



Direction des routes d'Île de France

Autoroute A115 – Modernisation de la tranchée couverte de Taverny (95)

PRO – Notice ventilation

22/01/2019

LOMBARDI INGÉNIERIE
66 rue Escudier 92100 BOULOGNE BILLANCOURT
70 rue de la Villette 69003 LYON
+33 (0)4 26 84 26 10
info@lombardi-ing.fr

www.lombardi.group



Lombardi

SUIVI DES MODIFICATIONS

Version	Date	Rédaction	Vérification
1	22/01/2019	Desanghere Sylvain Bruno Rivier	

SOMMAIRE

SUIVI DES MODIFICATIONS	2
DOCUMENTS DE REFERENCE	5
ACRONYMES	6
I. CONTEXTE	7
I.1. Objet du document.....	7
I.2. Objectifs de la mission	7
I.2.1. Programme de travaux.....	7
I.2.2. Phases DIAG et AVP	7
I.2.3. Choix du MOA.....	8
I.2.4. Demandes complémentaires	8
II. MODES D'EXPLOITATION DE LA VENTILATION.....	9
II.1. Mode « automatique »	9
II.2. Mode « manuel distant »	9
II.3. Mode « manuel local »	9
II.4. Mode « maintenance »	9
III. DESENFUMAGE	10
III.1. Stratégie de désenfumage	10
III.1.1. Réglementation applicable	10
III.1.2. Activation des accélérateurs pour le désenfumage	10
III.2. Dimensionnement de la poussée des accélérateurs	11
III.2.1. Hypothèses de calcul	11
III.2.2. Poussée nécessaire	12
III.3. Exigences complémentaires.....	14
III.3.1. Pilotage.....	14
III.3.2. Tenue à la chaleur.....	14
III.3.3. Ancrage des accélérateurs	14
IV. VENTILATION SANITAIRE	16
IV.1. Stratégie de ventilation sanitaire	16
IV.1.1. Réglementation applicable	16
IV.1.2. Capteurs CO, NO2, opacimètres et anémomètres.....	16
IV.1.3. Activation des accélérateurs pour la ventilation sanitaire	18
IV.2. Fonctionnement de la ventilation sanitaire	18
IV.2.1. Gestion des ordres de marche	18
IV.2.2. Algorithme de ventilation sanitaire.....	18
V. VENTILATION DES ISSUES DE SECOURS.....	21
V.1. Stratégie de mise en sécurité des issues de secours.....	21
V.1.1. Principe	21
V.1.2. Dimensionnement.....	21

V.2. Exploitation	22
VI. DISTRIBUTION ELECTRIQUE.....	23
VI.1. Cantonnement de l'alimentation de la ventilation.....	23
VI.2. Cheminement des câbles d'alimentation.....	23
VI.3. Alimentation des circuits d'accélérateurs	24
VI.4. Pilotage	24
VII. SPECIFICATIONS TECHNIQUES DETAILLEES	25
VII.1. Accélérateurs	25
VII.2. Variateurs de fréquence	25
VII.3. Ancrages des accélérateurs.....	25
VII.4. Capteurs.....	26
VII.5. Suppression des IS	26

DOCUMENTS DE REFERENCE

- [1] Dossier pilote ventilation, CETU, 2003
- [2] Circulaire interministérielle n° 2006-20 du 29/03/2006 relative à la sécurité des tunnels routiers d'une longueur supérieure à 300 m
- [3] Instruction technique relative aux dispositions de sécurité dans les nouveaux tunnels routiers (conception et exploitation)
- [4] Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers, Fascicule 4 : les études spécifiques des dangers, CETU, 2003
- [5] Le traitement de l'air des tunnels routiers, état des connaissances sur les études et les réalisations, CETU 2016
- [6] Note d'information n° 26, la détection et le contrôle du dioxyde d'azote dans les tunnels routiers, CETU 2017
- [7] Observations sur le dossier d'AVP de la tranchée couverte de Taverny, CETU, 30/03/2018
- [8] Mise en sécurité du tunnel de Taverny - Synthèse de l'avis de la MOA sur l'AVP V2, DIRIF 2018
- [9] Mise en sécurité du tunnel de Taverny - Avis AMO sur l'AVP V2, CETU 2018
- [10] Ventilation des ouvrages d'évacuation et d'accès des secours en tunnel routier, CETU, document d'information, décembre 2016

ACRONYMES

IS	Issue de secours
GTC	Gestion technique centralisée
OST	Opérateur de surveillance du trafic
PC	Poste de contrôle

I. CONTEXTE

I.1. OBJET DU DOCUMENT

Cette notice vise à détailler les propositions faites au stade du PRO en ce qui concerne les besoins en ventilation et désenfumage de la tranchée couverte de Taverny.

I.2. OBJECTIFS DE LA MISSION

I.2.1. Programme de travaux

Le volet ventilation du marché de maîtrise d'œuvre comprend :

- La vérification de l'état de la ventilation et de ses capacités de désenfumage ;
- Sa remise en état éventuelle si nécessaire.

I.2.2. Phases DIAG et AVP

I.2.2.1. État actuel

En l'état actuel, la ventilation est constituée dans chaque tube de 2 batteries de 4 accélérateurs non réversibles, positionnés à environ 100 et 150 m des têtes (poussée en champ libre de 1 100 N, puissance électrique absorbée de 26 kW). Le régime de fonctionnement unitaire n'est pas variable. En cas d'incendie, toutes les machines du tube incendié sont activées, tandis que celles du tube sain sont mises à l'arrêt pour éviter le recyclage de la fumée. Selon le rapport du maître d'ouvrage, le dimensionnement de ce système a été réalisé en appliquant la méthode forfaitaire de l'IT [3] pour un ouvrage de longueur comprise entre 500 et 800 m, qui consiste à majorer de 50 % la poussée nécessaire pour atteindre l'objectif de vitesse de courant d'air de 3,0 m/s.

Il n'y a pas de système de mise en surpression des issues de secours.

Les anémomètres qui devraient être présents ont été déposés ou bien n'ont jamais été mis en place. Ils n'ont pas été retrouvés au stade du DIAG et il n'en est pas fait mention dans les documents du DOE de 1999.

La ventilation sanitaire est pratiquement intégralement obtenue par le pistonnement des véhicules (trafic important et vitesse autorisée de 90 km/h dans l'ouvrage). Si les mesures de CO et d'opacité atteignent malgré tous des niveaux élevés, alors la GTC active un certain nombre d'accélérateurs selon un tableau prédéfini. Il n'y a actuellement pas de mesure de concentration en NO₂.

I.2.2.2. Observations des équipements en place

Les principales observations faites au stade DIAG/AVP sont les suivantes :

- Les structures de supportage des accélérateurs sont dans un état satisfaisant ;
- Les accélérateurs et coffrets de commande sont dans un état de vétusté avancé (corrosion) ;
- Une mesure in situ des vitesses longitudinales obtenues en activant les accélérateurs a été exploitée pour recalculer une modélisation 1D de la ventilation. Ce recalage montre que le système actuel ne permettrait pas d'obtenir une vitesse de 3,0 m/s en amont d'un incendie de 30 MW avec des véhicules dans l'ouvrage ainsi qu'une pression adverse de 15 Pa à la tête de sortie, pour chaque tube, si l'on suppose qu'une batterie est détruite par l'incendie ;
- L'activation des accélérateurs en sens inverse n'est actuellement pas possible ;

- Les issues de secours ne disposent pas de ventilation mécanique.

