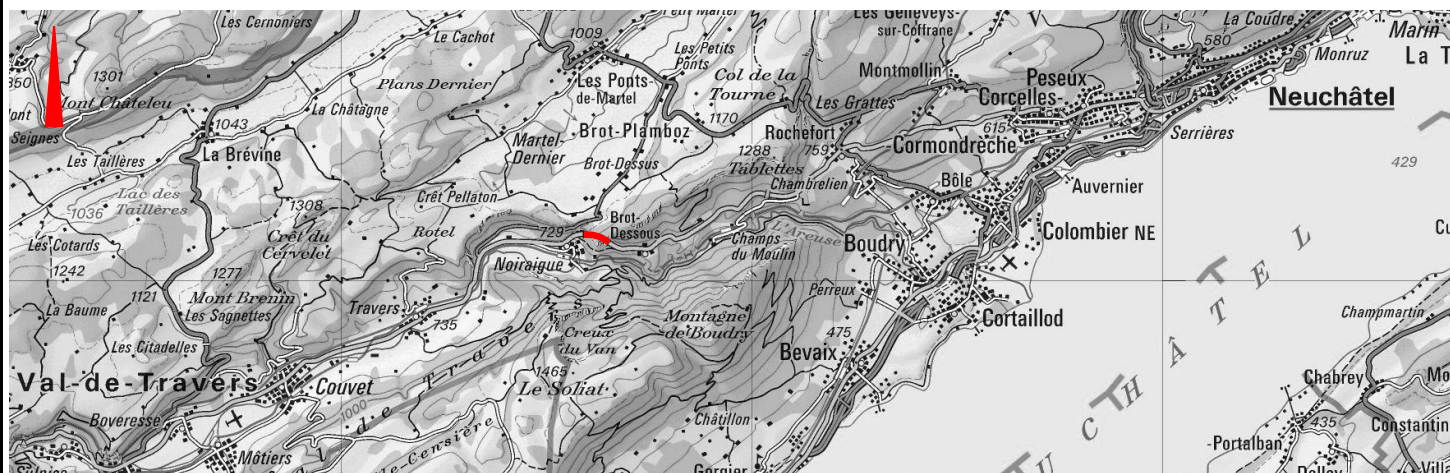


Routes principales suisses H10 – Les Verrières - Neuchâtel



H10 - Tunnel de la Clusette

Objet / Lot: Tunnel de la Clusette
PR: 23+680 à 24+788

Canton: Neuchâtel
Communes: Noiraigues

Concept d'intervention

Rénovation et sécurisation du tunnel de la Clusette

Rapport technique ventilation

Auteur du projet :



HBI Haerter SA
Stockerstrasse 12
8002 Zurich

N° plan / dossier (interne)

Rév.	Indice 0	Indice A	Indice B	Indice C	Indice D	Doc./ Plan - N° (auteur):	
Date	02.03.2015	05.06.2015				Objet inventorié- numéro :	
Auteur	Simon Frey	Simon Frey				Format : A4	

Auftraggeber
Client
Client
Cliente
Cliente

Objekt- / Projektname
Object / Project Name
Nom d'Objet / de Projet
Nome dell'oggetto / del Progetto
Nombre Objeto/Proyecto

Berichtstitel
Report Title
Titre de Rapport
Titolo di Rapporto
Titulo di Reporte

Verfasser
Author
Auteur
Autore
Autor

Datum / Version
Date / Version
Date / Version
Data / Versione
Fecha / Versión

HBI-Auftragsnummer
HBI Project Number
HBI Numéro de Projet
HBI Numero de Progetto
HBI Número de Proyecto

HBI-Berichtsnummer
HBI Report Number
HBI Numéro de Rapport
HBI Numero de Rapporto
HBI Número de Reporte

HBI Haerter Beratende Ingenieure
HBI Haerter Consulting Engineers
HBI Haerter Ingénieurs Conseils
HBI Haerter Ingegneri Consulenti
HBI Haerter Ingenieros Consultores

ISO 9001:2008 Certified

CNERN - Section électromécanique

H10 - Rénovation et sécurisation tunnel de la Clusette

H10 - Concept d'intervention rénovation et sécurisation tunnel de la Clusette, rapport technique ventilation

Simon Frey

2015-06-17 / 1.2

10.08100.02.01

08-100-03

HBI Haerter AG
Stockerstrasse 12
8002 Zurich, Suisse
Tel. +41 44 289 39 00
info.zh@hbi.ch

www.hbi.ch

Mentions légales

<i>Titre complet</i>	H10 - Concept d'intervention rénovation et sécurisation tunnel de la Clusette, rapport technique ventilation
<i>Titre abrégé</i>	Tunnel de la Clusette - CI Ventilation
<i>Client</i>	CNERN - Section électromécanique
<i>Auteur</i>	Simon Frey
<i>Nom de projet / d'objet</i>	H10 - Rénovation et sécurisation tunnel de la Clusette
<i>Numéro du projet</i>	10.08100.02.01
<i>Numéro du projet</i>	08-100-03
<i>Date du rapport</i>	2015-06-17
<i>Version</i>	1.2
<i>Distributeur</i>	CNERN, section électromécanique

	<i>Auteur</i>	<i>Vérifieur</i>	<i>Accepté</i>	<i>Vers.</i>	<i>Modification</i>
<i>Signature ou signe</i>	SFR	VBU	-	1.2	Restructuration des paragraphes
<i>Nom</i>	Simon Frey	Vincent Butty	-		
<i>Date</i>	2015-06-17	2015-06-17	-		
<i>Signature ou signe</i>	SFR	VBU	-	1.1	Intégration de la ventilation des issues de secours et analyse du niveau de sécurité actuel
<i>Nom</i>	Simon Frey	Vincent Butty	-		
<i>Date</i>	2015-06-05	2015-06-05	-		
<i>Signature ou signe</i>	SFR	VBU	-	1.0	Edition initiale
<i>Nom</i>	Simon Frey	Vincent Butty	-		
<i>Date</i>	2015-03-02	2015-03-02	-		

Index

Mentions légales.....	3
Index	4
Table de tables.....	7
Table de figures	8
1 Résumé et vue d'ensemble du projet	9
2 Introduction	10
2.1 But du projet	10
2.2 Organisation	10
2.3 Données techniques de l'objet	10
2.3.1 Géométrie	10
2.3.2 Trafic.....	11
2.3.3 Météorologie	11
2.4 Limites et interfaces	12
2.4.1 Limites	12
2.4.2 Interfaces	12
3 Bases du projet	13
3.1 Conditions cadre et hypothèses du bureau d'études	13
3.2 Directives, normes et fiches techniques	13
3.3 Prescriptions du SPCH de Canton de Neuchâtel	13
3.4 Evaluation du risque du projet.....	13
3.4.1 Facteurs de risque	14
3.4.2 Risques liés au projet.....	15
3.5 Remarques et concepts généraux.....	15
4 Description des mesures - Ventilation	16
4.1 Système de gestion de l'installation de ventilation.....	16
4.1.1 Etat actuel.....	16
4.1.2 Mesures prévues	16
4.2 Système de ventilation	16
4.2.1 Etat actuel.....	16
4.2.2 Mesures prévues	17
4.2.2.1 Solution 1 – Ventilation mécanique longitudinale	18
4.2.2.2 Solution 2 – Ventilation naturelle	21
4.3 Equipement de mesure	21
4.3.1 Etat actuel.....	21
4.3.2 Mesures prévues	21
4.4 Ventilation des issues de secours	22
4.4.1 Etat actuel.....	22
4.4.2 Mesures prévues	22
4.5 Exigences pour le génie civil	24
5 Programme des travaux, gestion du trafic, planning	25

6	Coûts	26
6.1	Coûts d'investissement	26
6.2	Coûts d'exploitation	27
6.3	Coûts de maintenance (horizon temporel 10 années)	27
7	Références	28
Annexe A	Ventilation en mode sinistre	29
A.1.	Choix du système de ventilation pour le mode sinistre	29
A.2.	Dimensionnement de la ventilation pour le mode sinistre	31
Annexe B	Ventilation en mode normal	33
Annexe C	Pilotage de la ventilation	34
C.1.	Généralités	34
C.1.1.	Hiérarchie	34
C.1.2.	Zones de ventilation	36
C.2.	Pilotage en mode sanitaire	36
C.2.1.	Choix de la direction de ventilation	36
C.2.2.	Seuils de ventilation	36
C.2.3.	Brouillard	37
C.2.4.	Nuage de poussière	37
C.2.5.	Sélection des VJ dans les cas standards / cas de maintenance	37
C.3.	Pilotage en mode urgence	37
C.3.1.	Généralités	37
C.3.2.	Stratégie alarme pollution	37
C.3.3.	Stratégie d'incendie	38
C.3.4.	Phase 1 – pré-alarme ou incendie mobile	38
C.3.5.	Phase 2 – alarme ou incendie localisé	38
C.3.5.1.	Définition de la direction du courant d'air	38
C.3.6.	Sélection des ventilateurs de jet en cas d'incendie	39
C.4.	Régulation de la vitesse longitudinale	39
Annexe D	Analyse du niveau de sécurité	40
D.1.	Généralités	40
D.2.	Modélisation	41
D.2.1.	Calcul aérodynamique	41
D.2.2.	Calcul de la fuite des usagers	42
D.3.	Scénarios analysés	42
D.3.1.	Différence de pression météorologique	42
D.3.2.	Trafic	42
D.3.3.	Incendies	43
D.3.4.	Positions du sinistre	43
D.3.5.	Interdistance des chemins de fuite	43
D.3.6.	Systèmes de ventilation	43
D.4.	Résultats	44
D.4.1.	Propagation des fumées	44
D.4.2.	Comparaison des variantes	46
D.4.2.1.	Variantes en présence de la galerie de sécurité	46
D.4.2.2.	Variantes sans galerie de sécurité	49

D.5.	Conclusion	50
Annexe E Synthique des équipements		51
E.1.	Variante 1	51
E.2.	Variante 2	52
Annexe F Données météorologiques		53

Table de tables

Tableau 2.1	Résumé des données géométriques principales du tunnel de la Clusette	10
Tableau 2.2	Résumé des données géométriques principales du tunnel de la Clusette	11
Tableau 2.3	Valeurs de la température de l'environnement du projet.....	11
Tableau 2.4	Vents défavorables aux portails de l'ouvrage.....	12
Tableau 3.1	Evaluation des facteurs de risque	14
Tableau 3.2	Evaluation des risques liés au projet	15
Tableau 4.1	Données de base des ventilateurs axiaux installés [8].....	17
Tableau 4.2	Données techniques exemplaires des VJ de diamètre 1000 mm	18
Tableau 4.3	Disposition des ventilateurs de jet, variante 1 (cf. annexe E.1).....	19
Tableau 4.4	Données techniques exemplaires des VJ de diamètre 1000 mm	20
Tableau 4.5	Disposition des ventilateurs de jet, variante 2 (cf. annexe E.2).....	20
Tableau 4.6	Dimensions du monobloc et des silencieux pour le mode normal	23
Tableau 4.7	Dimensions du monobloc et des silencieux pour le mode sinistre	23
Tableau 4.8	Alimentation électrique pour la mise en surpression par liaison transversale.....	24
Tableau 6.1	Estimation des coûts d'investissement (+/- 30%) – Solution 1 – Variante 1	26
Tableau 6.2	Estimation des coûts d'investissement (+/- 30%) – Solution 1 – Variante 2	26
Tableau 6.3	Estimation des coûts d'investissement (+/- 30%) – Solution 2.....	26
Tableau 6.4	Estimation des coûts d'investissement (+/- 30%) – Ventilation des issues de secours	26
Tableau 6.5	Estimation des coûts d'entretien des variantes	27
Tableau A.1	Valeurs appliquées pour le dimensionnement de la ventilation en mode sinistre.....	31
Tableau A.2	Nombre de ventilateurs de jet et variantes de la disposition pour différentes types de ventilateurs de jet.....	32
Tableau C.1	Rôle du pilotage de la ventilation.....	34
Tableau C.2	Valeurs de paramétrages principales	36
Tableau D.1	Scénarios de trafic analysés.....	43

Table de figures

Figure 2.1	Coupe type du tunnel de la Clusette [9] avec revanche de 20m mm pour l'étanchéité future.....	10
Figure 4.1	Vue de dessus du système de ventilation actuel [8]	17
Figure 4.2	Coupe type du tunnel avec une batterie de 3 ventilateurs de jet de diamètre 1000 mm (hypothèse: 20 cm de revanche pour étanchéité du tunnel).	19
Figure 4.3	Coupe type du tunnel avec une batterie de 3 ventilateurs de jet de diamètre 1250 mm (hypothèse : 200 mm de revanche pour étanchéité du tunnel).	20
Figure 4.4	Plan de situation de la galerie de sécurité	22
Figure 4.5	Image d'un monobloc de ventilation ; solution avec module de régulation active de la surpression	23
Figure 4.6	Dimensions des portes et passages des portes d'issues de secours, [3]	24
Figure A.1	Evaluation des trois paramètres supplémentaires pour le choix du système de ventilation pour le cas de sinistre, [1].	29
Figure A.2	Evaluation globale des paramètres déterminant le système de ventilation, [1]	29
Figure A.3	Choix du système de ventilation pour le cas de sinistre, [1].	30
Figure A.4:	Fonctionnement principal du système de ventilation pour le cas de sinistre.	30
Figure A.5:	Poussée aéraulique nécessaire au système de ventilation en mode sinistre. La courbe verte représente la poussée nominale, la courbe rouge la poussée en cas de défaillance d'une batterie de VJ.	31
Figure B.1:	Principes de ventilation en exploitation normal : ventilation naturelle par l'effet piston des véhicules (en haut), ventilation longitudinale par ventilateurs de jet (en bas).	33
Figure C.1	Hierarchie du software de la ventilation avec les modes principaux	35
Figure C.2	Conséquences si un seuil est encore dépassé après ts1 et si un seuil est inférieur à la limite après ts2	36
Figure C.3	Stratégies de ventilation en fonction de la position de l'incendie et du courant d'air persistent au moment de la détection de l'incendie (rouge); écoulements instaurés par la ventilation en vert.	39
Figure D.1	Exemple d'évolution du taux de victimes en fonction de la position de l'incendie, pour deux types d'incendie différents.	41
Figure D.5	Propagation des fumées pour un incendie de 30 MW situé au milieu de l'ouvrage ; ventilation longitudinale.....	44
Figure D.6	Propagation des fumées pour un incendie de 30 MW situé au milieu de l'ouvrage; ventilation naturelle	45
Figure D.7	Comparaison de la zone enfumée pour une ventilation mécanique (à gauche) et une ventilation naturelle (à droite) pour un cas avec écoulements initiaux en direction de la France.	46
Figure D.8	Niveau cumulé d'intoxication en fonction du nombre d'issues de secours et en fonction du système de ventilation.	47
Figure D.9	Ventilation naturelle : Niveau cumulé d'intoxication totale en fonction de la position du foyer et du nombre d'issues de secours.	48
Figure D.10	Ventilation mécanique : Niveau cumulé d'intoxication totale en fonction de la position du foyer et du nombre d'issues de secours.	48
Figure D.11	Niveau cumulé d'intoxication totale en fonction du système de ventilation et du niveau d'équipement (en cas de ventilation naturelle).	49

1 Résumé et vue d'ensemble du projet

Le tunnel de la Clusette de la route cantonale neuchâteloise H10 entre Neuchâtel et Les Verrières a été construit dans les années 1975. Au vu de l'âge et de l'état de l'ouvrage, la section électromécanique (SELM) du centre neuchâtelois d'entretien des routes nationales (CNERN) a lancé une évaluation du principe de ventilation [5]. En parallèle le service des ponts et chaussées (SPC) du canton de Neuchâtel a lancé une évaluation de l'état en génie civil du tunnel. Ces évaluations ont montré les besoins en assainissement des équipements d'exploitation et de sécurité ainsi que du génie civil.

A travers des études préliminaires sur la rénovation et la mise en sécurité du tunnel, le service des ponts et chaussées a confié l'élaboration d'un concept d'assainissement des équipements d'exploitation et de sécurité (EES) à la section électromécanique du CNERN.

Le présent rapport comporte les études faites par rapport la ventilation de l'espace de circulation et de la galerie de sécurité parallèle.

En ce qui concerne la ventilation du tunnel, deux familles de solutions sont étudiées : la ventilation (mécanique) longitudinale et la ventilation naturelle. Cette dernière est admissible car le niveau de sécurité atteint est au moins équivalent au niveau de sécurité de la variante de ventilation longitudinale (ceci est démontré à l'aide de l'analyse spécifique du niveau de risque).

Suite aux choix du Maître d'Ouvrage, la galerie de sécurité parallèle ne sera pas entièrement mise en surpression afin de s'affranchir des sas aux extrémités. Par conséquent, chacune des liaisons transversales disposera de son propre équipement de ventilation afin d'assurer d'une part un léger niveau de sécurité (en mode normal) et, d'autre part, en cas de sinistre, pour empêcher la pénétration par des fumées voire la propagation des fumées dans la galerie.

2 Introduction

2.1 But du projet

Le but du projet est la rénovation et mise en sécurité du tunnel de la Clusette situé sur la H10 entre Brot-Dessous et Noiraigue.

2.2 Organisation

Le présent concept d'intervention (CI) du domaine EES est élaboré par la section électromécanique du CNERN en s'appuyant sur la société HBI Haerter SA. Le concept d'intervention génie civil est élaboré en parallèle par la société OPAN concept SA.

2.3 Données techniques de l'objet

2.3.1 Géométrie

Les données géométriques principales sont résumées dans le Tableau 2.1 ci-dessous. Les valeurs proviennent des plans [9].

Longueur (tunnel, sans galeries aux portails)	1'025	m	
Pente d'ouest en est	+6.1	%	sur 1025 m
Pente moyenne	+6.1	%	
Pente moyenne déterminante	+6.1	%	(sur 800 m)
Section du tunnel	79.56	m ²	
Diamètre hydraulique de l'espace de circulation	9.0	m	
Hauteur moyenne au-dessus du niveau de la mer	836	m	

Tableau 2.1 Résumé des données géométriques principales du tunnel de la Clusette

La section libre ainsi que le diamètre hydraulique présenté ci-dessus se basent sur la géométrie actuelle de l'ouvrage en déposant la dalle intermédiaire.

