comme exposé au § 3.3.2, il faut une surface de clapet de 0,21 m² minimum pour obtenir une surpression de 40 Pa maximum. En fonction des contraintes de génie civil, on pourra retenir deux clapets de 400 × 400 mm ou un clapet unique de 600 × 600 mm.

Ventilation sanitaire

La présence d'une ouverture passive dans l'ouvrage de surface suffit à assurer une aération convenable de l'issue si sa longueur n'est pas trop importante. Pour la ventilation du sas, l'utilisation périodique du système de ventilation incendie est la solution la plus économique.

ANNEXE B – EXEMPLE TRAITÉ : RAMEAU DE COMMUNICATION INTERTUBE

Calcul du débit de ventilation

Le débit de dimensionnement est celui correspondant à un écoulement de 0,5 m/s à travers chacune des portes du sas, soit 1,8 m³/s au total. On ne tient pas compte, pour ce dimensionnement, des vantaux semi-fixes dont l'usage est a priori exceptionnel et réservé aux services de secours.

Analyse du fonctionnement du système

L'état aéraulique du système, c'est-à-dire les débits transitant par les différents éléments et les niveaux de pression dans les différents volumes concernés, est différent suivant le régime de ventilation dans chacun des tubes, les portes éventuellement ouvertes ainsi que les conditions aux limites aux têtes des tubes (déterminées par les conditions météorologiques).

Les écarts de pression entre les deux extrémités du passage intertubes peuvent être évalués à l'aide d'un modèle monodimensionnel tel que CAMATT.

On considère un tunnel bitube sans pente d'une longueur de 1200 m. La section aérée est de 70 m² et son périmètre de 35 m. La différence de pression entre têtes considérée pour le dimensionnement de la ventilation longitudinale est de 20 Pa. Le tunnel est pourvu de deux rameaux de communication entre tubes, aux PM 400 et 800. Chaque tube comporte 4 batteries de 2 accélérateurs de 1100 N chacun, aux PM 100, 300, 500 et 700.

Grâce à CAMATT, on peut tracer les profils de pression statique dans différents régimes de ventilation et identifier la différence de pression maximale entre les tubes au droit d'un rameau intertubes. Ici, cette configuration est celle correspondant à une différence de pression nulle entre les têtes. Les profils sont représentés sur la figure 6.

On constate qu'au droit de chacun des rameaux, le tube sinistré est en surpression en raison de la poussée plus importante des accélérateurs (ceux du tube sain fonctionnent en sens inverse et avec un objectif de vitesse plus faible). Cette situation peut conduire à ajuster le calepinage des accélérateurs, ce qui peut réduire les différences de pression mais probablement pas supprimer complètement le phénomène. Avec des différences de pression de cet ordre, la ventilation du rameau, même renforcée, ne suffira pas à éviter la pénétration de fumée si les deux portes sont ouvertes simultanément. Il y a donc lieu

d'inciter les usagers et les services de secours, par exemple par une signalétique appropriée, à éviter autant que possible cette situation.

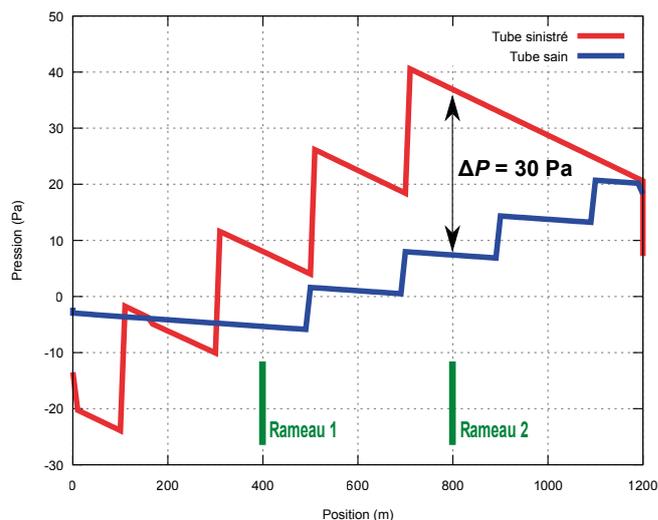


Figure 6 : profils de pression statique dans un tunnel bitube

Dimensionnement du système

La surpression de 30 Pa est à ajouter aux pertes de charge du réseau pour le dimensionnement du ventilateur. Étant du même ordre que la surpression nominale de 40 Pa entre le rameau et le tube sinistré, elle peut avoir une importance significative pour le choix du matériel.

Les pertes de charge du réseau sont donc les suivantes :

- Aspiration : registre de 600 x 600 mm, coefficient de perte de charge : environ 1 soit une perte de charge de 15 Pa.
- Conduites, registre d'isolement et rejet en sortie du silencieux : diamètre du silencieux 560 mm, coefficient de perte de charge de 2 soit une perte de charge de 64 Pa.
- Surpression de l'issue : valeur maximale 80 Pa (imposée par le réglage du clapet de décompression)
- Surpression du tube sinistré par rapport au tube sain : 30 Pa.

La pression du ventilateur doit donc être de 189 Pa pour un débit de 1,8 m³/s.

Certaines caractéristiques comme les dimensions de l'orifice d'aspiration, le diamètre du ventilateur, etc. peuvent être adaptées aux contraintes du projet ; ces modifications sont bien entendu susceptibles de modifier les pertes de charge.

Contributeurs

Ont participé à la rédaction du présent document :

Antoine MOS, CETU

Jean-François BURKHART, CETU

Michel DEFFAYET, CETU



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