1.2.2.3. Fiabilisation de la prise en compte des effets météorologiques

Dans la pièce 1 du Dossier de Sécurité de 2014, il est indiqué que la valeur typique de la pression à laquelle le système de désenfumage doit faire face est de 15 Pa. Ce résultat est établi en référence à la rose des vents Météo France de la station météorologique du Bourget. Un calcul de pression basé sur la rose des vents de la station de Pontoise suggère une valeur voisine de 16 Pa au 95^{ème} centile. Il faut noter que l'exploitation d'une rose des vents prise à quelques kilomètres d'un tunnel reste une approche très approximative pour évaluer les statistiques des courants d'air naturels dans un tunnel. Il peut exister en effet des effets locaux du relief et des constructions aux abords de l'ouvrage qui viennent significativement modifier les vitesses de vent aux têtes.

Dans sa note du 30/03/2018 [7], le CETU indique que l'ordre de grandeur de la pression de 15 Pa est cohérent avec les valeurs couramment retenues pour le dimensionnement des systèmes de ventilation des tunnels en Île-de-France et cite des exemples allant de 12 à 20 Pa.

En considérant les allures de quelques roses des vents sur dix ans pour des stations météorologiques situées aux alentours de la tranchée couverte de Taverny, on constate une certaine prédominance des vents de Sud-Ouest, tandis que l'ouvrage est situé plutôt selon un axe Sud, Sud-Est. Pour ne pas prêter le flanc à des critiques susceptibles d'émerger lors de l'instruction administrative du Dossier Préliminaire de Sécurité, nous retenons la valeur conservative de **20 Pa**, afin de compenser l'incertitude sur les effets locaux du vent.

1.2.3. Choix du MOA

Plusieurs options ont été présentées en phase AVP pour atteindre les performances attendues de la ventilation longitudinale, consistant à remplacer tout ou partie des machines.

Le MOA retient la solution qui consiste à remplacer la totalité des accélérateurs. C'est la solution optimale pour la tranchée couverte de Taverny car elle permet notamment d'atteindre le niveau de performance requis par l'instruction technique, au moyen d'équipements dont la fiabilité et la maintenabilité sont assurées.

1.2.4. Demandes complémentaires

L'avis du MOA [8] comprend les demandes complémentaires suivantes :

- Optimiser la puissance requise des accélérateurs ;
- Étudier la possibilité de disposer d'accélérateurs réversibles à 30 % ;
- Apporter des éléments probants sur la stratégie de désenfumage en 2 phases.

L'avis de l'AMO [9] comprend les demandes complémentaires suivantes :

- Privilégier les scénarios suivants : scénario unique quel que soit l'état du trafic (fluide ou bloqué) et scénario de suraccident ;
- Vérifier le câblage des accélérateurs ;
- Préciser le principe de cheminement des câbles.

II. MODES D'EXPLOITATION DE LA VENTILATION

La ventilation de la tranchée couverte de Taverny peut être activée selon les 3 modes d'exploitation suivants.

II.1. MODE « AUTOMATIQUE »

Le mode automatique est le mode par défaut. Il correspond à des algorithmes préprogrammés et exécutés par la GTC. Ce mode ne nécessite pas d'intervention de l'OST.

L'OST n'intervient que pour lancer un scénario de désenfumage, essentiellement en cas d'incendie dans le tunnel. L'OST peut invalider des équipements ; la GTC reconfigure alors le système avec les équipements restants à disposition.

II.2. MODE « MANUEL DISTANT »

Ce mode correspond à la commande unitaire d'équipement par l'OST, depuis le PC. Il est prioritaire sur le mode automatique. Il peut être utilisé sur demande des pompiers.

II.3. MODE « MANUEL LOCAL »

Le mode manuel local est disponible à partir de contacteurs situés sur les armoires ou coffrets de commande des équipements installés localement. Le passage en mode manuel local est signalé à l'OST et les équipements concernés ne peuvent plus être commandés automatiquement ou à distance. Le mode manuel local est prioritaire sur les autres modes.

II.4. MODE « MAINTENANCE »

Ce mode permet de lancer des scénarios préprogrammés permettant de réaliser facilement les essais périodiques du matériel.

III. DESENFUMAGE

III.1. STRATEGIE DE DESENFUMAGE

III.1.1. Réglementation applicable

Au sens de la réglementation, la tranchée couverte de Taverny est un ouvrage urbain bitube à circulation monodirectionnelle, à trafic non faible, de gabarit routier autorisé supérieur à 3,5 m, de longueur supérieure à 500 m, interdit aux transports de matières dangereuses, de degré de surveillance D4.

Pour un tunnel urbain monodirectionnel jusqu'à 500 m de longueur, l'instruction technique [3] autorise le recours à une installation de désenfumage par ventilation longitudinale, capable d'assurer une vitesse moyenne du courant d'air de 3,0 m/s dans la section du tunnel en amont du foyer et dans le sens de la circulation routière.

En raison du risque de congestion en aval d'un incendie, l'instruction technique recommande également de ne pas appliquer le principe de ventilation longitudinale au-delà d'une longueur de 500 m.

La longueur de la tranchée couverte de Taverny est très proche de cette valeur (507 m). D'autre part, selon le dossier de sécurité de l'ouvrage, « les phénomènes de congestion et les ralentissements dans cet ouvrage sont extrêmement rares et ne surviennent qu'après un évènement exceptionnel du type accident situé en aval de l'ouvrage ».

III.1.2. Activation des accélérateurs pour le désenfumage

Le principe de désenfumage longitudinal peut être conservé, sous réserve que le système soit en mesure de gérer une situation exceptionnelle de suraccident.

Il semble difficile de détecter une congestion et cette situation est très rare dans la tranchée couverte de Taverny. Aussi, la stratégie de désenfumage peut rester simple et robuste en ne considérant que 2 situations :

- Dans le cas général (trafic fluide ou bloqué), la ventilation longitudinale doit être activée rapidement pour protéger de la fumée les usagers bloqués en amont du foyer ;

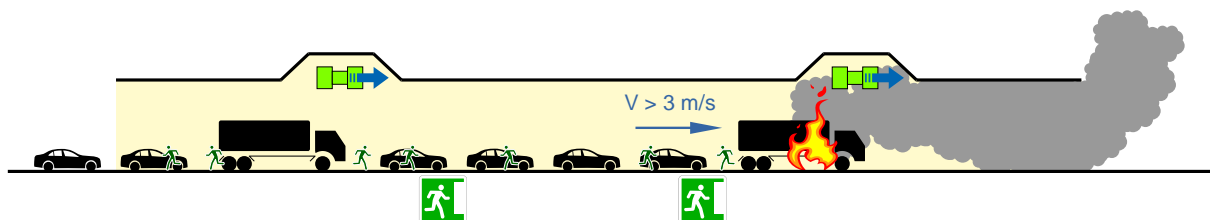


Figure 1. Scénario principal de désenfumage

- Le cas d'un incendie se déclarant parmi les véhicules bloqués en amont d'un accident ne doit pas conduire à activer le plus rapidement possible la ventilation longitudinale. Il s'agit, dans cette situation très particulière, de chercher dans un premier temps à préserver la stratification de la fumée. Toutes les machines doivent être à l'arrêt (ventilation sanitaire stoppée). Dans un second temps, une fois les usagers évacués, il est possible d'activer la ventilation longitudinale comme dans le cas général, pour faciliter notamment l'intervention des secours en dégageant l'accès au foyer.