La Figure 2.1 ci-dessous montre une coupe type de tunnel de la Clusette. Cette coupe type intègre une revanche de 200 mm pour la réalisation de l'étanchéité. Dans cette coupe, la dalle intermédiaire n'est plus représentée.

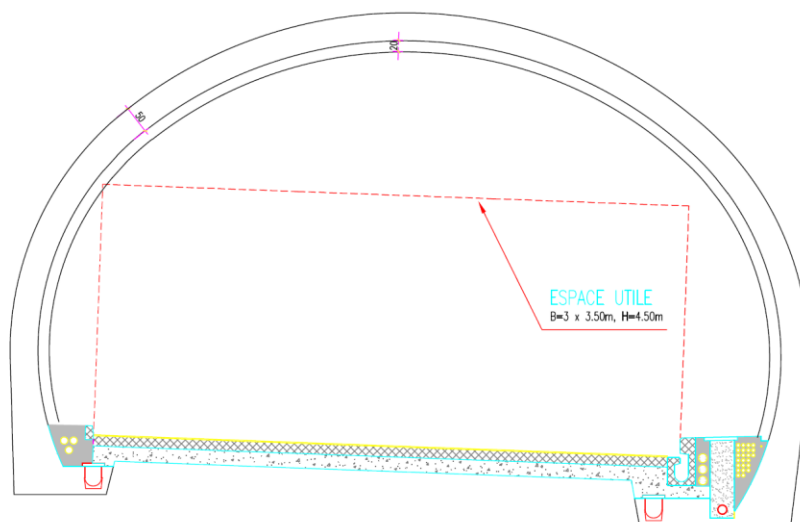


Figure 2.1 Coupe type du tunnel de la Clusette [9] avec revanche de 200 mm pour l'étanchéité future.

2.3.2 Trafic

L'évaluation du trafic se base sur le poste de comptage « 00104600 » sur l'axe « NE:J10 » de l'année 2007 [7]. La direction « Couvet » mentionnée correspond à celle de Noiraigues, la direction « Neuchâtel » à celle de Brot-Dessous.

Pour déterminer et dimensionner le système de ventilation, les charges de trafic au moment de l'ouverture de l'ouvrage (au moment de la réalisation des travaux) et celles prévisibles 10 ans d'après sont importantes.

Pour en calculer les valeurs, trois suppositions sont faites en accord avec la directive « ventilation des tunnels routiers » [1] : La croissance annuelle globale, la croissance annuelle du taux de poids lourds et la définition du trafic horaire déterminant. Les valeurs retenues sont les suivantes:

Taux de croissance annuelle globale	1.5 %
Taux de croissance de la proportion des PL	0 %
THD = proportion du TJM	14 %

Pour le calcul des charges de trafic, il est supposé que les travaux d'assainissement seront réalisés en 2013. En fonction de ces hypothèses, les charges de trafic présentées dans le Tableau 2.2 sont déterminées.

	Direction de circulation	TJM [uvt / j / voie]	Proportion PL [%]	PL [véh / j / voie]	THD [uvt / voie]
2007	Neuchâtel	1'614	3.5	52	204
	Couvet	2'959	3.6	97	374
2013	Neuchâtel	1'763	3.5	56	223
	Couvet	3'232	3.6	105	408
2023	Neuchâtel	2'047	3.5	65	259
	Couvet	3'751	3.6	122	474

Tableau 2.2 Résumé des données géométriques principales du tunnel de la Clusette

Les données de trafic sont calculées en utilisant l'unité UVT : unité-voiture. Ceci permet de rendre compte de la taille plus grande et de la vitesse réduite des poids-lourds. Pour la déclivité présente, 1 PL est égal à 4 unités-voiture. Dans le Tableau 2.2, seules les données nécessaires au choix du système de ventilation sont indiquées.

2.3.3 Météorologie

Les données météorologiques proviennent du logiciel Meteonorm [8] et représentent des valeurs de mesures sur plusieurs années. Le Tableau 2.3 ci-dessous (cf. également Annexe D) résume la statistique des températures pour les deux stations les plus proches de l'ouvrage (Noiraigues et Brot-Dessous).

Station météorologique	Température annuelle moyenne	Température 5%	Température 95%
Noiraigues	9.2°C	-2.6°C	21.5°C
Brot-Dessous	7.4°C	-5.0°C	19.8°C
Valeurs moyennes	8.3°C	-3.8°C	20.7°C

Tableau 2.3 Valeurs de la température de l'environnement du projet

En fonction des roses du vent (cf. Annexe D) la vitesse moyenne dans un secteur de 20° en direction des portails est déterminée. Le Tableau 2.4 ci-dessous indique ces vitesses de vent traduit de la hauteur de mesure par-dessus le sol (10 m) à la hauteur du portail.

Portail	Direction par rapport au nord [°]	Vent moyen [m/s] au portail
Portail Ouest	263	1.6
Portail Est	98	2.6

Tableau 2.4 Vents défavorables aux portails de l'ouvrage

Au vu de la longueur du tunnel et sa situation géographique toute différence de pression barométrique entre les têtes est négligeable.

2.4 Limites et interfaces

2.4.1 Limites

L'étude présente se limite au système de ventilation du tunnel de la Clusette avec un certain nombre de systèmes annexes liés à la ventilation, comme par exemple l'équipement de mesure. D'autres équipements d'exploitation et de sécurité ne font pas l'objet du présent rapport.

L'étude se base sur l'état actuel de l'ouvrage et ne prend pas en compte une éventuelle modification de la section libre du tunnel.

Les risques associées à la pente importante de l'ouvrage ne sont pas étudiés plus en détail. L'étude présente se limite à la conception de la ventilation du tunnel selon les exigences en vigueur. Des mesures complémentaires comme p.ex. le nombre d'issues de secours pour tenir compte de la déclivité importante ne font pas l'objet du présent rapport.

2.4.2 Interfaces

L'étude présente est liée au concept d'intervention des équipements d'exploitation et de sécurité (EES ainsi qu'au concept d'intervention génie civil. L'étude de projet liée à la réalisation des issues de secours ne comporte pas d'interface aux études de ventilation du tunnel.

Ils en ressortent donc les interfaces suivantes :

- Interface avec le mandataire EES: besoins en alimentation électrique, en équipement de mesure ainsi qu'en contrôle-commande liés au système de ventilation du tunnel.
- Interface avec le mandataire « génie civil », prévoyant les charges à prendre en compte pour le dimensionnement de la voûte ainsi que toute autre besoin en génie civil de la ventilation. Vice-versa, le mandataire ventilation se relie sur la section libre du tunnel définie par le domaine GC.
- Interface avec le projet des issues de secours: néant

3 Bases du projet

3.1 Conditions cadre et hypothèses du bureau d'études

Le présent projet suppose que la dalle intermédiaire sera déposée sur toute la longueur du Tunnel.

Etant donné que le tunnel de la Clusette se situe sur une route de niveau route principale suisse, aucun cadre réglementaire n'est directement applicable pour le choix et le dimensionnement du système de ventilation. En conséquence, la présente étude se réfère aux exigences et aux directives de l'office fédéral des routes (OFROU). Par contre, il est à noter que ce cadre réglementaire est développé et appliqué normalement pour les routes du niveau national avec les enjeux correspondants.

Le système de ventilation se dimensionne donc pour:

- Respecter les exigences la qualité d'air dans l'espace de circulation, soit une vitesse longitudinale de 1.5 m/s (mode normal)
- Evacuer les fumées en cas d'incendie d'une puissance calorifique de 0 MW (incendie froide) ou de 30 MW selon le mode de ventilation prévu par les directives en vigueur: ventilation longitudinale ou extraction ciblée des fumées (mode sinistre).

Les études de ventilation antérieures faisant foi sont:

- HBI Haerter SA, rapport 08-100-01 "H10 Tunnel de la Clusette, évaluation du principe de ventilation", 11.12.2008
- HBI Haerter SA, rapport 08-100-02 "Mise en sécurité du Tunnel de la Clusette", 08.03.2011

3.2 Directives, normes et fiches techniques

Les normes, directives et fiches techniques considérées dans l'étude présente sont les suivantes:

- Office fédéral des routes, directive 13 001 "Ventilation des tunnels routiers", [1]
- Office fédéral des routes, manuel technique 23 001, "Manuel technique EES", [2]
- Société suisse des ingénieurs et des architectes, Norme SIA 197/2, [4]

3.3 Prescriptions du SPCH de Canton de Neuchâtel

Actuellement, aucune prescription n'a été formulée par l'exploitant de l'ouvrage.

3.4 Evaluation du risque du projet

L'évaluation des risques liés au projet se fait dans les deux paragraphes ci-dessous. Les risques sont classifiés de 1 (probabilité/dommage faible) à 3 (probabilité/dommage important). L'évaluation globale correspond au produit arithmétique des paramètres « probabilité » et « dommages ».

3.4.1 Facteurs de risque

Risque		Probabilité	Dommages	Evaluation	Mesure
Organisationnels	Erreur d'exploitation (exploitation automatique)	1	3	3	Vérification des réflexes du contrôle commande
	Erreur d'exploitation (mode manuel)	1	3	3	Formation du personnel d'exploitation
	Report du projet	1	2	2	-
Techniques	Défaillance de composants du système de ventilation actuel (ventilateur, système de gestion) → fermeture de l'ouvrage	1	2	2	Maintenance régulière et surveillance de l'état de fonctionnement
	Fausse alarmes → fermeture de l'ouvrage et consommation d'énergie importante	1	1	1	Entretien régulier des équipements déclenchant des alarmes
	Mauvaises / Fausse valeurs de la mesure de qualité d'air → mise en route de la ventilation / fausse alarmes	1	1	1	Maintenance régulier de l'équipement de mesure, adaptation de la temporisation

Tableau 3.1 Evaluation des facteurs de risque

3.4.2 Risques liés au projet

Risque		Probabilité	Domages	Evaluation	Mesure
Organisationnels	Divergence entre les attentes du MO et les résultats des bureaux d'études	1	2	2	Coordination permanente avec le Maître d'Ouvrage
	Dépassement des coûts au niveau études ou réalisation	2	2	4	Estimation des coûts à chaque phase d'étude, métré permanente lors de la réalisation
	Adaptation des exigences en vigueur pendant la phase de planification ou de réalisation	1	1	1	-
	Manque de ressources financières pendant la réalisation	1	3	3	-
	Erreur d'interface en phase planification → problèmes de réalisation	1	2	2	Coordination permanente entre les lots
Techniques	Erreur de conception	1	2	2	Assurance qualité au sein du bureau d'étude
	Données de base erronées	1	1	1	Vérification sur site
	Application de techniques innovantes	1	2	2	Application de produits/techniques éprouvées et utilisées
	Qualité de réalisation insuffisante → mauvaise réalisation des travaux	1	2	2	-
	Réalisation tardée des nouvelles issues de secours	2	2	4	Priorisation du projet relatif aux issues de secours

Tableau 3.2 Evaluation des risques liés au projet

3.5 Remarques et concepts généraux

Le concept général pour l'assainissement du système de ventilation se base a priori sur la décision de déposer la dalle intermédiaire existante et sur les études préliminaires [5], [6].

En fonction de cette décision du Maître d'Ouvrage (MO), le système de ventilation actuel et ses composants sont déposés. L'âge des installations ainsi que l'incompatibilité avec le nouveau système de ventilation inhibe toute réutilisation des équipements actuels.

Dans le but de répondre au cadre réglementaire appliqué (directives de l'office fédéral des routes), une ventilation (mécanique) longitudinale doit être prévue. Cette dernière se fait à l'aide de ventilateurs de jet installés en voûte de l'ouvrage. Le nombre de ventilateurs est gouverné par le modèle retenu. Différentes variantes sont analysés par rapport à ce sujet. Lors des phases ultérieures du projet, des possibilités pour réduire la poussée aérodynamique pourront être étudiées comme p.ex. des rideaux synthétiques. Comme ce genre de mesure n'affecte pas le choix de solution mais uniquement le dimensionnement détaillé, ce concept n'est pas développé plus en détail au sein de cette étude.

Car le tunnel de la Clusette offre des caractéristiques particulières (déclivité), une analyse du niveau de sécurité est réalisée. Cette étude montre qu'un système de ventilation naturelle peut être une alternative à une ventilation mécanique car le niveau de sécurité n'est pas affecté en s'affranchissant d'une ventilation mécanique. Sur la base de ces résultats cette solution est donc également présentée.

4 Description des mesures - Ventilation

4.1 Système de gestion de l'installation de ventilation

4.1.1 Etat actuel

Dans son état actuel, le système de ventilation est contrôlé par un automatisme simple ayant atteint sa durée de vie. Les modes d'opération principaux sont les suivants:

- Mode normal
- Mode incendie
- Local
- Hors service

Il existe une commande à distance des équipements de ventilation. Les deux modes de fonctionnement "mode normal" et "mode incendie" sont décrites plus en détail ci-dessous.

Ventilation en mode normal

La masse d'air est contrôlée selon les indications des mesures de monoxyde de carbone (CO) et d'opacité (OP). Selon ces indications, le flux d'air peut être réglé en quatre étapes avec les deux ventilateurs d'air frais et les deux vitesses. En cas normal, le clapet 1 est ouvert et le clapet 2 est fermé.

Ventilation en mode incendie

Il n'existe qu'une zone d'incendie pour tout le tunnel. Le contrôle de l'écoulement longitudinal n'est pas possible.

La détection d'incendie se fait par mesure de température dans le tunnel. L'incendie peut être localisé avec une précision de 8 m. Après la détection, 2 minutes permettent de valider ou annuler l'alarme incendie.

En cas d'opération « incendie », les mesures d'OP ne sont plus considérées.

4.1.2 Mesures prévues

Vu que le système de gestion de la ventilation a atteint sa durée de vie et n'est plus compatible avec le matériel actuel, le système de gestion doit être entièrement remplacé.

L'Annexe C présente d'une manière plus détaillée le système de gestion de l'installation de ventilation.

4.2 Système de ventilation

4.2.1 Etat actuel

Le système de ventilation actuel est un système avec deux gaines au-dessus de l'espace de circulation et trois ventilateurs axiaux: deux ventilateurs d'air frais et un ventilateur pour l'air vicié. Les ventilateurs ne possèdent qu'un sens de fonctionnement. Le Tableau 4.1 résume les données techniques principales de ces ventilateurs axiaux.

La Figure 4.1 ci-dessous montre la configuration du système de ventilation y c. les capteurs de la qualité d'air. Les gaines sont reliées au tunnel par des bouches d'insufflation et des bouches à double usage (air frais et air vicié). Ces bouches sont ouvertes en permanence.

	Ventilateurs d'air frais		Ventilateur incendie
	Vitesse 1	Vitesse 2	Vitesse 1
Diamètre nominal [mm]	2240	2240	2800
Puissance [kW]	9	70	240
Débit d'air [m ³ /s]	53.4	108.5	200

Tableau 4.1 Données de base des ventilateurs axiaux installés [8]

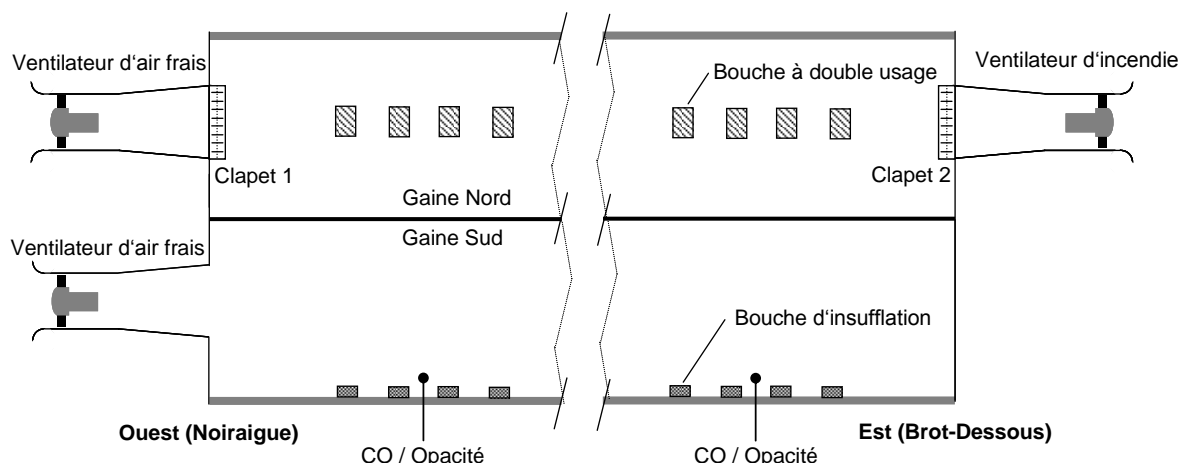


Figure 4.1 Vue de dessus du système de ventilation actuel [8]

Ventilation en mode normal

En fonctionnement normal, l'air frais est amené par les ventilateurs de l'Ouest vers l'Est. Il entre dans le tunnel d'une part depuis la gaine Nord via des bouches d'aération au plafond, et d'autre part depuis la gaine Sud jusqu'au bas de la paroi sud du tunnel (cf. Figure 4.1).

Les heures de fonctionnement des ventilateurs indiquent que la ventilation n'a pas été utilisée fréquemment.

Ventilation en mode d'incendie

En cas d'incendie, le clapet 1 est fermé et l'air est aspiré par le ventilateur incendie avec vitesse nominale. Le ventilateur 2 insuffle de l'air frais sur toute la longueur du tunnel par les bouches situées le long de la paroi sud.

4.2.2 Mesures prévues

Dans le cadre de la présente étude, deux types de solution sont analysés avec, le cas échéant différents variantes par solution. Ces deux solutions sont d'une part une ventilation mécanique longitudinale et, d'autre part, une ventilation naturelle.

La solution de ventilation naturelle n'est pas conforme au cadre réglementaire retenue pour la présente étude. Par contre, la solution permet d'atteindre un niveau de risque étant au moins équivalente voire inférieure à ce dernier de la solution conforme aux exigences.

4.2.2.1 Solution 1 – Ventilation mécanique longitudinale

Selon le choix du système de ventilation pour le mode sinistre (cf. annexe A.1) et le mode normale (cf. annexe Annexe B), un système de ventilation longitudinale est convenable en fonction des exigences en vigueur et des enjeux de l'ouvrage. La ventilation longitudinale se fait par des ventilateurs de jet, capable d'engendrer un courant d'air dans l'ouvrage par l'échange de la quantité de mouvement entre le jet d'air provenant du ventilateur et l'air dans le tunnel.

Selon le dimensionnement (cf. A.2), une poussée nominale de 11'000 N est nécessaire. Au-delà d'atteindre cette poussée avec la totalité des ventilateurs de jet, il est nécessaire que 90% de la poussée de dimensionnement soient atteint en cas de défaillance d'une batterie de ventilateurs de jet.

Un grand nombre de variantes sont envisageables en ce qui concerne le type (taille et poussée unitaire) ainsi que la disposition des ventilateurs de jet.

En tenant compte de la contrôlabilité du courant d'air, il s'avère qu'il faut soit prévoir des ventilateurs commutables, soit des variateurs de fréquence.

La surveillance des ventilateurs de jet se fait en tenant compte des préconisations du manuel technique EES de l'OFROU. Pour le tunnel de la Clusette, on arrive donc à:

- Des capteurs de vibration
- Des capteurs de chute d'un ventilateur

Dans la suite, pour chacune des deux familles de solutions (sans/avec variateur de fréquence), la solution la plus avantageuse (nombre d'équipements en tunnel, coûts d'investissement) sont présentées.

Variante 1: Ventilateurs de jet commutables 1000 mm

Selon le dimensionnement, un total de 18 VJ est nécessaire. La Figure 4.2 ci-dessous montre une batterie de 3 VJ dans la section type du tunnel de la Clusette. Au total 6 positions de ventilateurs de jet sont donc nécessaires.

Le Tableau 4.2 présente des caractéristiques représentatives de ce type de ventilateur de jet.

Caractéristique	Valeur	Unité
Diamètre de la route	1000	[mm]
Diamètre extérieur	1300	[mm]
Longueur	3600	[mm]
Poids	1500	[kg]
Poussée en champs libre	900	[N]
Puissance du moteur	30	[kW]

Tableau 4.2 Données techniques exemplaires des VJ de diamètre 1000 mm

En ce qui concerne la disposition, il faut respecter les exigences suivantes:

- Interdistance entre deux groupes: > 80 m
- Interdistance au portail: > 80 m
- Interdistance aux anémomètres: > 80 m

Les positions suivantes sont donc proposées :

Groupe	Position depuis le portail Ouest [m]
1	80
2	240
3	320
4	700
5	780
6	940

Tableau 4.3 Disposition des ventilateurs de jet, variante 1 (cf. annexe E.1)

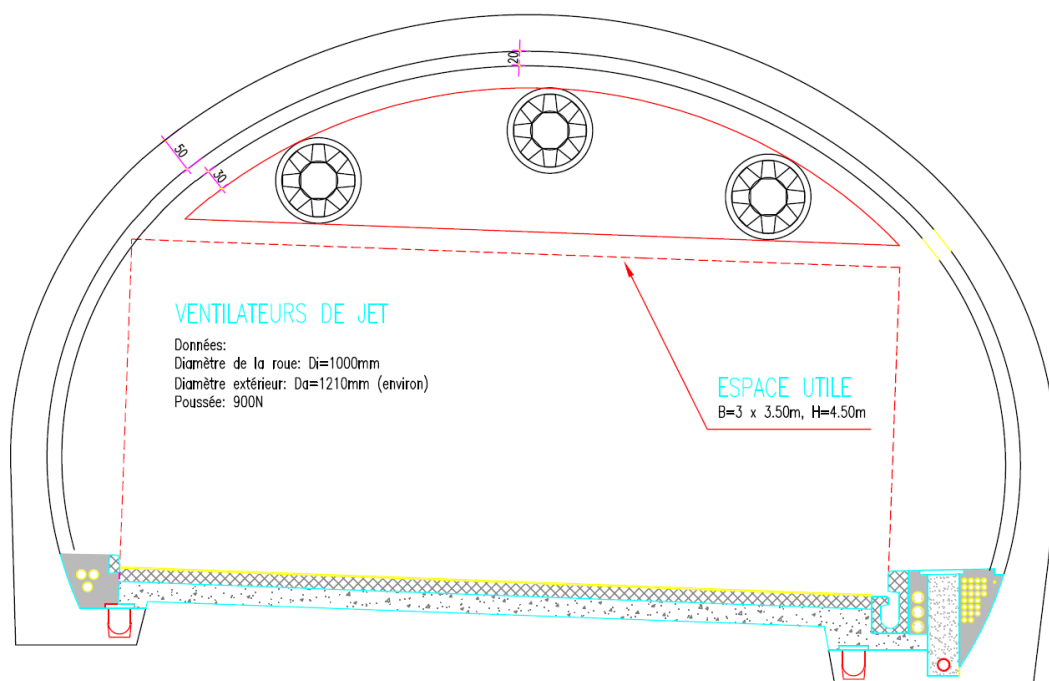


Figure 4.2 Coupe type du tunnel avec une batterie de 3 ventilateurs de jet de diamètre 1000 mm (hypothèse: 20 cm de revanche pour étanchéité du tunnel).

Variante 2: Ventilateurs de jet 1250mm avec variateurs de fréquence

La variante 2 prévoit des ventilateurs de jet de taille 1250 mm avec des variateurs de fréquence. Selon la Figure 4.3 ci-dessous, il est envisageable d'avoir 3 VJ par batterie. En fonction du nombre exigé, 3 groupes de 3 VJ et un groupe de 2 VJ sont proposés mais pour des raisons de symétrie et de réserve, 4 groupes de 3 VJ sont préconisés.

Le Tableau 4.4 présente des caractéristiques exemplaires de ce type de ventilateur de jet.

Caractéristique	Valeur	Unité
Diamètre de la route	1250	[mm]
Diamètre extérieur	1600	[mm]
Longueur	5000	[mm]
Poids	2000	[kg]
Poussée en champs libre	1475	[N]
Puissance du moteur	45	[kW]

Tableau 4.4 Données techniques exemplaires des VJ de diamètre 1000 mm

En ce qui concerne la disposition, il faut respecter les exigences suivantes:

- Interdistance entre deux groupes: > 80 m
- Interdistance au portail: > 80 m
- Interdistance aux anémomètres: > 80 m

Le Tableau 4.5 ci-dessous propose les positions des groupes.

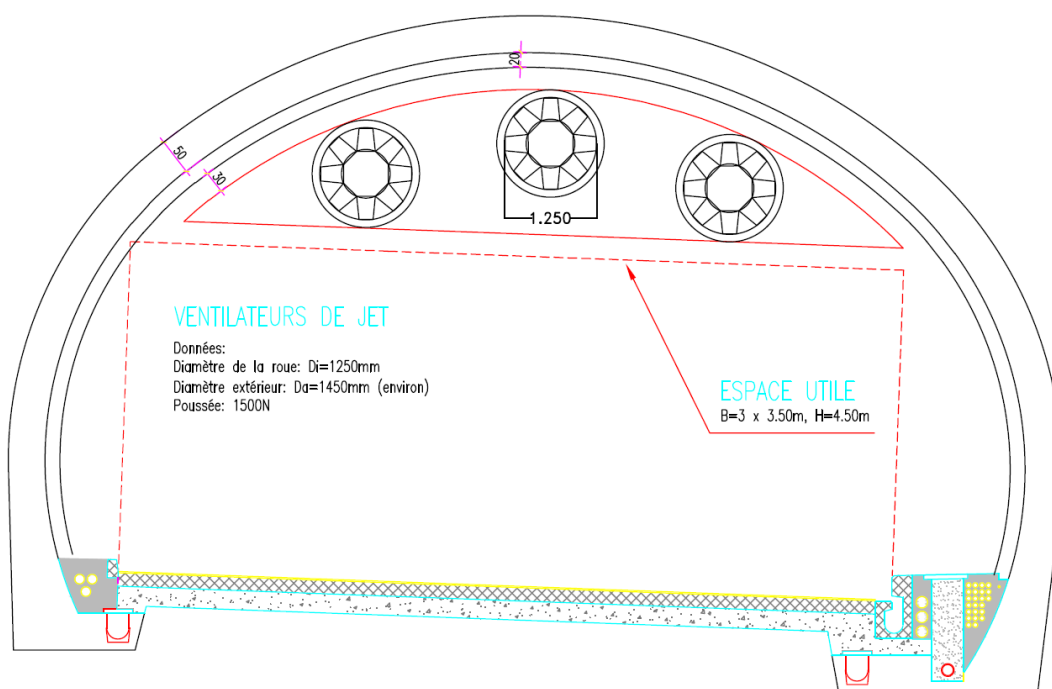


Figure 4.3 Coupe type du tunnel avec une batterie de 3 ventilateurs de jet de diamètre 1250 mm (hypothèse : 200 mm de revanche pour étanchéité du tunnel).

Groupe	Position depuis le portail Ouest [m]
1	80
2	160
3	860
4	940

Tableau 4.5 Disposition des ventilateurs de jet, variante 2 (cf. annexe E.2)

4.2.2.2 Solution 2 – Ventilation naturelle

Selon l'analyse faite dans l'Annexe D, une ventilation naturelle offre un niveau de sécurité en cas d'incendie égal voire supérieur à celui pour une ventilation mécanique.

Cette variante permet de s'affranchir complètement du système de ventilation engendrant ainsi des économies importantes tout en maintenant la sécurité de l'ouvrage.

Les résultats de l'étude permettent également de conclure qu'en réalisant 3 issues de secours supplémentaires (donc 8 au lieu de 5), le niveau de risque, quantifié en termes du niveau d'intoxication globale des usagers, peut être réduite de 50%. Il nous paraît donc intéressant de réaliser ces issues supplémentaires parce que l'efficacité en termes d'impact au niveau de risque de cette investissement supplémentaire est très haut.

L'étude du niveau de risque compare en plus le niveau de sécurité du système de ventilation actuelle avec une situation intermédiaire consistant d'une ventilation naturelle mais sans présence de la galerie. In en sort que la dépose du système de ventilation existant ainsi que de la dalle intermédiaire sans réalisation de la galerie de sécurité ne permet pas de diminuer le niveau de risque de l'ouvrage.

4.3 Equipement de mesure

4.3.1 Etat actuel

Dans son état actuel, deux capteurs du monoxyde de carbone et deux opacimètres sont installés (cf. Figure 4.1). Indépendamment de l'état de fonctionnement, ces capteurs ont dépassé leur durée de vie.

4.3.2 Mesures prévues

L'âge des installations ainsi que des raisons de compatibilité engendrent, indépendamment de la solution retenue, le remplacement des capteurs actuels par de nouveaux opacimètres. Des capteurs du monoxyde de carbone seront uniquement à prévoir si ce polluant déterminerait les exigences à la qualité d'air. Selon notre expérience, ceci n'est presque jamais le cas.

Des détecteurs de fumée sont à placer chaque 100 m dans la partie du tunnel. Une répartition régulière simplifie la détection d'un incendie mobile. Au vu de la déclivité longitudinale, nous préconisons que les capteurs de fumées soient disposés tous les 50 m.

En ce qui concerne les solutions avec ventilation mécanique, l'installation d'anémomètres est nécessaire. Afin d'arriver à une mesure fiable de la vitesse d'air, deux groupes à trois anémomètres sont requis, c.-à-d. 6 anémomètres au total. Des anémomètres ultrason transversaux sont préférés car la vitesse moyenne dans l'espace de circulation est mesurée au lieu d'une vitesse ponctuelle, proche des parois.

Dans l'Annexe E, deux synoptiques montrent la répartition des équipements pour les deux variantes concernant le type de ventilateur de jet.

Si la variante de ventilation naturelle est choisie, aucun équipement de mesure propre à la ventilation ne serait requis. Un dépassement important des mesures de la qualité d'air (opacité) pourrait également être détecté par les capteurs de fumées faisant partie de la détection d'incendie. Un dépassement du seuil engendrerait une alarme notifiant l'exploitation afin qu'il puisse prendre les mesures appropriées.

4.4 Ventilation des issues de secours

4.4.1 Etat actuel

A l'état actuel, le tunnel de la Clusette ne dispose pas d'issues de secours. Les usagers doivent s'évacuer, en cas de sinistre, à travers les portails du tunnel.

4.4.2 Mesures prévues

Afin de répondre aux exigences par rapport à la fuite des personnes (cf. [4]), une galerie de sécurité parallèle est prévue pour le tunnel de la Clusette. Cette galerie sera reliée à l'espace de circulation à l'aide de liaisons transversales. La Figure 4.4 ci-dessous montre la situation de la galerie de sécurité avec, à ce stade, 8 liaisons transversales.

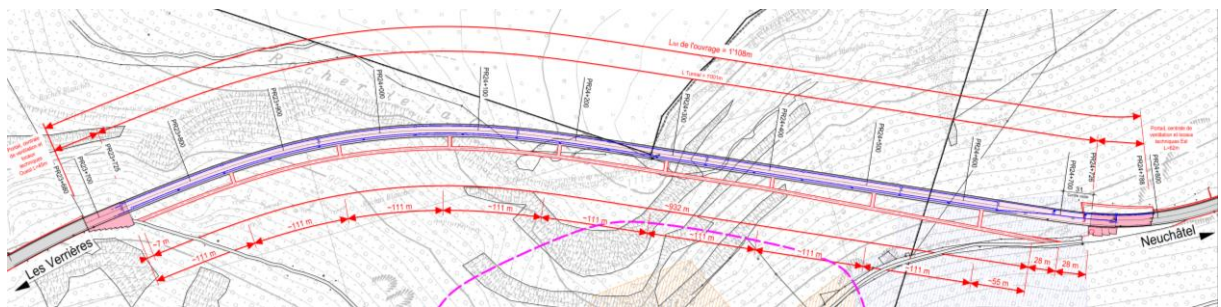


Figure 4.4 Plan de situation de la galerie de sécurité

La ventilation de la galerie de sécurité a comme but d'empêcher toute pénétration de fumée dans la galerie afin que les usagers du tunnel puissent s'évacuer dans un environnement secours. Pour le cas d'une galerie de sécurité parallèle, les exigences de l'OFROU, [3] prévoient que l'ensemble de la galerie est mis en surpression et qu'un sas est installé à chaque extrémité. Une légère surpression est présente en permanence afin de pouvoir répondre instantanément à une ouverture de porte et ainsi, éviter la pénétration de poussières depuis l'espace de circulation.

Etant donné que le tunnel de la Clusette est régulièrement utilisé par des cyclistes, le SPC exige que la galerie de sécurité puisse être utilisée par ces derniers afin de faire la montée entre Noiraigues et Brot-Dessous. En conséquence, la galerie aura un accès libre des deux côtés et il n'est donc pas possible de la mettre en surpression. En conséquence, chaque liaison transversale est ventilée individuellement avec un principe de ventilation adapté tout en essayant de répondre aux exigences en vigueur. La ventilation se fait dans le principe de maintenir une surpression en mode normale et d'atteindre un courant d'air de aux moins 1 m/s à travers les portes (les deux portes du sas étant ouverte) respectivement 2 m/s à travers une seule porte ouverte.

Exploitation normale

En mode normal, si toute porte est fermée, une surpression d'au moins 50 Pa doit être atteinte. Les fuites d'air à considérer sont d'environ 0.5 à 1.0 m³/s afin d'arriver à un renouvellement de l'air périodique. Pour chacune des liaisons transversales, un débit de

Exploitation en cas de sinistre

En cas de sinistre, la ventilation doit atteindre son régime le plus rapidement possible. Les forces sur les portes d'issues ne doivent pas inhiber leur ouverture.

Si toutes les deux portes (porte d'issue de secours et porta donnant à la galerie) sont ouvertes en même temps, la vitesse moyenne de l'écoulement à travers chacune de ces portes doit être d'au moins 1 m/s.

Par des mesures en génie civil, le risque d'aspiration de fumées ou d'autres émissions indésirables par le système de ventilation depuis l'extérieur de la SISTO est à minimiser pour que l'exploitation soit possible en tout moment sans restrictions. Sur la de la solution choisie, la pénétration de fumées dans la galerie ne peut être limité par des mesures en génie civil (pas de sas aux extrémités).

Solution technique

Afin de réduire les coûts d'investissement de l'installation, il est préconisé de faire la ventilation des issues de secours avec des monoblocs de ventilation tel que utilisé dans le domaine de climatisation-ventilation-chauffage de bâtiments.

Au cause de la différence importante entre les deux points de fonctionnement (mode normal : 3'600 m³/h ; mode sinistre : 20'000 m³/h), nous préconisons d'installer un ventilateur spécifique au mode normal. Pour le mode sinistre, il est préconisé d'installer un seul ventilateur et en conséquence d'avoir uniquement une redondance partielle.

Les dimensions des unités correspondantes sont présentées dans le Tableau 4.6 et le Tableau 4.7. Des composants plus petits sont disponibles mais à puissance électrique plus importante. Des silencieux sont recommandés afin de réduire d'une part le niveau sonore en mode normal (coté galerie) et d'autre part en mode sinistre.

Elément	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]
Monobloc (sans silencieux)	1'100	1'100	1'100
Silencieux	1'600	1'100	1'100

Tableau 4.6 Dimensions du monobloc et des silencieux pour le mode normal

Elément	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]
Monobloc (sans silencieux)	1'500	1'500	1'500
Silencieux	1'600	1'500	1'500

Tableau 4.7 Dimensions du monobloc et des silencieux pour le mode sinistre



Figure 4.5 Image d'un monobloc de ventilation ; solution avec module de régulation active de la surpression

Le niveau de surpression dans la liaison transversale est limité à l'aide d'un registre de surpression. Ceci limite le besoin en composant électromécaniques et représente une solution robuste. Une régulation du niveau de surpression en variant le régime du ventilateur n'est pas prévu mais peut se réaliser à travers l'installation de composants complémentaires (cf. Figure 4.5).

Le Tableau 4.8 présente les caractéristiques électriques des composants de ventilation pour la mise en surpression des issues de secours.