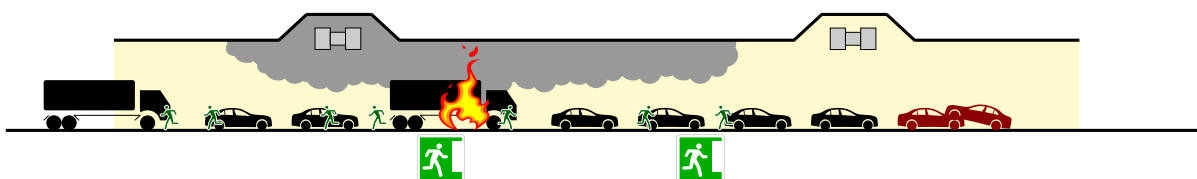


Figure 2. Scénario de désenfumage dans un contexte de suraccident (première phase)

III.2. DIMENSIONNEMENT DE LA POUSSEE DES ACCELERATEURS

III.2.1. Hypothèses de calcul

En cas d'incendie, la ventilation doit être mise en marche à un régime permettant d'atteindre au moins 3,0 m/s dans la section du tunnel en amont du foyer, dans le sens de la circulation.

Cette vitesse doit pouvoir être obtenue y compris en présence de véhicules arrêtés dans le tunnel et avec des conditions adverses dues aux effets atmosphériques défavorables représentés ici par une pression de 20 Pa. L'effet adverse de la pente du tunnel (effet « cheminée ») doit également être pris en compte dans le dimensionnement de la poussée nécessaire.

Les accélérateurs situés à proximité immédiate d'un incendie violent ne peuvent résister à la chaleur pendant toute la durée de l'incendie. Pour le dimensionnement de l'installation, on considère le scénario d'un incendie situé près d'une batterie entraînant la perte rapide de celle-ci.

Conformément à la note du CETU [7], on considère en plus pour le dimensionnement qu'un accélérateur n'est pas disponible sur la batterie non détruite par l'incendie.

Selon le guide des ESD du CETU [4], le tunnel étant autorisé aux PL hors TMD, le terme source standardisé représentant l'incendie de dimensionnement à prendre en compte est l'incendie d'un PL (puissance maximale de 30 MW), tel que représenté sur la figure 3.

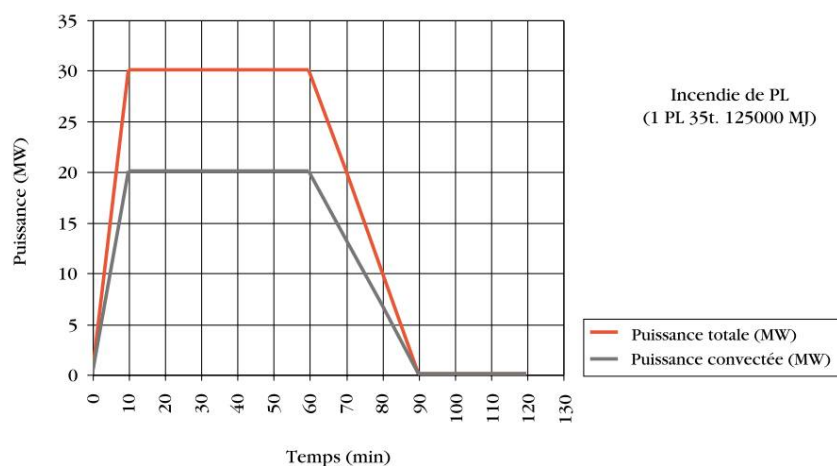


Figure 3. Courbe de puissance d'un incendie de 30 MW selon le guide [4]

III.2.2. Poussée nécessaire

Sauf mention contraire, les paramètres de calcul prennent les valeurs par défaut du logiciel Camatt 2.2 (modèle 1D utilisé pour le dimensionnement).

Le coefficient d'installation est de 0,85 avec des accélérateurs placés dans des bossages comme c'est le cas dans la tranchée couverte de Taverny. Conformément aux recommandations de la note du CETU [7], la poussée en champ libre des accélérateurs doit être minorée de 12 % pour tenir compte des pertes de charges dues aux grilles équipant obligatoirement les machines. On considère donc pour les calculs un coefficient d'installation de **0,75**.

Les calculs tiennent compte du trafic et de son arrêt au niveau du foyer (pistonement qui s'atténue progressivement et courant d'air qui s'inverse sous l'effet de la pression de 20 Pa appliquée en tête de sortie). Par hypothèse, le système de désenfumage est activé au bout de 3 min après le départ de l'incendie et il atteint sa pleine capacité en 1 min.

Les caractéristiques aérauliques des tubes utilisées dans les calculs sont les suivantes :

	Unité	Tube W	Tube Y
Section courante	m ²	56	63
Section aux accélérateurs	m ²	73	82
Périmètre	m	31	34
Diamètre hydraulique	m	7,2	7,4
Longueur	m	507	507
Coefficient de frottement pariétal	-	0,020	0,020
Pente (sens circulation)	%	- 0,5%	+ 0,5 %
Pression en tête de sortie	Pa	20	20

Le dimensionnement consiste à rechercher la poussée minimale nécessaire au niveau des machines non détruites par la chaleur pour obtenir une vitesse en amont supérieure ou égale à 3,0 m/s.

Les calculs réalisés avec Camatt montrent qu'une poussée de **6 000 N par tube** permet d'obtenir une vitesse suffisante dans tous les cas de figure avec un incendie de 30 MW. Le cas le plus défavorable correspond à un incendie sous la première batterie, conduisant à sa destruction, la seconde batterie devant fonctionner dans les gaz chauds, ce qui réduit son efficacité.

Dans Les simulations, malgré le maintien d'une pression de 20 Pa en tête de sortie, la vitesse longitudinale est d'abord élevée sous l'effet du pistonement. Le démarrage de l'incendie conduit à la formation d'un bouchon en même temps que l'atténuation du pistonement. La pression appliquée en tête de sortie conduit alors à un retournement du courant d'air, puis la mise en marche des accélérateurs 3 min après le démarrage de l'incendie permet bien d'obtenir une vitesse supérieure à 3 m/s en aval du foyer.

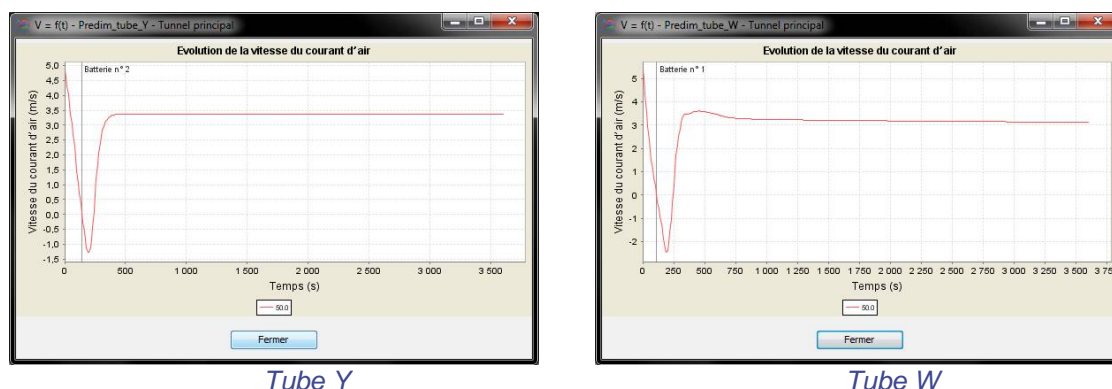


Figure 4. Évolution de la vitesse en amont de l'incendie avec 6 kN de poussée par batterie

La figure suivante montre l'évolution des conditions de vitesse et de température selon Camatt pour l'incendie simulé dans le tube W (tube le plus défavorable).