Elément	Tension d'alimentation	Puissance raccordé
Ventilateur mode normal	3 x 400 V / 50 Hz	1 x 1.5 kW
Ventilateur mode sinistre	3 x 400 V / 50 Hz	1 x 3.5 kW
Registre de fermeture	230 V / 50 Hz	2 x 0.5 kW
Total		5.5 kW

Tableau 4.8 Alimentation électrique pour la mise en surpression par liaison transversale

En cas d'ouverture d'une porte d'issues de secours, l'ensemble des ventilateurs prévus pour le mode sinistre se met en marche et les ventilateurs pour le mode normal sont arrêtés. Des tests de fonctionnement réguliers permettent de s'assurer du bon fonctionnement de la ventilation des liaisons transversales.

4.5 Exigences pour le génie civil

Car les ventilateurs de jet sont suspendus à la voûte du tunnel, celle-ci doit être capable de prendre les charges des VJ (poids d'un VJ de l'ordre de 1500 à 2000 kg).

Les monoblocs de ventilation sont d'un poids unitaire de l'ordre de 200 kg. Trois ouvertures de dimensions 1000 mm x 1000 mm sont à créer dans la voûte de séparation entre la liaison transversale et la galerie.

Les dimensions minimales des portes des issues de secours sont données dans la Figure 4.6 ci-dessous. Le gabarit de passage doit être au moins de 1.25 m x 2.1 m. Des portes coulissantes sont fortement préconisées. Ces dimensions sont valables ainsi pour les portes entre les liaisons transversales et la galerie.

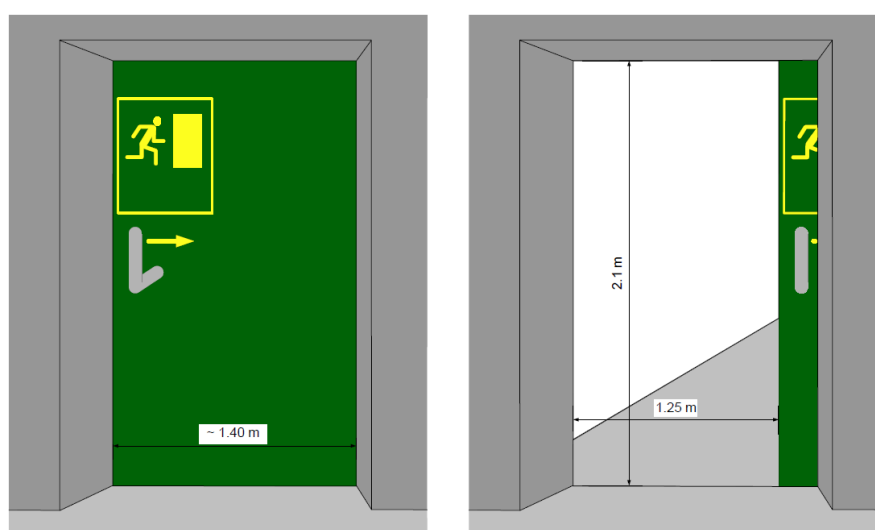


Figure 4.6 Dimensions des portes et passages des portes d'issues de secours, [3]

5 Programme des travaux, gestion du trafic, planning

L'enjeu majeur de travaux dans un tunnel sous exploitation est le maintien de la sécurité de l'ouvrage lors des différentes phases de construction.

Dans le cas du tunnel de la Clusette, cette problématique est d'autant plus importante que la dalle intermédiaire sera déposée. Par conséquent, le système de ventilation actuel ne sera plus totalement fonctionnel. Cette dégradation du niveau sécuritaire doit être compensée, soit par l'installation en parallèle du nouveau système de ventilation, soit par d'autres mesures diminuant les risques d'un incendie, comme par exemple la mise en place d'un trafic alterné ou d'un trafic à vitesse réduite.

Il serait également envisageable de déposer uniquement la partie air frais de la dalle intermédiaire et de conserver l'extraction dans un premier temps pour ensuite installer aux moins un ventilateur de jet par batterie. Eventuellement des positions provisoires seront à prévoir en fonction de la poussée aéraulique nécessaire. Ensuite, la partie air vicié peut être déposée et les équipements de ventilation se mettront définitivement en place.

Il apparaît clairement que le planning des interventions doit se faire en coordination avec l'ensemble des domaines et peut influencer les détails de la solution technique voire le choix du système de ventilation suivants les contraintes du projet.

6 Coûts

6.1 Coûts d'investissement

Les tableaux suivants résument les coûts d'investissement pour l'équipement de ventilation des issues de secours (galerie de sécurité). La TVA n'est pas comprise et les prix sont relevés en janvier 2015.

Elément	Nombre	Prix unitaire	Prix
Ventilateurs de jet – variante 1	18	CHF 36'000.-	CHF 648'000.-
Capteurs de fumée	12	CHF 7'000.-	CHF 84'000.-
Anémomètres	6	CHF 25'000.-	CHF 150'000.-
Opacimètres	2	CHF 25'000.-	CHF 50'000.-
Coûts totaux (hors TVA)			CHF 932'000.-

Tableau 6.1 Estimation des coûts d'investissement (+/- 30%) – Solution 1 – Variante 1

Elément	Nombre	Prix unitaire	Prix
Ventilateurs de jet – variante 2	12	CHF 52'000.-	CHF 624'000.-
Capteurs de fumée	12	CHF 7'000.-	CHF 84'000.-
Anémomètres	6	CHF 25'000.-	CHF 150'000.-
Opacimètres	2	CHF 25'000.-	CHF 50'000.-
Coûts totaux (hors TVA)			CHF 908'000.-

Tableau 6.2 Estimation des coûts d'investissement (+/- 30%) – Solution 1 – Variante 2

Elément	Nombre	Prix unitaire	Prix
Capteurs de fumée	24	CHF 7'000.-	CHF 168'000.-
Coûts totaux (hors TVA)			CHF 168'000.-

Tableau 6.3 Estimation des coûts d'investissement (+/- 30%) – Solution 2

Elément	Nombre	Prix unitaire	Prix
Monoblocs de ventilation, mode normal	8	CHF 15'000.-	CHF 120'000.-
Monoblocs de ventilation, mode sinistre	8	CHF 20'000.-	CHF 160'000.-
Silencieux et accessoires	16	CHF 3'000.-	CHF 48'000.-
Clapet de décompression	8	CHF 3'500.-	CHF 28'000.-
Coûts totaux (hors TVA)			CHF 356'000.-

Tableau 6.4 Estimation des coûts d'investissement (+/- 30%) – Ventilation des issues de secours

Selon l'évolution actuelle des prix (évolution des taux de change), une estimation fiable est difficile. De plus, les prix des ventilateurs et registres ont évolué de manière importante pendant les dernières années en fonction de la courbe de charge des fournisseurs ainsi que selon l'évolution du prix des matériaux.

6.2 Coûts d'exploitation

A ce stade de l'étude, il est supposé que les ventilateurs de jet sont uniquement mise en service pour des tests réguliers (hypothèse : annuellement 1h de tests). En conséquence, les coûts d'exploitation sont négligés car ils se situent de l'ordre de CHF 200.-

La ventilation des issues de secours, fonctionne en permanence et consomme, par année, 105120 kWh. Sous l'hypothèse d'un prix de 0.20 CHF/kWh, ceci correspond à un montant total de CHF 21'000.-

6.3 Coûts de maintenance (horizon temporel 10 années)

Les coûts de maintenance annuels sont estimés en supposant des différents taux de maintenance en fonction de l'équipement, appliqués aux coûts d'investissement. Ces coûts de maintenance sont résumés dans le Tableau 6.5 ci-dessous.

Elément	IK ₀	Taux sur IK ₀	Somme
Ventilateurs de jet – variante 1	CHF 648'000	4%	CHF 25'900.-
Ventilateurs de jet – variante 2	CHF 624'000	4%	CHF 25'000.-
Ventilation liaisons transversales	CHF 356'000	4%	CHF 14'000.-
Capteurs de fumée – Solution 1	CHF 84'000	1%	CHF 800.-
Capteurs de fumée – Solution 2	CHF 168'000	1%	CHF 1'700.-
Anémomètres	CHF 150'000	5%	CHF 7'500.-
Opacimètres	CHF 50'000	5%	CHF 2'500.-
Coûts annuels totaux (hors TVA) – Solution 1 – Var 1			CHF 50'700.-
Coûts annuels totaux (hors TVA) – Solution 1 – Var 2			CHF 49'600.-
Coûts annuels totaux (hors TVA) – Solution 2			CHF 15'700.-

Tableau 6.5 Estimation des coûts d'entretien des variantes

En conséquence, pour un horizon temporel de 10 ans, les coûts de maintenance sont de 507'000.- pour la variante 1 et de 496'000.- pour la variante 2. Une solution avec ventilation naturelle nécessite des coûts de maintenance de CHF 157'000.

7 Références

- [1] Office fédéral des routes OFROU, directive 13 001 « Ventilation des tunnels routiers », édition 2008 V2.01, version allemande.
- [2] Office fédéral des routes, OFROU, manuel technique EES 23 001, 31.08.2011.
- [3] Office fédéral des routes, OFROU, Directive 13 002 "Ventilation des galeries de sécurité des tunnels routiers", Edition 2008 V1.03
- [4] Société suisse des ingénieurs et des architectes, norme SIA 197/2: Projet de tunnels – tunnels routiers, octobre 2004.
- [5] HBI Haerter SA, rapport 08-100-01 „H10 Tunnel de la Clusette, évaluation du principe de ventilation“, décembre 2008.
- [6] HBI Haerter SA, rapport 08-100-02 „Mise en sécurité du tunnel de la Clusette“, 08.03.2011.
- [7] Service des ponts et chaussées canton de Neuchâtel, bureau transport et circulation, Comptage hebdomadaire poste de comptage 00107600, axe NE:J10, 13.10.2008.
- [8] Meteotest: Meteonorm version 6.1, base de données météorologiques.
- [9] Plans reçu du CNERN:
 - a. Plan nr. 2191125201 du 25.04.1973 de Electro-Watt S.A.
 - b. Plan nr. 2191109573 du 26.03.1974 de Electro-Watt S.A.
 - c. Plan nr. 2191109562 du 24.06.1971 de Electro-Watt S.A.
 - d. Plan nr. 2191109567 du 08.04.1974 de Electro-Watt S.A.
 - e. Plan nr. 2191109588 du 15.11.1971 de Electro-Watt S.A.
- [10] Riess, Bettelini & Brandt, "SPRINT – A Design Tool for Fire Ventilation", 10.ISAVVT, Boston.
- [11] Riess & Brandt, "ODEM – A One-Dimensional Egress Model for Risk Assessment", 5th Int. Conf. Tunnel Safety and Ventilation.

Annexe A Ventilation en mode sinistre

A.1. Choix du système de ventilation pour le mode sinistre

Le système de ventilation se détermine selon la directive [1] en fonction de la longueur de l'ouvrage, le type de trafic et si nécessaire la charge de trafic et des poids lourds.

Selon sa longueur, le tunnel de la Clusette se retrouve dans une zone transitoire nécessitant une évaluation détaillée des paramètres importants (cf. Figure A.3, trait rouge).

Ces paramètres importants sont :

- Le trafic journalier moyen
- Le nombre de poids lourds par jour et
- La déclivité moyenne la plus défavorable sur 800 m de l'ouvrage.

L'évaluation de ces paramètres se fait dans la Figure A.1 ci-dessous. En ce qui concerne la charge de trafic, les données (TJM, trafic des PL) de l'année 2023 impliquent l'évaluation partielle "Inférieur, I". Par contre, la déclivité importante de l'ouvrage classe le tunnel dans la catégorie "supérieure, S" pour le paramètre "Evaluation partielle déclivité". Dans sa globalité, le tunnel est classifié dans la catégorie "B" (cf. Figure A.2) représentant un risque moyen.

Évaluation partielle trafic global	TJM / nombre de voies de circulation	
	Trafic unidirectionnel	Trafic bidirectionnel
S (supérieur)	> 16'000	> 12'000
M (moyen)	11'000 à 16'000	8'000 à 12'000
I (inférieur)	< 11'000	< 8'000

Évaluation partielle trafic des poids lourds	PL / 24 h et nombre de voies de circulation	
	Trafic unidirectionnel	Trafic bidirectionnel
S	> 1'600	> 1'200
M	800 à 1'600	500 à 1'200
I	< 800	< 500

Évaluation partielle déclivité	Déclivité moyenne max. par tronçons de 800 m, en %		
	Trafic unidirectionnel TU 1	Trafic unidirectionnel TU 2	Trafic bidirectionnel TB
S	< - 3	< - 3 et > + 3	> 3
M	- 3 à + 3	- 3 à - 1.5 et + 1.5 à + 3	1.5 à 3
I	> + 3	- 1.5 à + 1.5	0 à 1.5

Figure A.1 Evaluation des trois paramètres supplémentaires pour le choix du système de ventilation pour le cas de sinistre, [1].

Évaluation globale	Évaluations partielles (l'ordre est indifférent)
A	S-S-S, S-S-M, S-S-I, S-M-M
B	S-M-I, S-I-I, M-M-M, M-M-I
C	M-I-I, I-I-I

Figure A.2 Evaluation globale des paramètres déterminant le système de ventilation, [1]

Avec cette évaluation globale, il est possible de définir plus précisément le système de ventilation pour le tunnel de la Clusette. Selon [1], on arrive donc à un système de ventilation mécanique sans aspiration en cas de sinistre, donc un système de ventilation longitudinal.

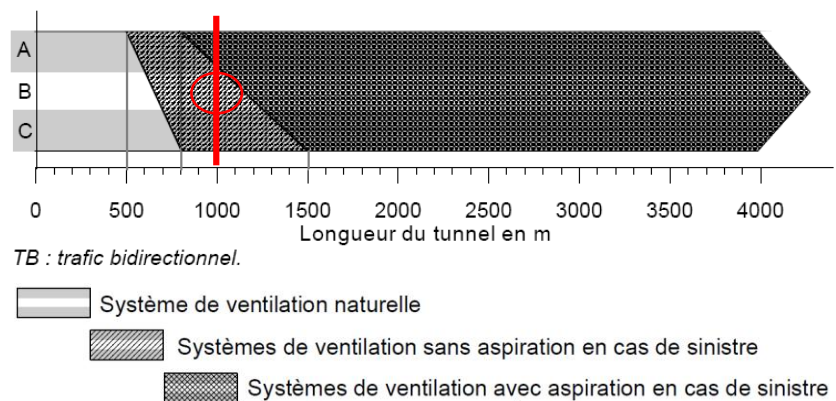


Figure A.3 Choix du système de ventilation pour le cas de sinistre, [1]

En cas de sinistre, le tunnel est donc ventilé en direction longitudinale. Pour ce faire, des ventilateurs de jet sont employés dans la plupart des ouvrages.

Vu que le tunnel est à trafic bidirectionnel, la vitesse de l'air en tunnel ne doit pas dépasser la vitesse critique car la stratification des fumées serait détruite. C'est pour cette raison que les fumées vont être expulsées par le portail le plus proche du foyer à une vitesse de 1.0 m/s. Afin que le système de ventilation comporte une certaine marge de sécurité, le dimensionnement des installations se fait, en accord avec les directives en vigueur, pour une vitesse d'air de 1.5 m/s.

La Figure A.4 ci-dessous montre une esquisse du fonctionnement de ce type de système de ventilation selon le mode de réalisation le plus fréquent : contrôle des écoulements par des ventilateurs de jet.

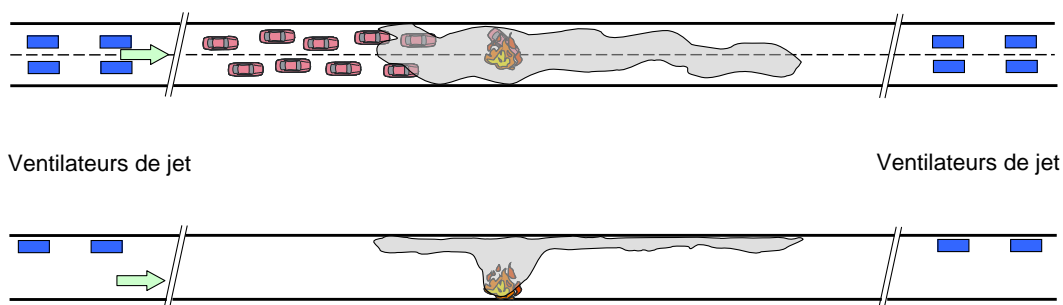


Figure A.4: Fonctionnement principal du système de ventilation pour le cas de sinistre.

A.2. Dimensionnement de la ventilation pour le mode sinistre

Le dimensionnement de la ventilation longitudinale se fait selon les exigences de [1]. Les données de base utilisées sont présentées dans le Tableau A.1 ci-dessous.

Paramètre	Valeur
Section libre du tunnel	79.56 [m ²]
Diamètre hydraulique	9.0 [m]
THD	993 [vhc / heure]
Taux des PL	3.5 [%]
Vitesse signalisée	80 [km/h]
Régime de trafic	Trafic bidirectionnel
Températures	selon Tableau 2.3

Tableau A.1 Valeurs appliquées pour le dimensionnement de la ventilation en mode sinistre

En fonction de ces paramètres, la Figure A.5 ci-dessous montre la poussée nécessaire en fonction de la position du sinistre tout en considérant le désenfumage en direction descendante à 1.5 m/s.

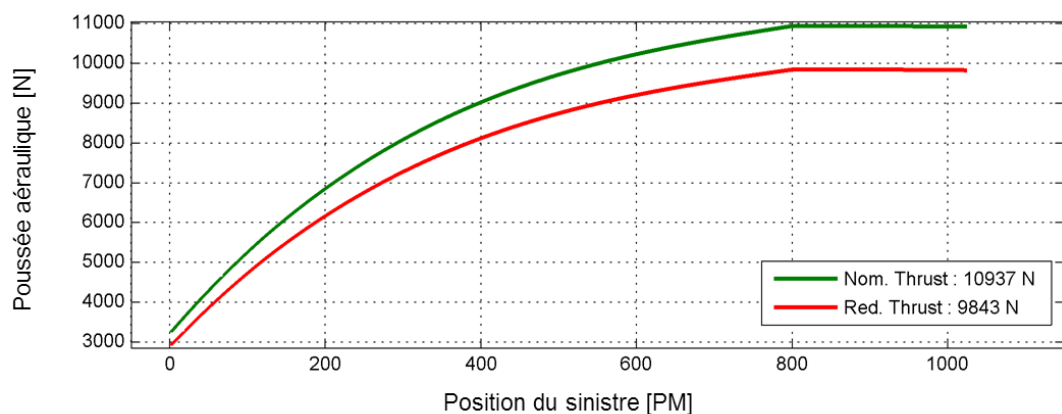


Figure A.5: Poussée aérodynamique nécessaire au système de ventilation en mode sinistre. La courbe verte représente la poussée nominale, la courbe rouge la poussée en cas de défaillance d'une batterie de VJ.