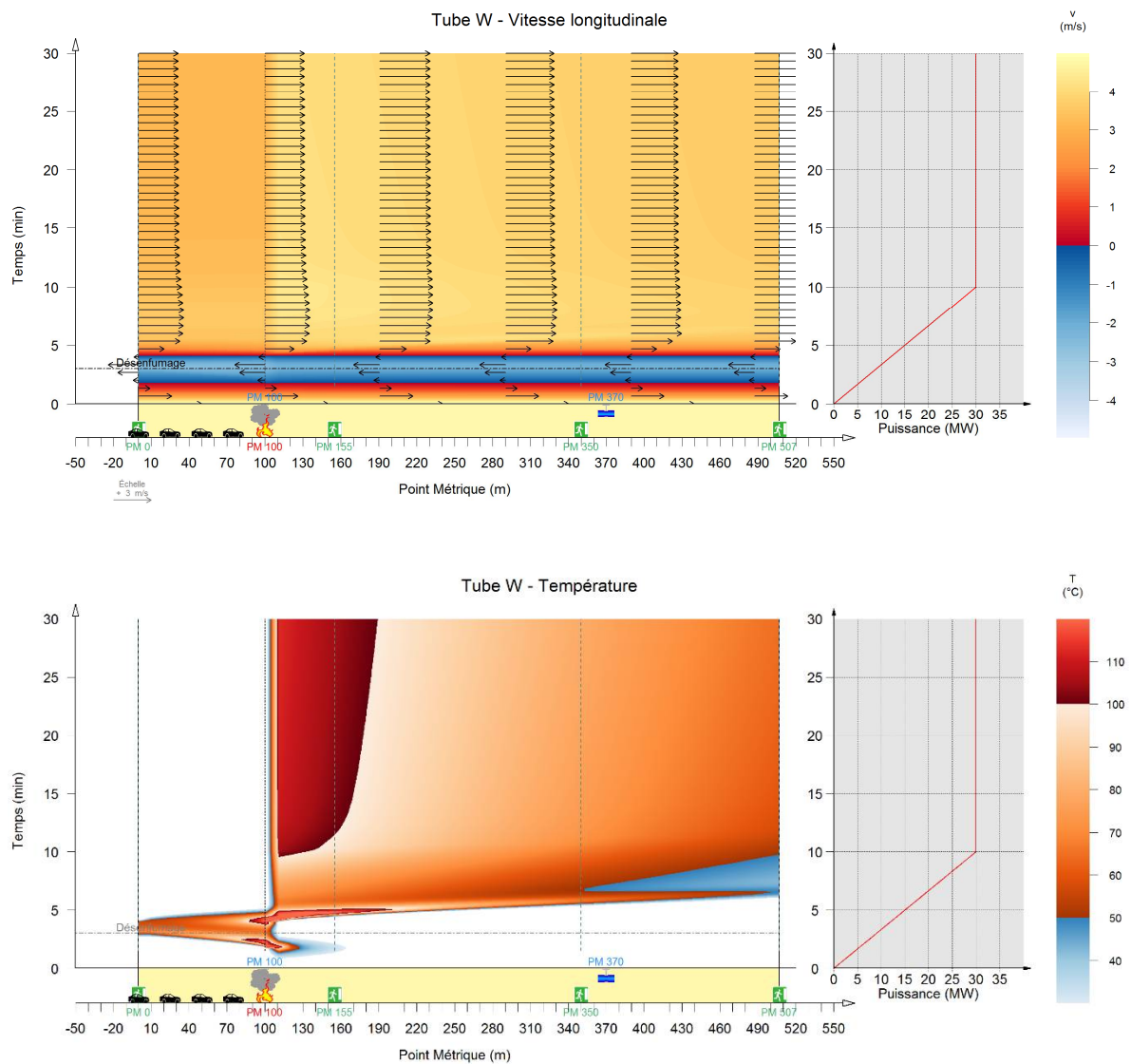


Figure 5. Évolution de la vitesse longitudinale et de la température dans le tube W

Les accélérateurs peuvent être optimisés pour une direction d'écoulement (accélérateurs « monodirectionnels »). Leur utilisation en sens inverse devra néanmoins offrir une poussée valant au moins 30 % de la poussée en sens direct. Ceci est atteignable avec la plupart des machines du marché.

Conformément à la note du CETU [7], si l'on considère de plus qu'un accélérateur n'est pas disponible sur la batterie non détruite par l'incendie, alors il faut que la poussée de 6 000 N soit assurée par 3 machines au lieu de 4 et la poussée unitaire est donc de **2000 N** par accélérateur. La puissance électrique d'un accélérateur de 2 000 N est voisine de **55 kW**.

III.3. EXIGENCES COMPLEMENTAIRES

III.3.1. Pilotage

Le désenfumage doit faire l'objet de régimes de fonctionnement préprogrammés pour faire face rapidement dès les premières minutes après l'alerte.

La surveillance étant ici de degré D4, le désenfumage est déclenché par l'opérateur de surveillance du trafic. Si l'OST a identifié que le trafic est bloqué depuis plusieurs minutes avant l'occurrence d'un incendie, alors il n'active pas le scénario de désenfumage « trafic fluide », mais le scénario secondaire « trafic bloqué » (arrêt de tous les accélérateurs) afin de laisser évacuer les usagers situés en aval du foyer (au sens de la circulation). La DAI permet de détecter la présence d'un véhicule arrêté dans le tunnel et a fortiori une situation de trafic bloqué.

Si le trafic est simplement congestionné (véhicules circulant à vitesse réduite) au moment de la détection d'un incendie, c'est le scénario de désenfumage « trafic fluide » qui est activé.

Le régime de désenfumage « trafic fluide » doit être pleinement opérationnel en quelques minutes seulement après le lancement de la commande.

Le principe de mise en marche de toutes les machines du tube incendié est conservé. Les accélérateurs doivent démarrer en cascade pour limiter l'appel de courant. Ils seront pilotés par des **variateurs de fréquence** offrant toute la souplesse nécessaire dans le pilotage.

Même s'il existe des murs anti-recyclage et que dans ce cas l'instruction technique n'impose pas de mesures supplémentaires, certains accélérateurs situés dans le tube sain seront démarrés en sens inverse pour éviter le recyclage de la fumée entre les tubes. Seule une batterie de 4 machines (réversibles à au moins 30 %) sera activée pour assurer un courant d'air supérieur à 1,0 m/s dans le sens opposé à celui de la circulation.

III.3.2. Tenue à la chaleur

Selon l'instruction technique [3], les accélérateurs doivent pouvoir fonctionner au moins 120 min à 200 °C (marquage CE F200/120).