Type (Diamètre)	Poussée unitaire [N] (en champs libre)	Nombre de VJ		Disposition des VJ	
		Nominal	Minimal		
630 mm	495	30	27	6 x 5 + 1 x 2	(total: 32)
				8 x 4	(total: 32)
				5 x 6 + 1 x 3	(total: 33)
				4 x 7 + 1 x 6	(total: 34)
710 mm	780	19	17	6 x 3 + 1 x 2	(total: 20)
				5 x 4 + 1 x 1	(total: 21)
1000 mm	900	17	15	4 x 4 + 1 x 3	(total: 19)
				6 x 3	(total: 18)
1120 mm	1260	12	11	6 x 2 + 1 x 1	(total: 13)
1250 mm	1475	10	9	5 x 2 + 1 x 1	(total: 11)
				3 x 3 + 1 x 2	(total: 11)
1400 mm	1905	8	7	5 x 2	(total: 10)

Tableau A.2 Nombre de ventilateurs de jet et variantes de la disposition pour différents types de ventilateurs de jet

L'analyse de la contrôlabilité du courant d'air montre qu'aucun des ventilateurs proposés n'est capable de contrôler le courant d'air dans la précision requise en prévoyant uniquement une vitesse. En prévoyant des ventilateurs de jet à moteur commutable (deux vitesses), les VJ de taille 630 mm, 710 mm et 1000 mm permettent de contrôler le courant d'air avec la précision requise. Tout autre type de VJ ne peut respecter les exigences de précision en prévoyant des moteurs à deux enroulements. Dans les deux variantes (moteurs commutables, moteurs à deux enroulements), le nombre de câbles est quasiment dédoublé. Des moteurs à deux enroulements avec un certificat de tenue au feu sont difficiles à trouver sur le marché.

En prévoyant des variateurs de fréquence, il est possible d'opérer les ventilateurs de jet dans une plage de 30% à 100% de la vitesse nominale, ce qui correspond à une plage de poussée aéraulique d'environ 10% à 100%. Des variateurs de fréquence permettent pour tous les types de VJ présentés ci-dessus de contrôler le courant d'air selon les exigences en vigueur et permettent en plus d'éviter des commutations permanentes, ce qui est favorable à la durée de vie des ventilateurs.

Annexe B Ventilation en mode normal

Selon l'expérience pour ce type de tunnel, une ventilation mécanique n'est pas nécessaire en mode normal (ventilation par l'effet piston des véhicules ainsi que ventilation naturelle par les vents externes et le tirage naturel).

Néanmoins, les ventilateurs de jet installés pour le cas de sinistre permettent d'augmenter l'apport d'air frais par un des portails si les besoins en terme d'apport d'air frais ne seraient pas satisfaits.

La Figure B.1 montre ces deux principes dans lesquelles de l'air frais rentre par un des portails dans une quantité suffisante pour garantir la qualité d'air dans le tunnel.

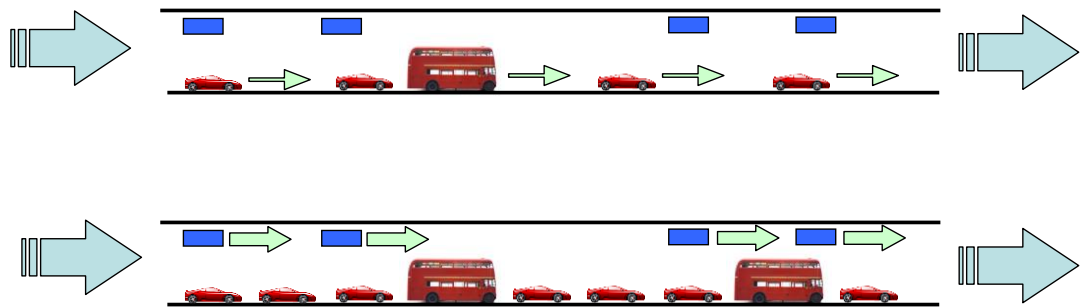


Figure B.1: Principes de ventilation en exploitation normal : ventilation naturelle par l'effet piston des véhicules (en haut), ventilation longitudinale par ventilateurs de jet (en bas).

Annexe C Pilotage de la ventilation

C.1. Généralités

Le pilotage de la ventilation définit le fonctionnement de l'installation de ventilation du tunnel. Elle doit satisfaire aux exigences suivantes :

En mode sanitaire:

- assurance d'une qualité de l'air satisfaisante dans l'espace de circulation,
- faible consommation énergétique, fonctionnement stable, pas de commutations fréquentes.

En cas de sinistre (incendie):

- assistance dans les possibilités / moyens / capacités de fuite des usagers du tunnel,
- contrôle de la propagation des fumées par le contrôle des écoulements longitudinaux,
- démarrage garanti de la ventilation incendie avec priorité absolue

Le concept de commande doit être aussi simple que stable.

Le rôle du pilotage de la ventilation est présenté dans le Tableau C. ci-dessous.

Mode	Rôle du pilotage
Sanitaire	<ul style="list-style-type: none"> • assurance d'une qualité de l'air satisfaisante dans l'espace de circulation • faible consommation énergétique, fonctionnement stable, pas de commutations fréquentes
Incendie	<ul style="list-style-type: none"> • soutien des possibilités de fuite des usagers du tunnel, assistance / aide aux usagers du tunnel dans leurs possibilités de fuite • contrôle de la propagation des fumées, • faciliter l'intervention des forces anti-feu grâce aux programmes d'intervention

Tableau C.1 Rôle du pilotage de la ventilation

C.1.1. Hiérarchie

Le programme de fonctionnement peut être succinctement résumé dans la Figure C.. Les modes principaux de fonctionnement sont indiqués par des couleurs. Le détail de chaque mode sera défini ultérieurement.

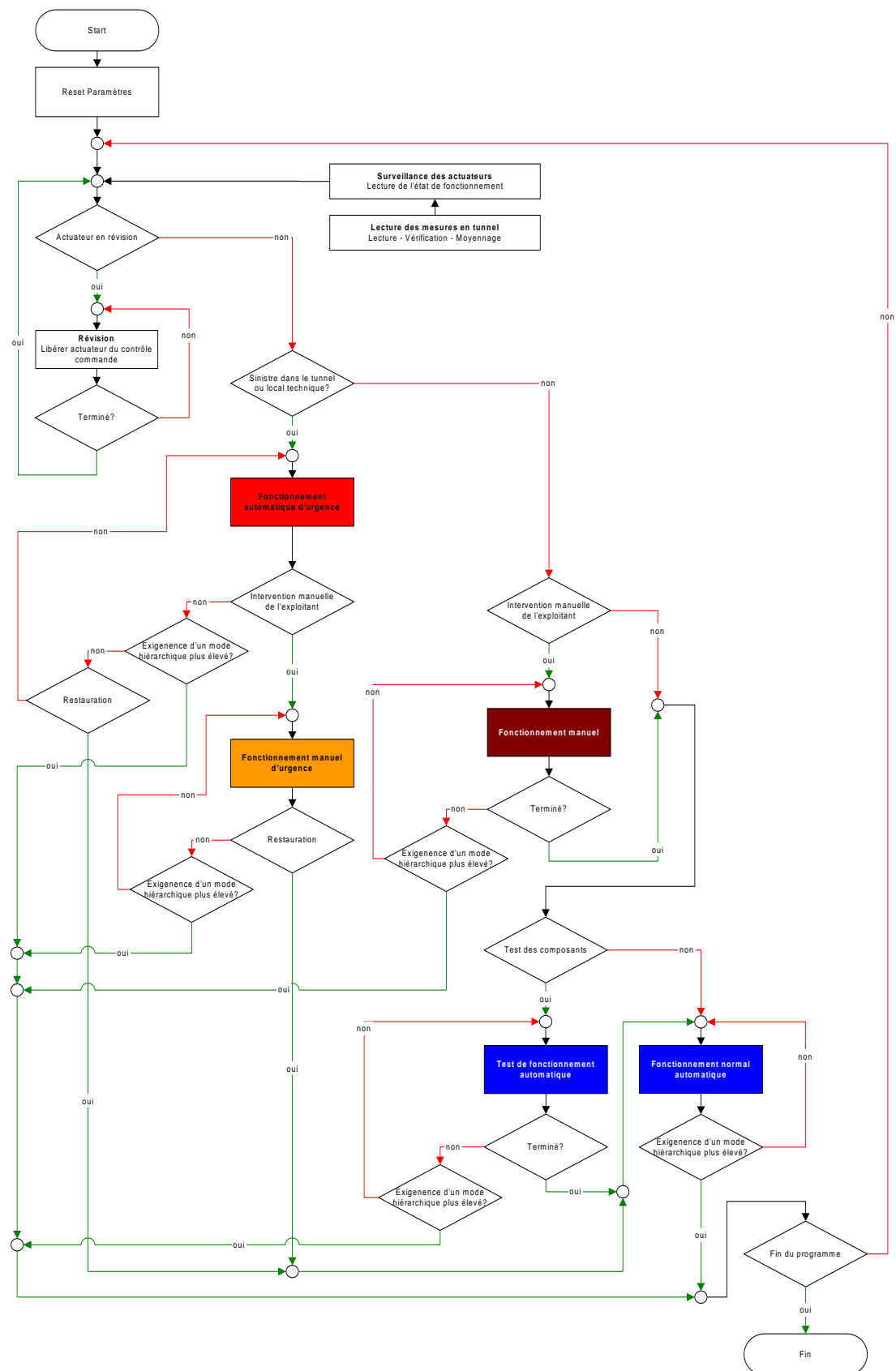


Figure C.1 Hiérarchie du software de la ventilation avec les modes principaux

C.1.2. Zones de ventilation

Vu qu'il s'agit d'un système de ventilation longitudinale, l'ouvrage n'est pas subdivisé en zones de ventilation.

C.2. Pilotage en mode sanitaire

Le fonctionnement des ventilateurs de jet permet la ventilation longitudinale du tunnel. Pour ce faire, un nombre déterminé d'accélérateurs est mis en route.

C.2.1. Choix de la direction de ventilation

La direction de ventilation retenue est celle des écoulements persistant au moment du dépassement de la limite de la qualité d'air.

C.2.2. Seuils de ventilation

Les valeurs principales de paramétrage (exemple) sont détaillées dans le Tableau C.2 ci-dessous.

Seuil Paramètre	Bas	Haut	Très haut	Alarme
Opacité [10^{-3} m^{-1}]	1.0	1.5	2	3
CO [ppm]	10.0	14.0	17	20
Vitesse d'air [m/s]	2.0	3.0	-	-

Tableau C.2 Valeurs de paramétrages principales

Si la limite d'un seuil (cf. Tableau C.2) est atteinte, un certain nombre de ventilateurs de jet se met en marche. Les conséquences suivantes dépendent des valeurs du seuil observé.

Il est possible, qu'après le temps t_{s1} le seuil soit encore dépassé. Si t_{s1} est supérieur à 5 minutes, le besoin en puissance requis n'est pas atteint. Des ventilateurs additionnels vont donc se mettre en route. Si la valeur mesurée est inférieure à la limite d'un seuil pendant 10 min, le besoin en puissance requis a diminué. On peut donc réduire le nombre des accélérateurs actifs (cf. Figure C.2). Une bande de tolérance permet de réduire le nombre de commutations et donc d'augmenter la durée de vie des équipements.

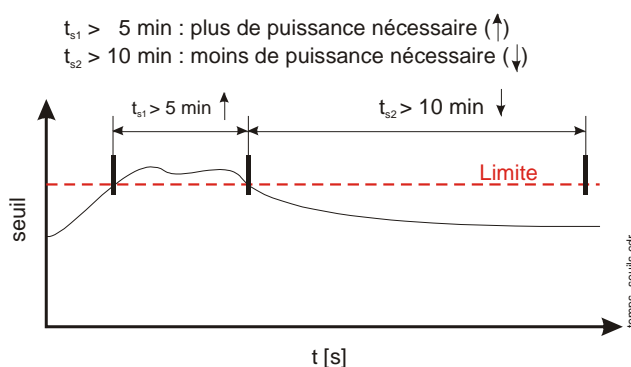


Figure C.2 Conséquences si un seuil est encore dépassé après t_{s1} et si un seuil est inférieur à la limite après t_{s2}

C.2.3. Brouillard

La présence de brouillard dans un tunnel augmente le risque d'accident. Le tunnel se trouve dans une région où il est susceptible d'y avoir du brouillard. En outre, l'humidité résultant du déplacement des véhicules, peut également s'accumuler dans le tunnel.

La génération de brouillard dans le tunnel même, par exemple par un flux d'air frais humide se refroidissant dans le tunnel, ne semble pas être une situation habituelle. Normalement, le brouillard que l'on trouve dans les tunnels vient de l'extérieur. La détection de brouillard peut être réalisée par un opacimètre correspondant.

En cas de brouillard, la ventilation devra servir à évacuer celui-ci par une tête.

C.2.4. Nuage de poussière

Dans certaines conditions, comme en hiver lorsque les routes ont été salées et sont sèches, les voitures soulèvent beaucoup de poussières qui peuvent s'accumuler dans le tunnel et former un bouchon de poussière.

Le bouchon ou nuage de poussière est généralement détecté par une mesure d'opacité élevée. Une stratégie identique à celle du brouillard doit être appliquée.

C.2.5. Sélection des VJ dans les cas standards / cas de maintenance

Dans le mode normal (exploitation ou maintenance), si des VJ doivent être enclenchés, les contraintes suivantes sont à respecter :

- l'arrêt effectif d'un ventilateur de jet n'est commandé que s'il a fonctionné au minimum pendant 15 min,
- la commande d'un ventilateur de jet doit tenir compte du temps cumulé de fonctionnement de chacun des VJ,
 - priorité au démarrage pour celui qui a le temps de marche le plus court,
 - priorité à l'arrêt pour celui qui a le temps de marche le plus long.

La commande d'un VJ n'est possible que si celui-ci est déclaré être « disponible » ; l'indisponibilité d'un VJ ne doit pas être bloquante pour l'application d'un scénario tant qu'il y a des accélérateurs disponibles.

Afin de satisfaire à ces critères, on tient à jour en permanence deux compteurs pour chaque ventilateur:

- un compteur pour le temps total de fonctionnement cumulé,
- un compteur pour le temps cumulé depuis la dernière révision, avec possibilité de remise à zéro.

C.3. Pilotage en mode urgence

C.3.1. Généralités

Le mode d'urgence est déclenché en deux cas :

1. Alarme pollution
2. Incendie

Les opérations se font toutes automatiquement.

C.3.2. Stratégie alarme pollution

En cas de très hautes valeurs de pollution et sans la présence d'un incendie, la philosophie est de ventiler à plein régime dans le tunnel et de fermer celui-ci à la circulation. Le mode normal doit éviter d'arriver à cette stratégie.

C.3.3. Stratégie d'incendie

Lors d'un incendie, la réaction très rapide du système de ventilation est d'une importance primordiale pour assurer une possibilité de fuite aux usagers du tunnel. En cas d'alarme incendie, le système de contrôle-commande mettra donc automatiquement en place les mesures suivantes (voir également [1]):

- fermeture de l'accès au tunnel par des feux rouges,
- alarme auprès des services d'intervention,
- mise en route du système de contrôle de la vitesse longitudinale à l'aide des ventilateurs de jet.

L'objectif principal est d'établir des vitesses d'air modérées dans tout le tunnel afin de pouvoir conserver aux mieux la stratification des fumées et en même temps de les expulser par une des têtes. L'inversion des écoulements est à éviter.

L'objectif mentionné est atteint à l'aide des ventilateurs de jet et la mesure des écoulements en permanence. Les ventilateurs sont contrôlés à l'aide d'un réglage PI ou supérieur.

C.3.4. Phase 1 – pré-alarme ou incendie mobile

Une phase de pré-alarme est mise en œuvre dès la détection d'un incendie par le détecteur thermique linéaire. Cette phase sert à la validation de l'incendie et se termine soit par une action de l'opérateur soit par l'expiration de la temporisation préprogrammé.

L'alarme dite incendie mobile est mise en œuvre lors de la détection d'une source de fumées mobile (incendie en déplacement), détecté par les capteurs de fumées. Cette phase est poursuivie soit par le retour en exploitation normale soit par une alarme d'incendie localisé.

Lors de cette phase, tout ventilateur de jet (étant éventuellement enclenché pour des raisons de la qualité d'air) est arrêté (cf. [2]).

C.3.5. Phase 2 – alarme ou incendie localisé

Dès qu'une alarme ou un signal d'incendie localisé est présent, le système de ventilation se met en marche pour contrôler les écoulements longitudinaux dans le tunnel avec le but de désenfumer le tunnel par un des portails. Pour ce faire, un courant d'air de 1 m/s est imposé par les ventilateurs de jet. Un système de régulation permet le contrôle du courant d'air indépendamment des conditions aux limites comme p.ex. la puissance d'incendie ou les conditions météorologiques.

C.3.5.1. Définition de la direction du courant d'air

Selon la position de l'incendie dans l'ouvrage, la stratégie à appliquer est différente. En effet, il faut distinguer deux cas:

1. Incendie à moins de 100 m d'un des portails: courant d'air de 1 m/s en direction du portail le plus proche.
2. Incendie à plus de 100 m d'un des portails: courant d'air de 1 m/s en direction des écoulements persistents au moment de la détection de l'incendie.

La Figure C.3 ci-dessous montre différents stratégies de ventilation en fonction de la position du sinistre et du courant d'air persistents au moment de la détection de l'incendie.

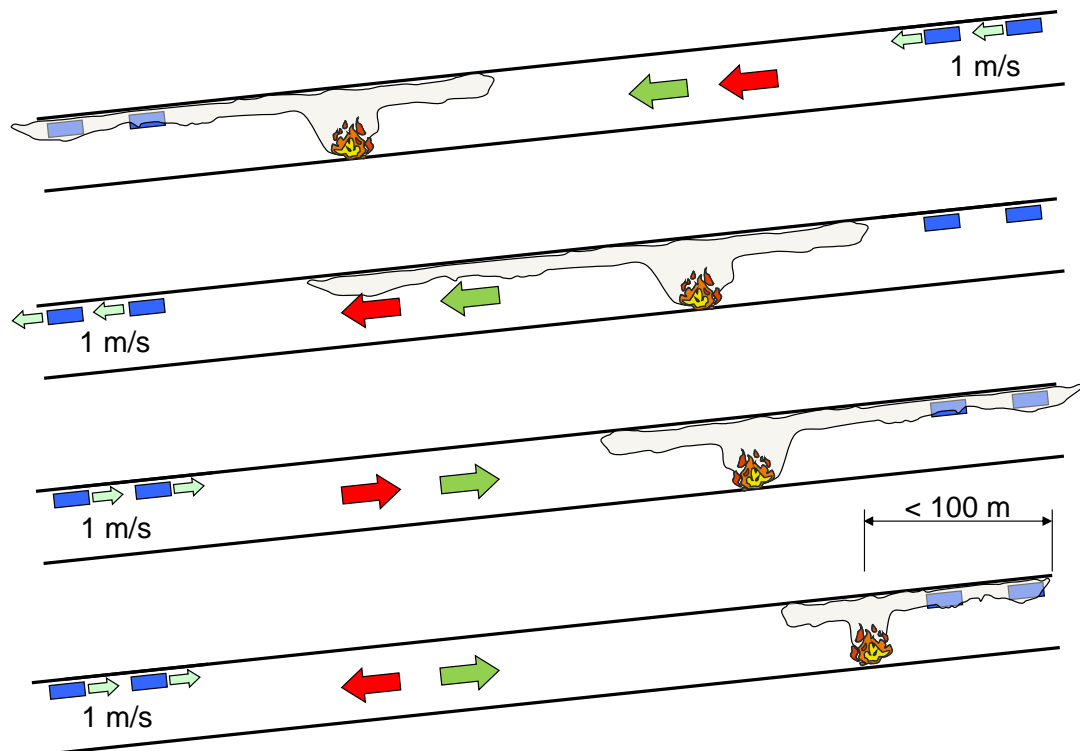


Figure C.3 Stratégies de ventilation en fonction de la position de l'incendie et du courant d'air persistant au moment de la détection de l'incendie (rouge); écoulements instaurés par la ventilation en vert.

C.3.6. Sélection des ventilateurs de jet en cas d'incendie

En cas d'incendie, les différentes contraintes à respecter sont :

- on ignore la disponibilité par rapport au nombre d'enclenchements par heure, à la durée de la marche minimale ainsi qu'au temps d'arrêt minimal,
- les ventilateurs de jet les plus éloignés du lieu de l'incendie sont les premiers à s'enclencher,
- si un VJ ne peut pas démarrer, il faut utiliser le ventilateur le plus proche,
- les groupes de VJ proches du lieu d'incendie ne doivent être enclenchés qu'en dernier recours. S'ils sont déjà en service lors de la détection de l'incendie, ils doivent être arrêtés,
- les surveillances des accélérateurs doivent être ignorées en cas d'incendie.

C.4. Régulation de la vitesse longitudinale

Pour régler la vitesse de l'air en situation normale, il faut utiliser la valeur spatiale de la vitesse de l'air.

En cas d'incendie, c'est le capteur le moins perturbé qui est utilisé. On a besoin en outre de la valeur d'un autre capteur de référence afin de permettre de faire un test de plausibilité.

En fonction du type de ventilateurs de jet (poussée unitaire), les ventilateurs sont équipés de variateurs de fréquence ou d'un certain nombre de vitesses. En fonction de la variante retenue, le nombre de ventilateurs de jet et leur régime est réglé en permanence par les algorithmes du contrôle-commande.

Annexe D Analyse du niveau de sécurité

D.1. Généralités

La gestion de risques devient de plus en plus usuelle et correspond, entre autre à la pratique actuelle au niveau de la confédération en ce qui concerne la génération de projets ainsi que de l'étude de projet, de la réalisation et de l'exploitation des tunnels routiers.

A l'aide du processus d'analyse de risques, différentes mesures de diminution de risque peuvent être comparées de manière transparente. Suivant l'efficacité des mesures ou combinaison des mesures, un paquet de mesures optimal pour diminuer le risque de l'ouvrage peut défini. Ce processus tient non seulement compte de l'efficacité d'une mesure mais aussi de son coût.

Au vu de l'enveloppe du projet, le projet de rénovation et de sécurisation du tunnel de la Clusette est idéal pour l'étude de variantes de ventilation. L'idée est de comparer l'efficacité des variantes étudiées, de sorte à optimiser les investissements tout en garantissant un niveau de sécurité adéquat.

Vu qu'il s'agit d'un projet de rénovation, il n'est pas envisageable d'influencer des certaines données de base de l'ouvrage telles que la déclivité, le niveau de trafic voire l'autorisation aux poids lourds. En conséquence, cette analyse ne porte que sur les aspects liés au système de ventilation et l'évacuation des usagers.

Dans la suite, l'expression "niveau de sécurité" se réfère toujours aux possibilités de fuite des usagers et à la notion sous-jacente d'intoxication globale des usagers par des fumées nocives. Il est supposé que l'accidentologie (risque d'accident, type d'accident) n'est pas affectée par le système de ventilation.

L'analyse se base sur un comportement théorique de fuite des usagers dont l'hypothèse principale est que les usagers profitent des issues de secours mises à leur disposition.

Cette analyse compare le niveau de sécurité de deux systèmes de ventilation fondamentalement différents (ventilation longitudinale et ventilation naturelle). Nous considérons que le système de ventilation longitudinale représente l'état de référence, étant donné qu'il répond aux exigences du cadre réglementaire. Afin de compenser l'éventuelle réduction du niveau de sécurité causé par un système de ventilation différent, le nombre d'issues de secours est varié.

Afin de couvrir les scénarios envisageables, l'influence des quatre paramètres suivants est analysée :

- position du sinistre,
- niveau et type de trafic,
- conditions ambiantes,
- type d'incendie.

Pour chaque configuration (système de ventilation, nombre / interdistance des issues de secours) et pour chaque combinaison des paramètres susmentionnés, une simulation aérothermodynamique couplée avec une simulation de fuite des usagers est effectuée. Cette simulation a pour but d'estimer le nombre de victimes parmi les usagers du tunnel.

Afin de comparer chaque simulation effectuée, nous définissons le *taux de victime* comme étant la division du nombre de victimes par le nombre total d'usagers dans l'enceinte du tunnel. La Figure D.1 ci-dessous montre un exemple de taux de victimes en fonction de la position du sinistre dans le tunnel, pour deux différentes puissances thermiques d'incendie. Cet exemple illustratif montre un nombre maximal de victimes lorsque l'incendie a lieu au milieu de l'ouvrage. Cela s'explique par le fait qu'une issue de secours est moins utilisable si un incendie se situe proche de celle-ci. De plus, l'exemple permet d'identifier l'effet d'une puissance thermique plus élevée.

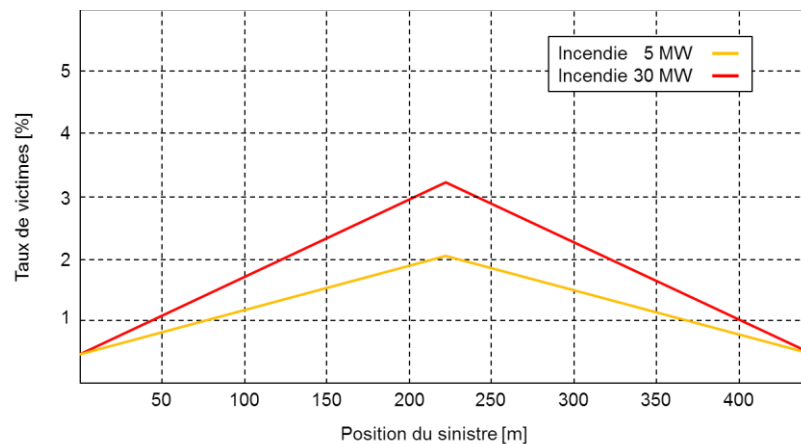


Figure D.1 Exemple d'évolution du taux de victimes en fonction de la position de l'incendie, pour deux types d'incendie différents.

D.2. Modélisation

Le logiciel utilisé modélise la propagation des fumées et des polluants et calcul aussi bien le profil de température le long de l'ouvrage que l'écoulement de l'air en tunnel (voir § D.2.1). De plus, pour chaque instant, la position de chaque personne est déterminée en fonction de paramètres influençant la fuite des usagers (voir § D.2.2).

D.2.1. Calcul aérothermodynamique

La propagation spatio-temporelle des fumées et des polluants est calculée en utilisant la modélisation SPRINT. Ce modèle est capable de simuler les écoulements en tunnel.

Le logiciel SPRINT [10], conçu pour le calcul monodimensionnel de la ventilation en tunnel, permet de calculer l'évolution spatio-temporelle des écoulements dans un ouvrage souterrain en tenant compte notamment de l'effet cheminée et de la propagation des fumées sous la voûte, gouvernée par les différences de densité.

La conception du logiciel permet de modéliser l'ensemble des équipements de ventilation envisageables (extraction répartie, extraction ciblée, insufflation répartie, insufflation locale, ventilateurs de jet, injecteurs et capteurs d'opacité et de monoxyde de carbone).

Les modules de détection et de contrôle-commande permettent d'analyser la performance du système de ventilation selon les différentes configurations envisageables (p.ex. analyse du gain en terme de contrôlabilité du courant d'air apporté par des ventilateurs de jet avec variateurs de vitesse par rapport à des ventilateurs de jet à deux vitesses, voire à une seule vitesse).

L'efficacité élevée du logiciel permet de plus de réaliser des études paramétriques et des analyses de sensibilité, afin d'évaluer par exemple l'évolution de la stratification en fonction de la position d'incendie et de la différence de pression naturelle entre les têtes de l'ouvrage.

L'évaluation tient compte des aspects suivants :

- Géométrie (longueur, déclivité, section)
- Nombre et position des issues de secours
- Système de ventilation (longitudinal, naturelle)
- Trafic (nombre de véhicules par direction, nombre de PL)
- Conditions météorologiques (différence de pression entre les portails)
- Position et type d'incendie (puissance thermique)

D.2.2. Calcul de la fuite des usagers

L'évaluation des conditions de fuite nécessite, pour chacun des usagers d'un tunnel routier, l'analyse spatio-temporelle des paramètres gouvernant la fuite :

- la qualité d'air (concentration en CO et NO),
- la température locale,
- la visibilité.

Le logiciel ODEM [11] permet de simuler le comportement des usagers sous l'effet d'un sinistre (qualité d'air, température, visibilité) dans un tunnel incendié, en considérant les champs de CO, de température et de visibilité provenant de la modélisation du scénario d'incendie.

En fonction du trafic (vitesse et niveau de trafic, taux de poids lourds) le nombre d'usagers et les trajectoires de fuite sont calculés. Le logiciel ODEM permet par exemple d'optimiser le choix et la performance d'un système de ventilation considérant les risques aux usagers de manière quantitative ou d'optimiser le nombre et la position des issues de secours. L'interface automatisée avec SPRINT résulte en un logiciel complet pour l'évaluation de la ventilation et de la sécurité d'un tunnel routier en cas d'incendie.

D.3 Scénarios analysés

Les scénarios analysés sont choisis de manière représentative à l'ouvrage étudié. En total, 67'320 scénarios différents ont été simulés dans le cadre de cette étude. Le nombre de scénarios se calcule par la combinaison des paramètres suivants :

- 5 conditions météorologiques
- 4 scénarios de trafic
- 3 types d'incendie
- 102 différents positions du foyer
- 5 différents nombres d'issues de secours
- 4 systèmes de ventilation

D.3.1. Différence de pression météorologique

La différence de pression météorologique entre les portails correspond à une force présente en permanence et jouant sur les conditions initiales d'écoulement avant le départ du sinistre d'une part et sur la propagation des écoulements après la déclaration du sinistre d'autre part.

La différence de pression météorologique entre les portails est variée de 10 Pa à -10 Pa dans le sens Neuchâtel-France. Au total, 5 différentes contrepressions sont analysées.

D.3.2. Trafic

Le niveau de trafic et sa vitesse gouvernent l'effet de piston, et donc les écoulements dans l'ouvrage lors de la déclaration du sinistre. Ainsi, le nombre de véhicules dans l'ouvrage influence les pertes de charge dues au frottement dans le tunnel. Le niveau de trafic détermine également le nombre d'usagers ainsi que leur répartition dans l'ouvrage.

Quatre différents scénarios de trafic sont analysés. Ceux-ci correspondent à l'heure point du matin, de midi, de l'heure pointe du soir et de nuit. Ils sont résumés dans le Tableau D.1 ci-dessous.

Scénario	Trafic sens 1 (Neuchâtel) [uvt/h]	Trafic sens 2 (France) [uvt/h]	Vitesse de circulation [km/h]
Heure pointe matin	417	231	80 / 80
Midi	232	241	80 / 80
Heure pointe soir	345	492	80 / 80
Nuit	100	101	80 / 80

Tableau D.1 Scénarios de trafic analysés

L'évaluation du trafic se base sur le poste de comptage « 00104600 » sur l'axe « NE:J10 » de l'année 2007 [7]. La prévision du trafic a été effectuée pour l'année 2030 en supposant une croissance annuelle de 1.5% pour le trafic en dehors poids lourds (sans croissance).

D.3.3. Incendies

L'incendie représente un danger pour les usagers dû à l'émission de chaleur, de gaz toxiques et de fumées. Dans cette étude, trois différents incendies sont considérés :

- Un incendie de puissance faible (incendie d'une voiture de tourisme : 5 MW),
- Un incendie de dimensionnement de la ventilation de 30 MW (PL sans charge particulière) et
- Un incendie de PL à forte charge combustible (100 MW).

D.3.4. Positions du sinistre

Pour considérer toutes les positions d'incendie envisageables avec une résolution adéquate pour les différentes interdistances des chemins de fuite, la position est variée par incréments de 10 m pour les différents scénarios. Au total, 102 positions d'incendie différentes sont donc considérées le long de l'ouvrage.

D.3.5. Interdistance des chemins de fuite

Pour évaluer l'impact du nombre d'issues de secours sur le niveau de sécurité de l'ouvrage, plusieurs interdistances entre les issues de secours ont été évaluées :

- 1025 m (0 issues de secours)
- 171 m (5 issues de secours, nombre minimal selon SIA 197/2)
- 114 m (8 issues de secours)
- 93 m (10 issues de secours)
- 64 m (15 issues de secours)

Dans l'évaluation du nombre d'issues, les portails ne sont pas considérés. La variante avec 0 issues de secours est uniquement étudié pour le système de ventilation actuel.

D.3.6. Systèmes de ventilation

Les trois systèmes de ventilation étudiés sont :

- Système de ventilation actuel
- Système de ventilation naturel
- Système de ventilation mécanique

Le système de ventilation actuel est modélisé en conformité avec l'état actuel du système (cf. § 4.2.1) en supposant un temps de détection de 180 s. Il est considéré que le système d'extraction et d'insufflation est à son régime nominal au sein de 60 s suite à l'alarme incendie.

Au sein des solutions avec ventilation naturelle, une distinction se fait par rapport au temps de détection du sinistre. Différents temps de détection (rapide : 90s, normal : 180 s, lente : 500 s) sont analysés pour la situation sans issues de secours complémentaires (situation sans galerie de sécurité).

Pour l'état futur de la ventilation mécanique, il est supposé que l'incendie est détecté en 60 s et que le système de ventilation est fonctionnel 30 s après la détection du sinistre.

D.4. Résultats

D.4.1. Propagation des fumées

Le comportement de la propagation de fumée est différent entre les systèmes de ventilation. Cette différence est présentée dans les figures suivantes pour un feu au milieu du tunnel et pour un régime de trafic d'heure pointe du matin.

La Figure D.2 ci-dessous montre l'évolution du front de fumée pour un scénario avec une ventilation longitudinale en fonction du temps. L'écoulement persistant au moment de la déclaration de l'incendie est en direction du portail « Neuchâtel ». La zone en rouge correspond à la partie enfumée du tunnel. Le schéma esquisse le front de fumée 500 s après la déclaration du feu.

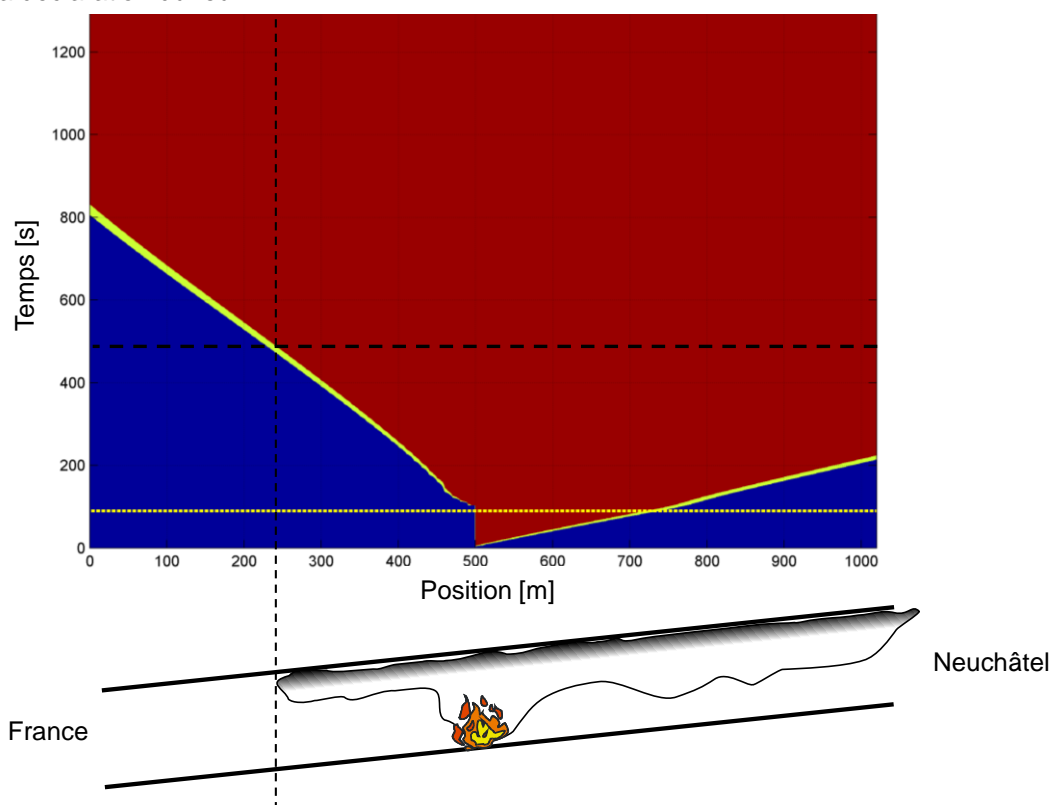


Figure D.2 Propagation des fumées pour un incendie de 30 MW situé au milieu de l'ouvrage ; ventilation longitudinale

Au moment du démarrage de la ventilation, 90 s après la déclaration du feu (trait jaune) une zone d'environ 300 m de long entre le foyer et le portail « Neuchâtel » est enfumée dû à l'écoulement persistant au moment de l'incendie et à l'effet cheminée.