III.3.3. Ancrage des accélérateurs

Conformément aux recommandations de la note d'information n°14 du CETU, les accélérateurs sont supportés individuellement. Des châssis en acier inoxydable 304 L sont utilisés. Ces châssis sont ancrés sur les dalles avec des chevilles à verrouillage de forme, de diamètre minimal 16 mm. Pour éviter le desserrage des chevillages, tous les écrous doivent être munis de contre-écrous.

En plus du supportage principal, un supportage de secours (dispositif de retenue ultime) est mis en œuvre pour chaque accélérateur. Ce supportage de secours est constitué de deux câbles en inox fixés sur la structure porteuse. Les points de fixations sont indépendants du supportage principal. Les chevilles et autres éléments métalliques utilisés respecteront les mêmes caractéristiques que les éléments du supportage principal.

L'ensemble des dispositifs de fixation, le supportage principal comme le supportage de secours, devra résister à une température de 450°C appliquée pendant 2 heures. En phase d'exécution, le titulaire du marché devra justifier par le calcul la tenue au feu des supports.

Après pose des accélérateurs, toutes les fixations devront rester accessibles pour une inspection et un contrôle du serrage. Les plaques de protection au feu (voir « 1049.0_PRO_003 Notice Stabilité au feu ») seront découpées au droit des fixations afin de permettre leur mise en œuvre.

Des essais de traction seront demandés aux titulaires pour vérifier la qualité du support béton et de la mise en œuvre des chevilles d'ancrage.

IV. VENTILATION SANITAIRE

IV.1. STRATEGIE DE VENTILATION SANITAIRE

IV.1.1. Réglementation applicable

Pour caractériser la qualité de l'air dans le tunnel, les valeurs maximales autorisées selon la réglementation sont listées dans le tableau 1, issu de la référence [5].

Polluant	Paramètre	Durée d'observation	Niveau réglementaire ou recommandé		Référence
Monoxyde de carbone	en situation d'accident, en tout point du tunnel	valeur instantanée	150 ppm	[171 mg/m ³]	Instruction technique du 25/08/00
	teneur moyenne sur toute la longueur de l'ouvrage	15 minutes	90 ppm	[103 mg/m ³]	Circulaire du 08/06/99
		30 minutes	50 ppm	[57 mg/m ³]	
Dioxyde d'azote	teneur moyenne sur toute la longueur de l'ouvrage	15 minutes	0,4 ppm	[752 µg/m ³]	Circulaire du 08/06/99
Particules opacité	en situation d'accident, en tout point du tunnel	valeur instantanée	$9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	[$\approx 900 \text{ µg/m}^3$] (PM ₁₀)	Instruction technique du 25/08/00
	en situation non-exceptionnelle, en tout point du tunnel	valeur instantanée	$5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	[$\approx 500 \text{ µg/m}^3$] (PM ₁₀)	Recommandation CETU

Tableau 1. Valeurs maximales autorisées en tunnel routier, selon la référence [5]

IV.1.2. Capteurs CO, NO₂, opacimètres et anémomètres

IV.1.2.1. Nombre et implantation des capteurs

Pour vérifier que les niveaux de polluants et d'opacité ne sont pas dépassés et mettre en œuvre si besoin des moyens pour ventiler mécaniquement l'ouvrage (activation des accélérateurs), il est nécessaire de mesurer en continu la teneur en CO et en NO₂ et l'opacité de l'air dans le tunnel.

Même si elle n'est pas indispensable, une mesure de la vitesse dans le tunnel est très utile pour caractériser en continu les conditions aérauliques dans chaque tube. Elle permet en outre de donner de façon robuste le sens du courant d'air, ce qui permet d'évaluer la cohérence des autres mesures (les concentrations en polluants et particules sont plus élevées en approchant la tête de sortie, dans le sens du courant d'air). Elle permet aussi de mieux évaluer l'opacité maximale dans l'ouvrage, comme expliqué ci-après.

Les équipements nécessaires à la ventilation sanitaire sont donc les suivants :

- Chaque tube dispose d'un ensemble formé d'un capteur de CO, un capteur de NO₂ et un opacimètre, installé en piédroit côté voie lente au PM 60 et au PM 450. Ces localisations sont établies par rapport à la position des batteries d'accélérateurs dans l'ouvrage (loin des effets des jets).
- Un anémomètre est installé dans chaque tube, au centre de l'ouvrage, en piédroit côté voie lente, loin des effets des jets des accélérateurs.

L'alimentation et le raccordement à la GTC de ces groupes d'équipements sont obtenus depuis les coffrets des niches les plus proches.

Toutes les données relevées par l'ensemble des 7 capteurs par tube sont remontées sur l'écran de la GTC.

IV.1.2.2. *Invalidation de capteurs*

Les capteurs sont écartés de l'évaluation des conditions dans le tunnel sur action de l'OST (inhibition depuis l'interface de la GTC) ou lorsque le signal est manifestement erroné (capteur en défaut ou valeur aberrante – hors échelle ou incohérence avec l'autre capteur).

IV.1.2.3. *Exploitation des mesures*

En ventilation longitudinale, en considérant les véhicules comme des sources de polluants uniformément réparties le long du tunnel, le profil théorique de la concentration de chaque polluant est linéaire, comme tracé sur la figure 6.

En supposant que tous les capteurs fournissent des données exploitables, les valeurs typiques calculées et exploitées pour assurer la ventilation sanitaire sont les valeurs moyennes des concentrations en CO, NO₂, qui sont analogues aux moyennes des valeurs mesurées. Si un capteur de CO ou NO₂ est défaillant, alors seule la valeur du capteur opérationnel est utilisée, en supposant que l'air entre dans l'ouvrage avec une concentration de polluant nulle (mode dégradé).

La réglementation imposant un seuil d'opacité en tout point du tunnel, la valeur typique de l'opacité correspond cette fois à la valeur maxi, qui est calculée par extrapolation des données mesurées par les 2 opacimètres en tenant compte de la position des capteurs dans l'ouvrage, comme représenté sur la figure 6, et du sens du courant d'air. Si un opacimètre est défaillant, alors seule la valeur du capteur opérationnel est utilisée, en supposant que l'air entre dans l'ouvrage avec une opacité nulle (mode dégradé). Le même principe est utilisé pour évaluer la concentration maximale en CO dans le tunnel.

Si les 2 capteurs d'un même polluant sont en défaut, une alarme est remontée à l'OST.