Pour rappel, dans le cas d'un trafic bidirectionnel, la ventilation mécanique a pour but d'assurer une vitesse d'écoulement de 1 m/s pour conserver la stratification des fumées sans inversion de l'écoulement. Dans le cas du scénario présenté, la ventilation mécanique freine l'écoulement au sein du tunnel, engendrant ainsi une propagation des fumées en direction du portail « France » (back-layering). La vitesse de propagation des fumées en direction du portail « Neuchâtel » n'est que peu impactée par la ventilation mécanique. Après environ 250 s, le front de fumée atteint le portail « Neuchâtel » et après 800 s le tunnel est complètement enfumé.

La Figure D.3 ci-dessous montre l'évolution du front de fumée pour un scénario avec une ventilation naturelle en fonction du temps. L'écoulement persistant au moment de la déclaration de l'incendie est en direction du portail « Neuchâtel ». La zone en rouge correspond à la partie enfumée du tunnel. Le schéma esquisse le front de fumée à partir de 200 s après la déclaration du feu.

La propagation des fumées entre les scénarios est identique jusqu'à l'enclenchement de la ventilation mécanique. Il est à noter que la propagation du front de fumée en direction du portail « Neuchâtel » est légèrement plus rapide que dans le scénario avec une ventilation longitudinale et qu'aucun retour de fumée n'est visible.

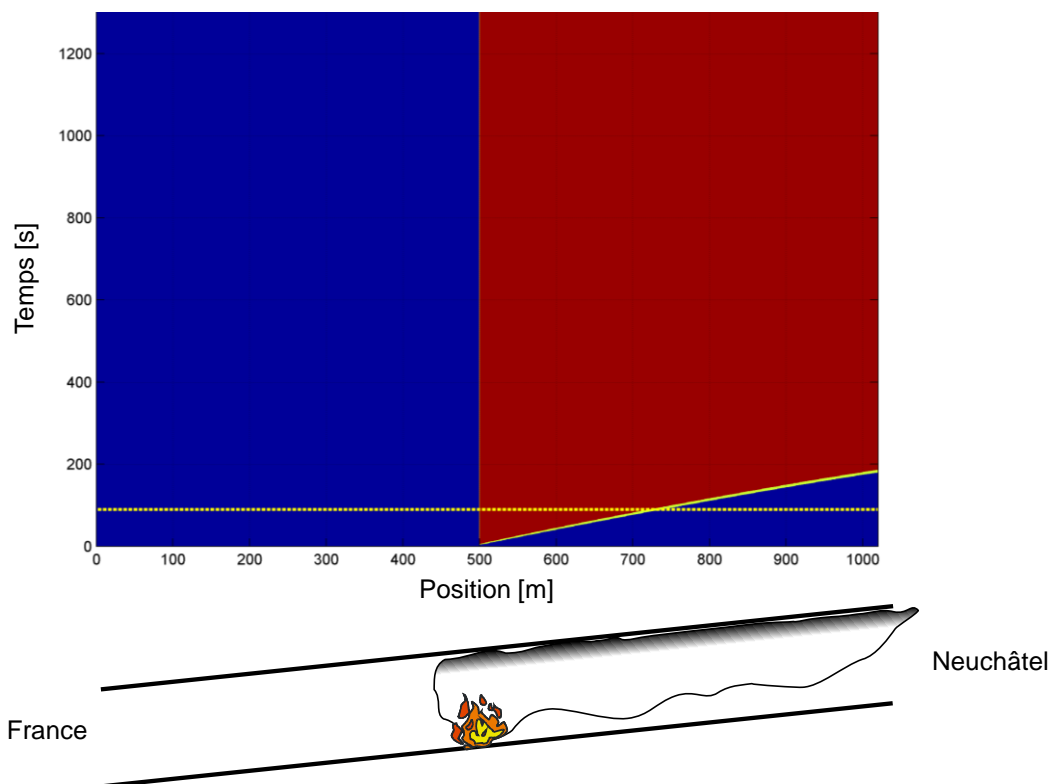


Figure D.3 Propagation des fumées pour un incendie de 30 MW situé au milieu de l'ouvrage; ventilation naturelle

En première conclusion on peut estimer que, pour un écoulement persistant en direction du portail « Neuchâtel » au moment de la déclaration de l'incendie :

- La ventilation naturelle assure de meilleures conditions de fuite aux usagers entre le foyer et le portail « France »,

- Les ventilations naturelle et mécanique assurent des conditions de fuite similaires entre le foyer et le portail « Neuchâtel ». Néanmoins, la ventilation mécanique tend à conserver la stratification de fumée sur les 300 premiers mètres à partir du foyer, diminuant ainsi l'exposition des usagers aux fumées nocives.

La Figure D.4 ci-dessous montre l'évolution du front de fumée pour un scénario avec une ventilation mécanique et une ventilation naturelle en fonction du temps. L'écoulement persistant au moment de la déclaration de l'incendie est en direction du portail « France ». La zone en rouge correspond à la partie enfumée du tunnel.

Dans ce scénario et pour une ventilation mécanique, le front de fumée se propage entièrement dans le tunnel. La ventilation mécanique permet de ralentir le front de fumée se propageant en direction du portail "Neuchâtel", améliorant ainsi les conditions de fuites aux usagers.

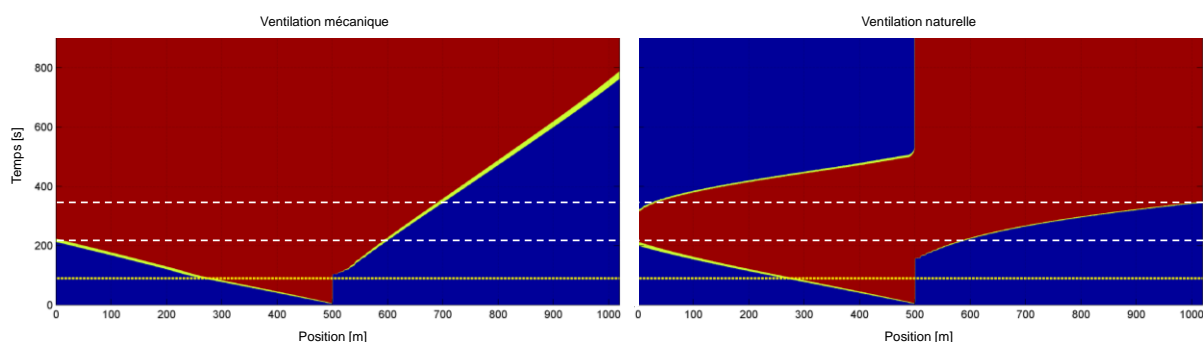


Figure D.4 Comparaison de la zone enfumée pour une ventilation mécanique (à gauche) et une ventilation naturelle (à droite) pour un cas avec écoulements initiaux en direction de la France.

La direction de l'écoulement persistant au moment de la détection de l'incendie est fortement dépendante du taux de trafic, des conditions météorologiques et de lieu de l'incendie, mais aussi du temps de détection de l'incendie. En effet, suivant l'importance de l'incendie et le temps de détection, l'effet cheminée peut inverser l'écoulement persistant au moment de la déclaration de l'incendie, car il force un écoulement en direction du portail « Neuchâtel ». Ainsi, la probabilité d'un écoulement persistant au moment de la détection d'incendie en direction « France » n'est pas identique à celle en direction « Neuchâtel ».

Néanmoins, dans la suite de l'analyse, la fréquence d'occurrences des différents cas de figure n'est pas considérée.

D.4.2. Comparaison des variantes

La comparaison des variantes se fait à deux niveaux différents

- Situation finale, après la réalisation de la galerie de sécurité
- Situation avant réalisation de la galerie de sécurité

D.4.2.1. Variantes en présence de la galerie de sécurité

Les résultats suivants présentent, pour chaque type de ventilation et interdistance entre issues de secours, le niveau cumulé d'intoxication subie par chaque usager (cf. Figure D.5). Nous estimons que le niveau cumulé d'intoxication est représentatif du niveau de risque des usagers.

Le niveau cumulé d'intoxication pour une ventilation naturelle est, quelle que soit l'interdistance entre issues de secours, bien inférieur à celui pour une ventilation mécanique. Cela corrobore les observations faites dans le § D.4.1. Nous remarquons, de

même, que le niveau cumulé d'intoxication est dégressif en fonction du nombre d'issues de secours.

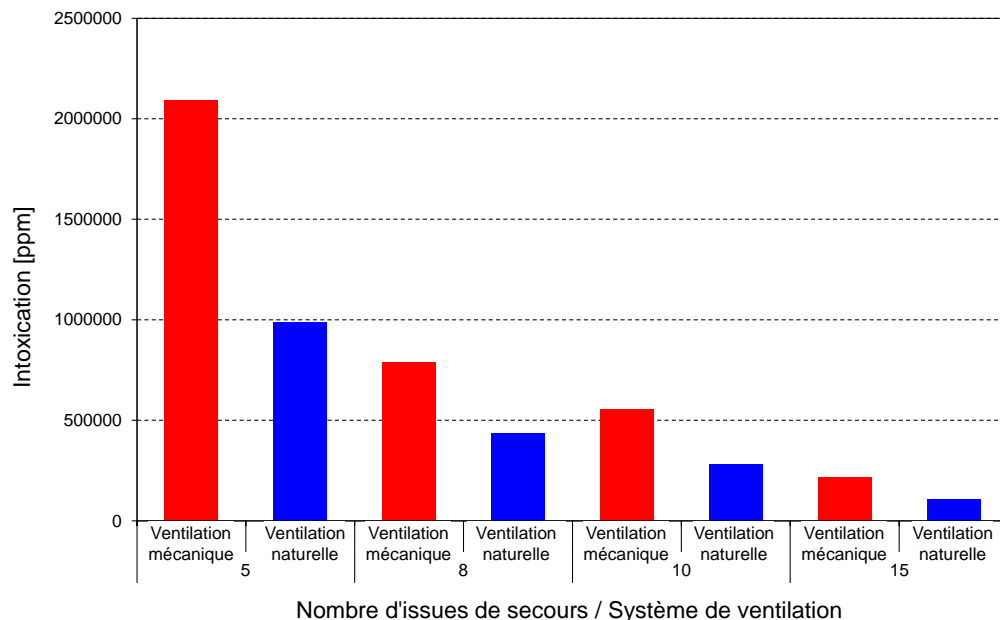


Figure D.5 Niveau cumulé d'intoxication en fonction du nombre d'issues de secours et en fonction du système de ventilation.

De sorte à mieux comprendre l'influence de la position des ventilateurs de jet et des issues de secours, nous présentons dans les figures Figure D.7 et Figure D.6 le niveau cumulé d'intoxication en fonction du type de ventilation, du nombre d'issues de secours et de la position du feu. La Figure D.7 présente les résultats pour une ventilation naturelle et la Figure D.6 pour une ventilation mécanique.

En cas d'une ventilation naturelle, le niveau cumulé d'intoxication est, en règle générale, plus faible que celui correspondant à la solution avec ventilation mécanique. Des pics apparaissent lorsque le foyer est proche d'une issue de secours. Leurs niveaux cumulés d'intoxication sont plus élevés que ceux d'une ventilation longitudinale qu'en cas d'un nombre restreint d'issues de secours (5 issues de secours).

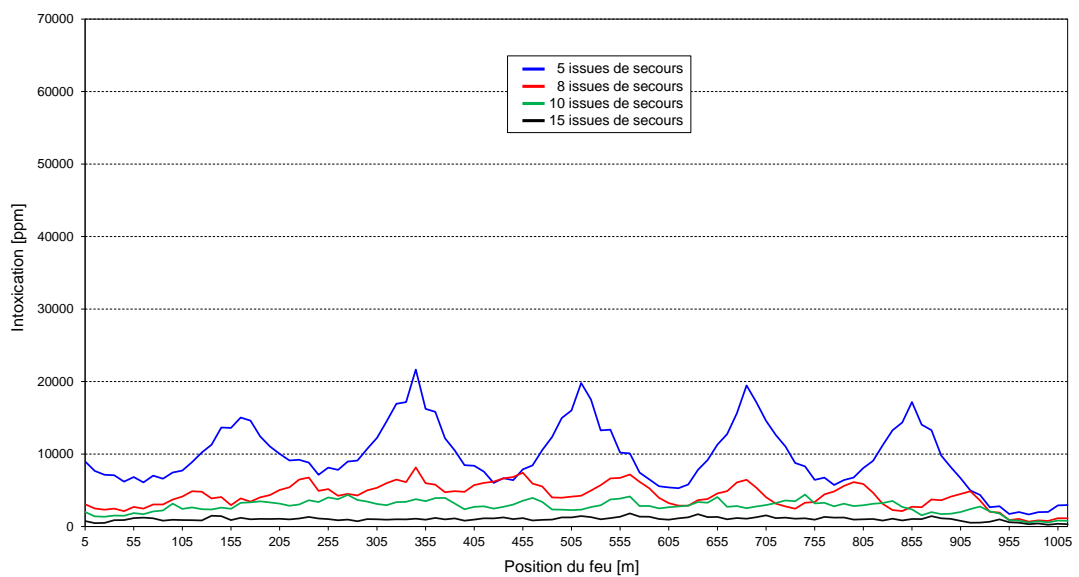


Figure D.6 Ventilation naturelle : Niveau cumulé d'intoxication totale en fonction de la position du foyer et du nombre d'issues de secours.

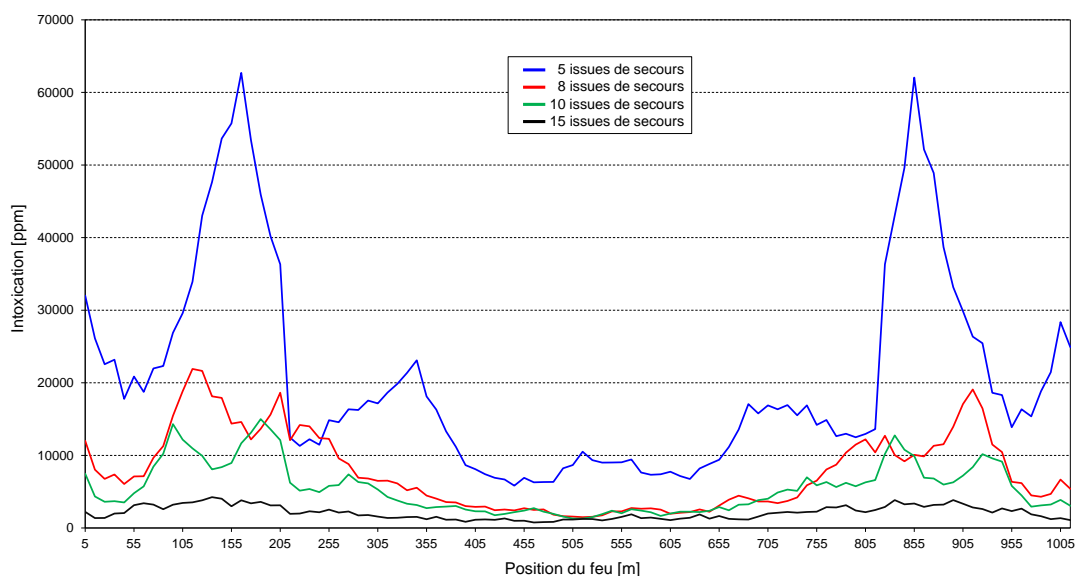


Figure D.7 Ventilation mécanique : Niveau cumulé d'intoxication totale en fonction de la position du foyer et du nombre d'issues de secours.

Pour une ventilation mécanique, nous observons de même des pics d'intoxication au niveau des positions des issues de secours, mais aussi à proximité des ventilateurs de jet. Ces derniers pics sont dus à la déstratification des fumées par les ventilateurs de jet.

Ce phénomène peut être fortement diminué avec une stratégie de ventilation appropriée telle que l'inhibition des ventilateurs de jet à proximité ou dans le front de fumée et à l'utilisation prioritaire des ventilateurs de jet situés au plus loin du lieu de l'incendie. Néanmoins, ce type de stratégie augmente sensiblement le nombre de ventilateurs de jet à installer par rapport à celui requis pour être conforme aux exigences en vigueur.

Néanmoins, le nombre d'issues de secours diminue les pics liés à la déstratification des fumées. Cette diminution due au nombre d'issues de secours est aussi observée pour une ventilation naturelle.

D.4.2.2. Variantes sans galerie de sécurité

Sur la base des résultats obtenus par cette analyse, il se pose la question si, déjà pour la situation actuelle, une ventilation naturelle est préférable à la ventilation mécanique actuelle.

Etant donné que les installations de ventilation actuelles sont à la fin de leur durée de vie et que, d'autre part la construction de la galerie de sécurité représente une opération de longue durée et d'enveloppe financière importante, une situation intermédiaire avec ventilation naturelle mais sans galerie de sécurité pourrait être intéressante. Comme la dépose de la dalle intermédiaire nécessite un nombre d'interventions très important au niveau installations EES (dépose équipements actuels, rééquipement du tunnel suite aux travaux), un vrai bénéfice doit se présenter quant à cette solution.