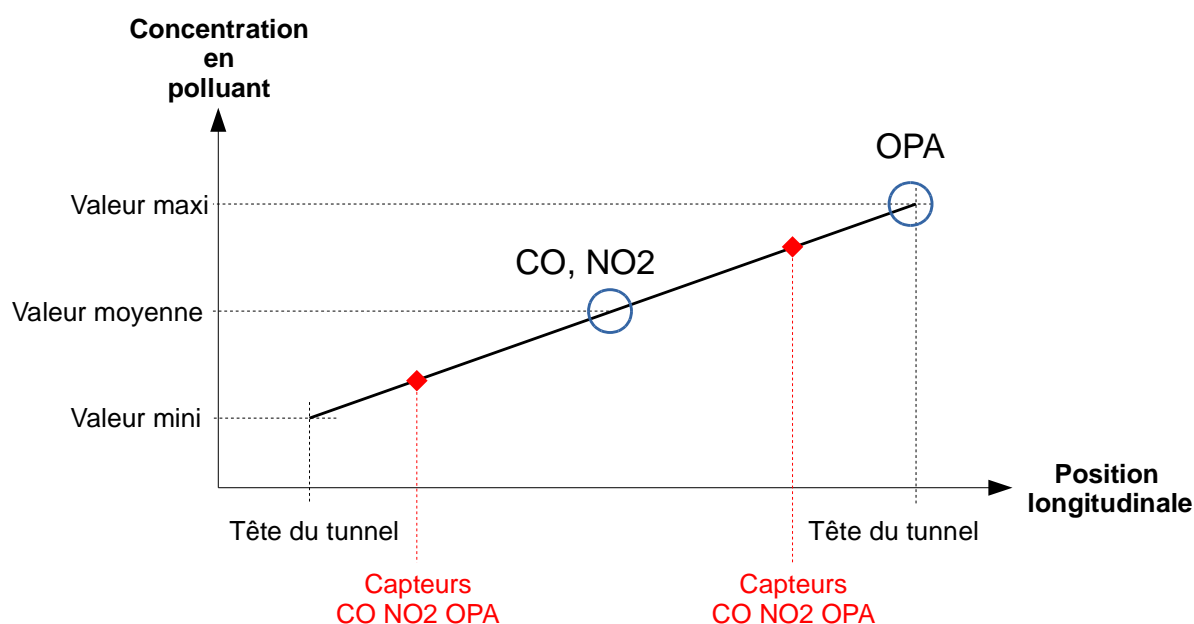


Figure 6. Évolution théorique de la concentration de chaque polluant (« droite des polluants »)

IV.1.3. Activation des accélérateurs pour la ventilation sanitaire

En exploitation courante, la ventilation sanitaire est intégralement obtenue par le pistonnement des véhicules (trafic important, vitesse autorisée de 90 km/h dans l'ouvrage et faible occurrence d'épisodes de congestion).

Dans certaines situations exceptionnelles (congestion, accident, etc.), des véhicules peuvent circuler à très faible allure dans le tunnel et il peut alors être nécessaire d'activer des accélérateurs pour assurer une dilution des polluants par injection d'air provenant de l'extérieur. Les accélérateurs sont alors activés dans le sens de la circulation.

La ventilation sanitaire est gérée par le mode automatique d'exploitation de la ventilation. La ventilation sanitaire de chaque tube est indépendante de l'autre tube.

IV.2. FONCTIONNEMENT DE LA VENTILATION SANITAIRE

IV.2.1. Gestion des ordres de marche

Pour la ventilation sanitaire, un algorithme gère les ordres de marche des accélérateurs pour respecter les principes suivants :

- l'activation des accélérateurs respecte un principe de permutation des machines permettant d'équilibrer globalement leurs temps de fonctionnement ;
- en cas d'indisponibilité d'un accélérateur, l'ordre de marche doit se reporter automatiquement sur l'accélérateur suivant dans la liste de permutation ;
- chaque accélérateur ne doit pas démarrer plus de 6 fois par heure.

IV.2.2. Algorithme de ventilation sanitaire

La ventilation sanitaire est pilotée par un algorithme à seuils, selon les consignes données dans le tableau 2. Cet algorithme est très proche de l'existant.

	CO (ppm)			NO2 (ppm)	OPA (km-1)	Action sur le niveau de commande
	Moyenne sur 15 min	Moyenne sur 30 min	Valeur instantanée	Moyenne sur 15 min	Valeur instantanée	
Hystérésis	5	2	10	0,05	0,2	
Seuil bas	30	25				Variation - 10 %
Seuil haut 1	60	35	120	0,2	4	Variation + 10 %
Seuil haut 2	70	39		0,3		Variation + 20 %
Seuil haut 3	80	45				Forçage 100 %
Seuil CME	90	50	150	0,4	5	Alerte opérateur

Tableau 2. Algorithme de ventilation sanitaire

Le nombre de machines à activer est mis à jour toutes les 10 min, sauf pour le seuil haut 3 qui appelle un démarrage immédiat de tous les accélérateurs (analogue au scénario de désenfumage).

Une fois des accélérateurs activés, le retour progressif à la normale (baisse des concentrations en polluant) active le seuil bas définissant l'extinction de certaines machines.

Les seuils indiqués ici devront être paramétrables dans la GTC afin de s'adapter ultérieurement si nécessaire aux conditions rencontrées sur le terrain.

L'utilisation de variateurs de fréquence permet de limiter la puissance consommée et le bruit générée par la mise en fonctionnement des accélérateurs pour les besoins de ventilation sanitaire, en n'activant pas systématiquement les machines à 100 %, comme c'était le cas auparavant.

Un accélérateur activé à 40 % de sa poussée représente un incrément de 5 % de la poussée totale installée. On peut par conséquent appliquer la règle de mise en marche présentée dans le tableau 3.

Niveau de commande	Acc1	Acc2	Acc3	Acc4	Acc5	Acc6	Acc7	Acc8
0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
10 %	40 %	40 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
20 %	40 %	40 %	40 %	40 %	0 %	0 %	0 %	0 %
30 %	40 %	40 %	40 %	40 %	40 %	40 %	0 %	0 %
40 %	40 %	40 %	40 %	40 %	40 %	40 %	40 %	40 %
50 %	80 %	80 %	40 %	40 %	40 %	40 %	40 %	40 %
60 %	80 %	80 %	80 %	80 %	40 %	40 %	40 %	40 %
70 %	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	40 %	40 %
80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %
90 %	100 %	100 %	100 %	100 %	80 %	80 %	80 %	80 %
100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

Tableau 3. Activation des accélérateurs pour atteindre le niveau de commande

Dans ce tableau, la numérotation correspond aux ordres de priorité pour le démarrage des accélérateurs, issus de la permutation visant à respecter le principe d'équilibrage des durées d'utilisation de chaque machine.

L'extinction des accélérateurs se fait en principe en remontant dans le tableau ligne par ligne, de façon à limiter le nombre de variations de régime.

V. VENTILATION DES ISSUES DE SECOURS

V.1. STRATEGIE DE MISE EN SECURITE DES ISSUES DE SECOURS

V.1.1. Principe

Comme précisé dans le document d'information du CETU [10], même si l'instruction technique des tunnels routiers mentionne une « surpression de l'ordre de 80 Pa », l'objectif fonctionnel du système de ventilation des IS en tunnel est avant tout d'empêcher la fumée d'y pénétrer.

C'est la maîtrise de la vitesse de passage de l'air à la porte (quand elle est ouverte, du sas vers le tunnel) qui assure la mise à l'abri de la fumée. C'est donc essentiellement un objectif de débit de soufflage dans le sas qui est dimensionnant.

Un moyen simple et robuste d'assurer la vitesse de passage de l'air à la porte consiste à injecter dans l'IS de l'air neuf pris à l'extérieur du tunnel et de maîtriser la surpression créée dans l'IS à l'aide d'un clapet de décompression qui laisse l'air insufflé s'évacuer vers le tube circulé.

Les 4 IS de la tranchée couverte de Taverny utilisent le même principe de protection par mise en surpression.

V.1.2. Dimensionnement

Selon le document du CETU [10], il s'agit en pratique d'obtenir une vitesse de 0,5 m/s porte ouverte avec une section de porte standard de 1,8 m² (seul le ventail principal de 0,90 m de largeur est supposé ouvert en phase d'évacuation). Avec 2 portes ouvertes, le débit insufflé dans le sas doit donc être de 1,8 m³/s, soit **6 480 m³/h**.

Le sas est muni d'un clapet de décompression protégés par des registres motorisés, l'ensemble assurant un degré de résistance au feu de niveau HCM 120 et étant réglé pour limiter la surpression à environ **40 Pa**, ce qui évite de recourir à un système d'aide à l'ouverture des portes des issues de secours. Une grille recouvre le registre du côté du tube circulé.

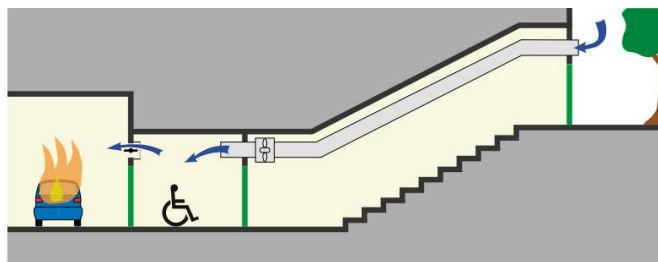


Figure 7. Principe de ventilation des issues de secours proposé (d'après [10])

Une bouche de prise d'air en façade en surface et une gaine sont nécessaires pour acheminer l'air frais depuis l'extérieur jusque dans le sas. Le volume de l'issue de secours est compatible avec le passage de cette gaine (dont la section minimale de passage d'air est de 30 cm x 30 cm).

Le prédimensionnement du circuit aéraulique est présenté ci-dessous.

Masse volumique	1.20	kg/m ³	Débit	1.80	m ³ /s							
Désignation	Hauteur	Largeur	Diamètre	Longueur	Débit	Diamètre Hydraulique	Section	Vitesse	Pression dynamique	Coef. sing. ζ	Coef. rég. λ	Δp
	m	m	m	m	m ³ /s	m	m ²	m/s	Pa	-	-	Pa
Extérieur												
Grille / entrée	0.30	0.30			1.80	0.30	0.09	20.00	120.00	1.25	0.05	150.00
Gaine + coudes	0.30	0.30		25.00	1.80	0.30	0.09	20.00	120.00	1.25	0.05	650.00
Transformation			0.30		1.80	0.30	0.07	25.46	194.54	0.05		9.73
Ventilateur					1.80							
Pression statique sas												40.00
Silencieux			0.30		1.80	0.30	0.07	25.46	194.54	0.20		38.91
Registre	0.60	0.30			1.80	0.40	0.18	10.00	30.00	0.13		3.90
Clapets dosage + HCM	0.60	0.30			1.80	0.40	0.18	10.00	30.00	3.00		90.00

		Total	982.53 Pa
Rendement	0.60	Puiss. théorique	1640 W

V.2. EXPLOITATION

En situation normale, tous les ventilateurs des IS sont à l'arrêt et les registres sont fermés.

Lorsqu'un scénario de désenfumage est lancé, les IS du tube sinistré sont mises en surpression par ouverture des registres et démarrage des ventilateurs de mise en surpression.

Les clapets HCM sont normalement ouverts et se ferment automatiquement sous l'effet de la chaleur (élément fusible).

VI. DISTRIBUTION ELECTRIQUE

VI.1. CANTONNEMENT DE L'ALIMENTATION DE LA VENTILATION

La distribution se fait depuis les tableaux de distribution BT situés dans les locaux techniques. Tous les départs se font depuis ces armoires par le biais d'une galerie technique jusqu'à un débouché par des fourreaux en tunnel. Les câbles sont acheminés grâce à des chemins de câbles fixés dans le plafond de la tranchée couverte.

Deux cantonnements d'alimentation sont prévus depuis la sortie des fourreaux de la galerie technique : un premier secteur de l'entrée jusqu'au PM 251.5, et le second secteur du PM 251.5 jusqu'à la sortie.

	Cantonement 1	Cantonement 2
Tube Est Y	PM 251.5 → Sortie	Entrée → PM 251.5
Tube Ouest W	Entrée → PM 251.5	PM 251.5 → Sortie

Tableau 4. Cantonement de l'alimentation du système de ventilation

Cette solution de cantonnement se justifie par :

- La disposition centrale de la galerie technique qui distribue l'énergie aux lignes d'éclairage depuis le local technique.
- La minimisation d'extinction du nombre de luminaires en cas de problème sur un câble d'alimentation.

VI.2. CHEMINEMENT DES CABLES D'ALIMENTATION

Contrairement à ce qui figure dans l'AVP, il convient plutôt de faire cheminer les câbles d'alimentation de chaque batterie dans le tube opposé. En effet, cette configuration permet de protéger au maximum les câbles d'un feu se déclarant dans un tube. Comme le spécifie le schéma de principe suivant, un feu se déclarant dans le tube Y ne pourra pas endommager les câbles d'alimentation de la batterie VEN nécessaire au désenfumage.

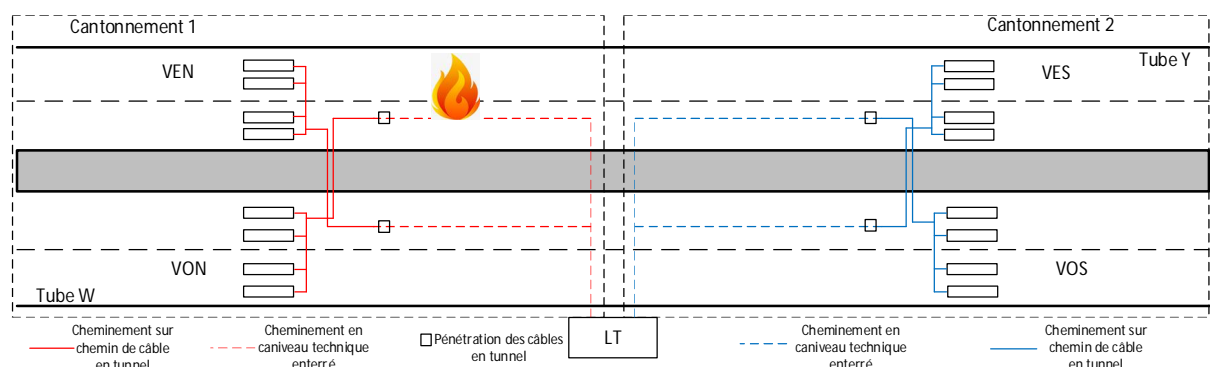


Figure 8. Le cheminement de l'alimentation des accélérateurs respectera le cantonnement

Cette mise en place nécessite premièrement de faire cheminer les câbles dans des caniveaux techniques enterrés jusqu'aux chambres de pénétration (sous forme de carottages) en tunnel. Ces chambres devront être situées au plus proche des accélérateurs (soit à une distance de 2m). À ce niveau les câbles cheminent sur chemins de câbles jusqu'au voile central du tunnel dans lequel des carottages devront être créés.

Une fois tous les câbles tirés, les carottages devront être calfeutrés avec un niveau de résistance au feu N2.

VI.3. ALIMENTATION DES CIRCUITS D'ACCELERATEURS

Les câbles d'alimentation actuels des batteries d'accélérateurs sont vétustes et leurs bornes de connexion dégradées. Par ailleurs, la puissance des accélérateurs augmentant, la section des câbles d'alimentation évolue également. Pour cela il est nécessaire de procéder au tirage de nouveaux câbles lors de la mise en place des nouvelles batteries.

Un câble d'alimentation par batterie sera déployé. Il sera de type 3xPh+PE C1 CR1 est raccordé depuis un départ du tableau de distribution correspondant. Ce qui fait alors 4 câbles d'alimentation pour une batterie d'accélérateurs.