La Figure D.8 ci-dessous montre, à travers l'intoxication cumulée des usagers, le niveau de sécurité des différentes variantes analysées. Par rapport au niveau d'équipement du tunnel en configuration sans ventilation mécanique, un niveau normal, un niveau élevé (état final) et un niveau réduit sont analysés. Ces niveaux figurent dans le temps de détection du feu (état final : capteurs de fumée et détection linéaire de chaleur, état normal : détection linéaire de chaleur, état réduit : sans détection). En cas d'une ventilation naturelle en combinaison avec niveau d'équipement normal, le niveau de sécurité est comparable avec l'état actuel de l'ouvrage. C'est uniquement par l'ajout de capteurs de fumée que le niveau de sécurité peut être amélioré mais cette amélioration est relative. L'intégration de capteurs de fumée aura le même effet pour le système de ventilation actuelle.

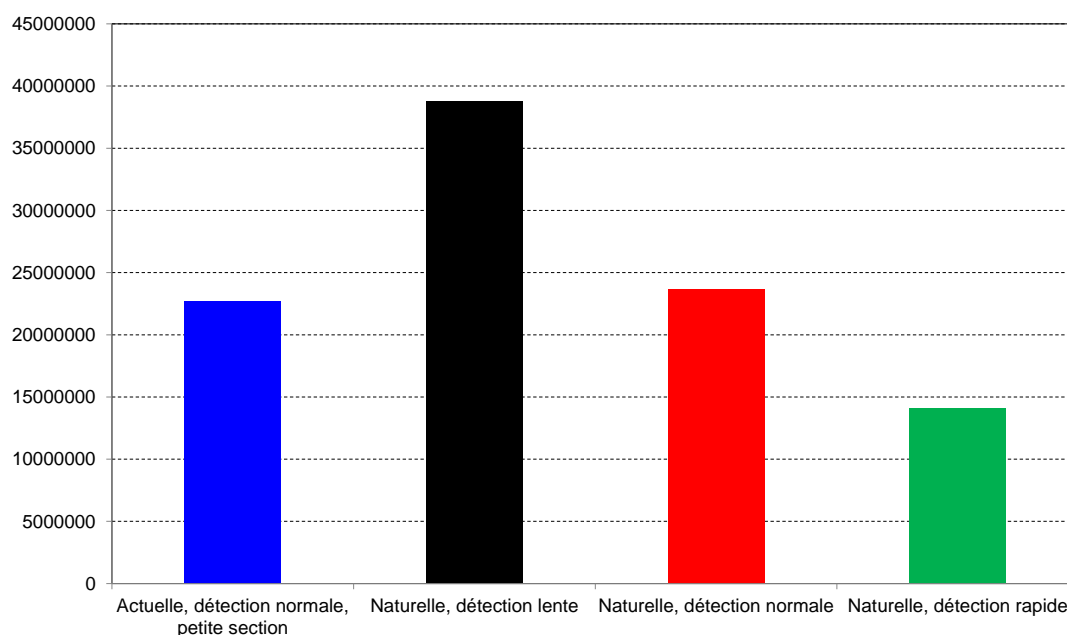


Figure D.8 Niveau cumulé d'intoxication totale en fonction du système de ventilation et du niveau d'équipement (en cas de ventilation naturelle).

En général, il peut donc être conclu qu'en termes du niveau de sécurité, une situation intermédiaire avec ventilation naturelle mais sans galerie de sécurité n'est pas intéressante.

D.5. Conclusion

Suite à cette étude, nous pouvons affirmer qu'une ventilation naturelle diminue l'intoxication globale des usagers due aux fumées nocives par rapport à ventilation mécanique répondant aux normes en vigueur. Cette affirmation est indépendante du nombre d'issues de secours.

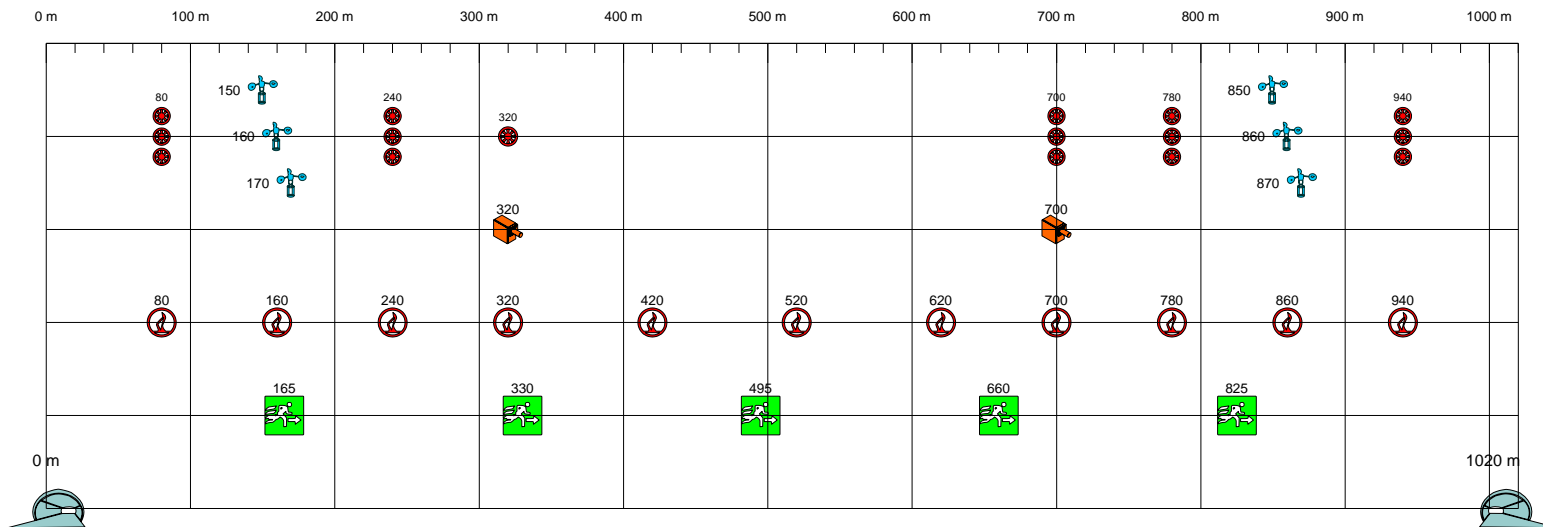
Si une ventilation naturelle de l'ouvrage est choisie, nous proposons de réduire l'interdistance des issues de secours à 115 m. Cette mesure permet de diminuer de 50 % le niveau d'intoxication des usagers en cas d'incendie et les coûts liés à cette mesure restent restreints par rapport à une solution avec une ventilation mécanique.

En termes du niveau de sécurité, une situation intermédiaire avec ventilation naturelle mais sans galerie de sécurité n'est pas intéressante et il n'est donc pas recommandé de procéder à la dépose de la ventilation le plus vite que possible sans de construire la galerie de sécurité.



Annexe E Synoptique des équipements

E.1. Variante 1

H10 - Tunnel de la Clusette

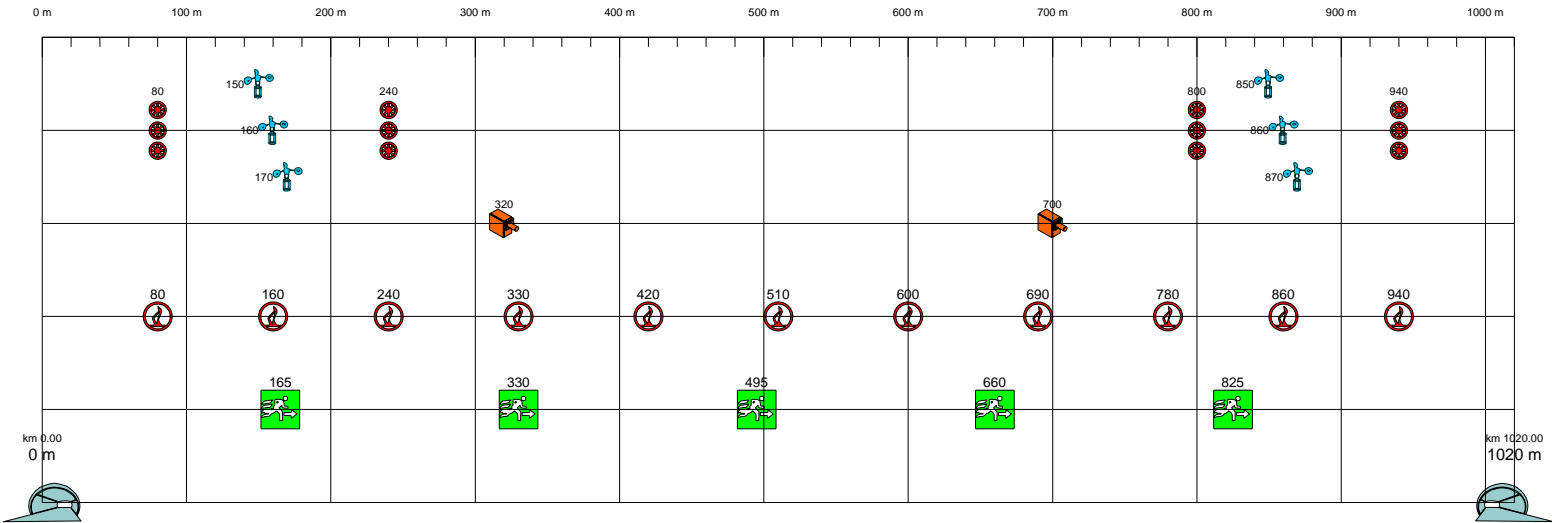


	Ventilateur de Jet
	Opacimètre
	Anémomètre
	Capteur de fumée
	Issue de secours

HBI Haerter SA Ingénieurs Conseils					H10 - Tunnel de la Clusette Equipements d'exploitation et de sécurité		
Projeté	Dessiné	Vérifié	Approuvé	Format	Date	Fichier	N° de plan
SFR	SFR	-	-	A3	15.03.2012		08-100 Synoptique-CI
Indice	Changement				Date	Dessiné	Vérifié
1							
2							
3							
4							
		Stockerstrasse 12 CH-8002 Zürich Tel. +41 (0)44 289 39 00 Fax +41 (0)44 289 39 99 info.zh@hbi.ch		Thunstrasse 32 CH-3000 Bern 6 Tel. +41 (0)31 357 24 24 Fax +41 (0)31 357 24 25 info.be@hbi.ch	Friedrich-Ebert-Strasse 25 D-89518 Heidenheim Tel. +49 (0)7321 98 23 10 Fax +49 (0)7321 98 23 29 info.hdh@hbi.ch		
							

E.2. Variante 2

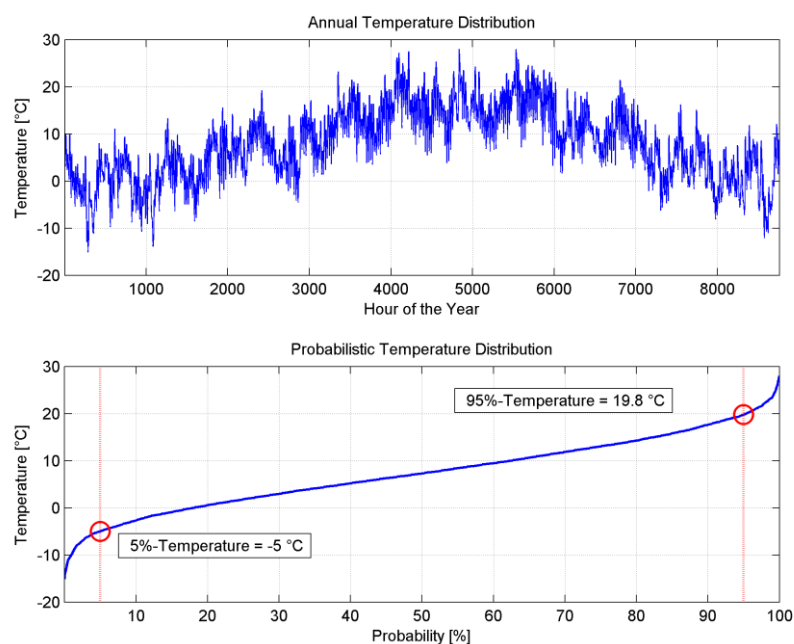
H10 - Tunnel de la Clusette



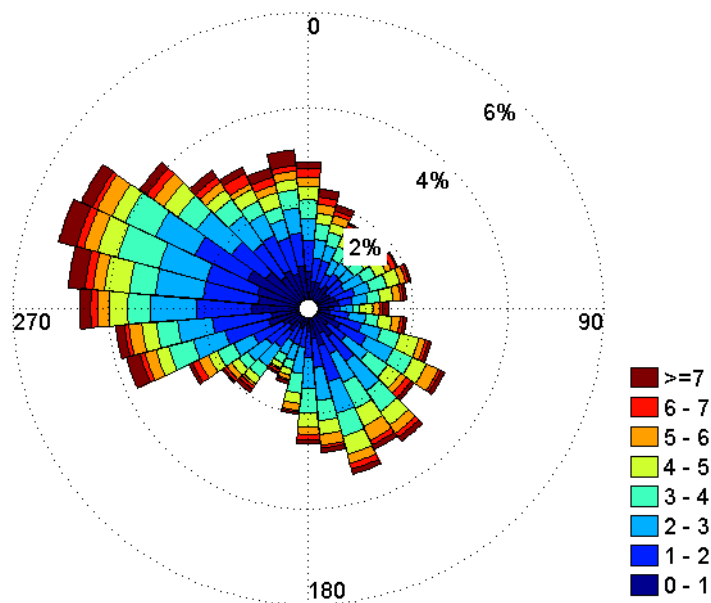
- Ventilateur de Jet
- Opacimètre
- Anémomètre
- Capteur de fumée
- Issue de secours

HBI HBI Haerter SA Ingénieurs Conseils					H10 - Tunnel de la Clusette		
Equipements d'exploitation et de sécurité							
Projeté	Dessiné	Vérifié	Approuvé	Format	Date	Fichier	N° de plan
SFR	SFR	-	-	A3	15.03.2012		08-100 Synoptique équipements
Indice	Changement				Date	Dessiné	Vérifié
1							
2							
3							
4							
		Stockerstrasse 12 CH-8002 Zürich Tel. +41 (0)44 289 39 00 Fax +41 (0)44 289 39 99 info.zh@hbi.ch		Thunstrasse 32 CH-3000 Bern 6 Tel. +41 (0)31 357 24 24 Fax +41 (0)31 357 24 25 info.be@hbi.ch	Friedrich-Ebert-Strasse 25 D-89518 Heidenheim Tel. +49 (0)7321 98 23 10 Fax +49 (0)7321 98 23 29 info.hdt@hbi.ch		

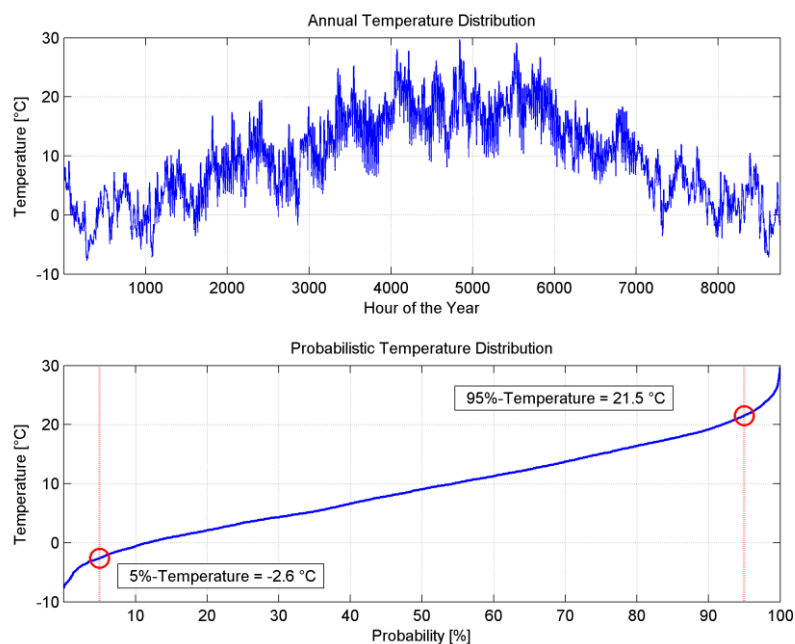
Annexe F Données météorologiques



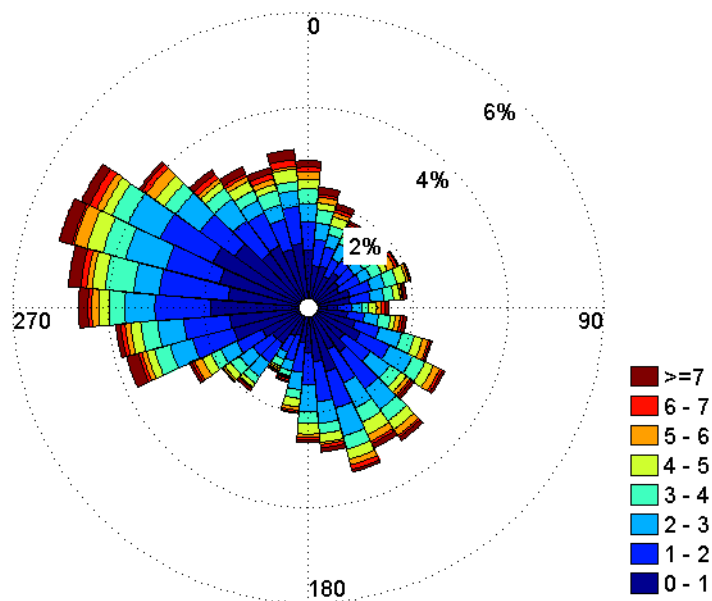
Statistique des températures, station météorologique Brot-Dessous, [8]



Rose des vents, station météorologique Brot-Dessous, [8]



Statistique des températures, station météorologique Noiraigues, [8]



Rose des vents, station météorologique Noiraigues, [8]