Une boîte à borne est prévue pour chaque machine, comme l'illustre le schéma ci-dessous :

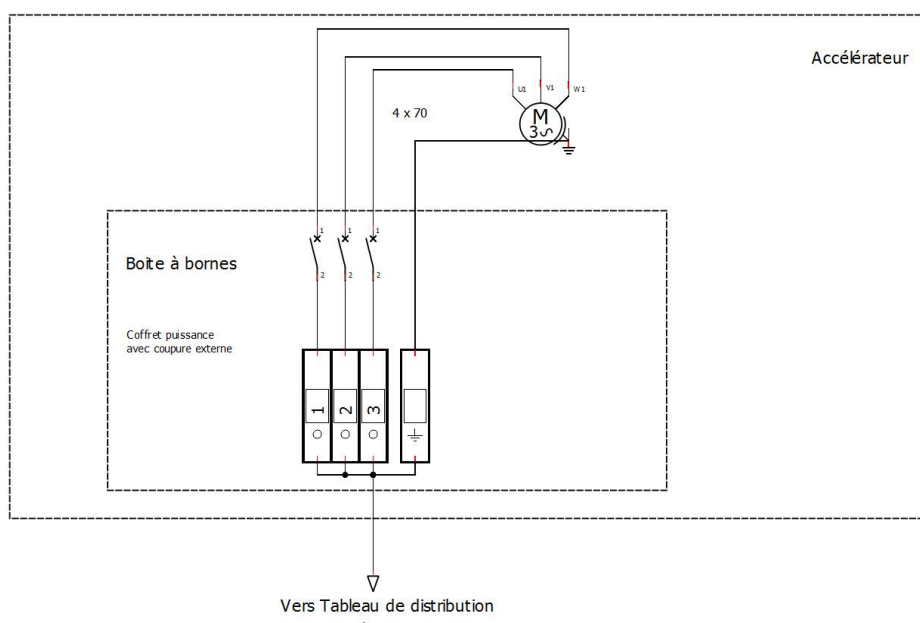


Figure 9. Les câbles d'alimentation passent par une boîte de raccordement

Le coffret de raccordement est lui aussi résistant au feu.

VI.4. PILOTAGE

D'une manière générale, le système GTC ne procède pas au délestage ni au relestage des accélérateurs lors d'une coupure d'alimentation.

Par conséquent, un système de commande indépendant doit piloter le système de ventilation, il s'agit d'un automate communiquant directement avec les variateurs de chaque accélérateur. L'automate possède son propre programme permettant de définir les différents régimes de ventilation en fonction des données reçues (capteurs CO, NO2, OPA, ordre de l'opérateur).

Naturellement, lors d'une phase de désenfumage, un séquençage du démarrage des machines est à prévoir afin de ne pas créer un pic d'appel de courant.

VII. SPECIFICATIONS TECHNIQUES DETAILLEES

VII.1. ACCELERATEURS

Les accélérateurs sont fabriqués en acier galvanisé et présentent les caractéristiques unitaires suivantes :

- Poussée en champ libre : 2 000 N (sans grilles, avec silencieux, considérant une masse volumique de l'air de 1,2 kg/m³)
- Puissance électrique nominale : 55 kW
- Diamètre extérieur maximal : 1,8 m
- Fonctionnement pendant au moins 120 min à 200 °C (marquage CE F200/120)
- Alimentation en 3 x 400 V sous 50 Hz (fonctionnel sous 410 V +/- 10 %)
- Rendement ≥ 90 %
- $\cos \Phi \geq 0,8$
- Pression acoustique ≤ 75 dB (A) à 10 m en champ libre à 45 °

Chaque machine dispose de capteurs caractérisant son fonctionnement, les mesures étant remontées à l'automate :

- Alarme vibration (avec seuil d'alarme et seuil d'arrêt automatique de la machine), signal « tout ou rien »
- Capteur de vibration (signal conditionné en 4 – 20 mA)
- Surchauffe (sondes dans les bobinages), signal « tout ou rien »
- Retour de marche, signal « tout ou rien »

VII.2. VARIATEURS DE FREQUENCE

Les variateurs de fréquence sont réglés pour limiter le courant d'appel de démarrage de chaque accélérateur à 3 fois sa valeur nominale. Ils présentent une gamme de fréquence s'étendant de 0,5 à 60 Hz.

Ils sont équipés des sécurités et protection suivantes :

- Protection thermique (échauffement, étage de puissance)
- Protection contre les courts-circuits entre phases moteur, coupures de phase d'entrée ou du circuit de commande, dépassements de la vitesse limite, rotor bloqué
- Sécurité de sur ou sous-tension
- Sécurité d'absence de phases réseau

Ces variateurs de fréquence sont placés à l'intérieur des tableaux de distribution respectifs ou dans une armoire à part, en fonction de leur taille.

VII.3. ANCRAGES DES ACCELERATEURS

Les accélérateurs sont fixés au plafond dans les bossages du tunnel à des châssis en acier inoxydable 304 L. Les châssis sont ancrés dans le béton avec des chevilles à verrouillage de forme, de diamètre minimal 16 mm.

Le dispositif de retenue ultime est constitué de deux câbles en inox fixés sur la structure porteuse. Les points de fixations sont indépendants du supportage principal. L'ensemble des dispositifs de fixation doit résister à une température de 450°C appliquée pendant 120 min.

VII.4. CAPTEURS

Les gammes des capteurs sont les suivantes :

Grandeur	Gamme de mesure	Conditionnement du signal
Teneur en CO	0 à 300 ppm	4 – 20 mA
Teneur en NO2	0 à 5 ppm	
Opacité	0 à 15 km ⁻¹	
Vitesse	- 20 à + 20 m/s	

Les capteurs doivent tous pouvoir être étalonnés avant traitement par la GTC (a minima, étalonnage par régression linéaire $f(x) = a \cdot x + b$).

Les signaux bruts des capteurs font l'objet d'une moyenne glissante sur 10 à 30 s avant d'être transmis à l'algorithme de ventilation sanitaire en GTC pour éliminer la majeure partie du bruit de mesure et écarter les fluctuations fortes et de courte durée.

Avec un signal 4 – 20 mA, la défaillance de la connexion est détectée automatiquement si le signal est inférieur à 3,5 mA ou supérieur à 20,5 mA.

Lorsque la valeur d'un capteur ne varie pas pendant une période de plus de 6 h, une alarme est générée.

Les capteurs présentent un indice de protection IP 65.

VII.5. SURPRESSION DES IS

Les IS sont munies d'un ventilateur de surpression, d'une puissance de l'ordre de 1,6 kW, avec un débit de 6500 m³/h sous une différence de pression de l'ordre de 1 000 Pa.

Le ventilateur est relié à une conduite en acier de section 0,3 x 0,3 qui remonte à l'air libre via une bouche d'aspiration surmontée d'une grille. Le soufflage dans l'IS se fait via un silencieux.

Un registre motorisé permet l'isolement de l'IS par rapport au tube circulé en situation normale. Ce registre s'ouvre au moment de mettre l'IS en surpression.

Un clapet de dosage réglable permet d'ajuster la mise en surpression de l'IS. Il est suivi d'un clapet HCM 120 qui ferme automatiquement la communication entre l'issue et le tube circulé, sous l'effet de la chaleur (déclenchement vers 70 °C).