

Analyse des dangers et de la valeur, Méthodologie utilisée pour la réhabilitation d'un tunnel autoroutier

Alexandre Debs, ing., M. Sc. A., MB

 Transports
Québec 

René Donais, ing., CVS

 Raymond Chabot
Grant Thornton

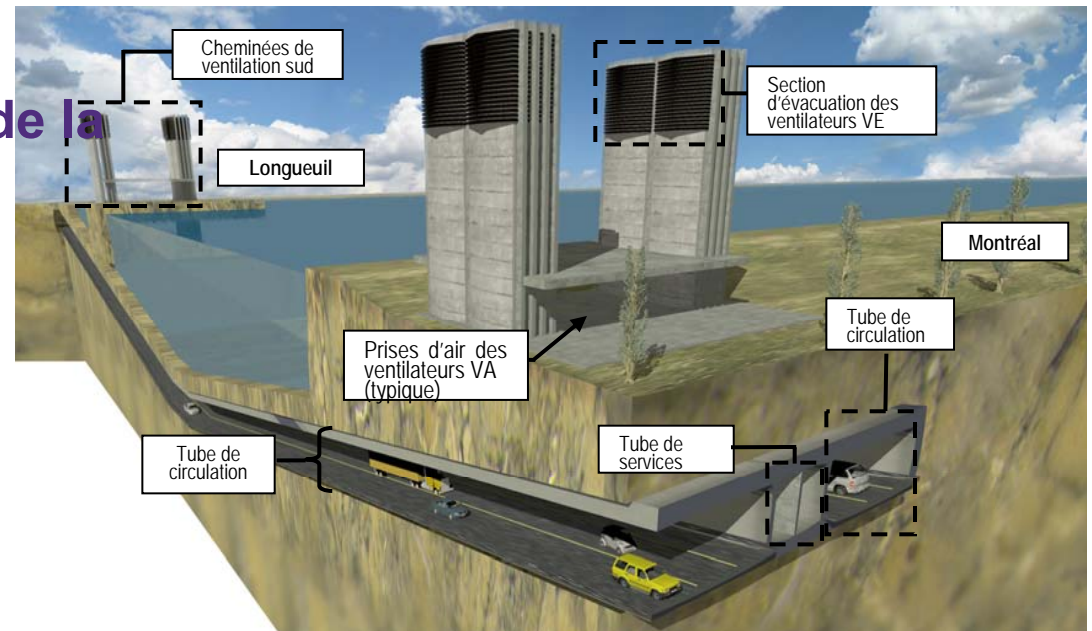
23 et 24 novembre 2009



Plan de présentation

2

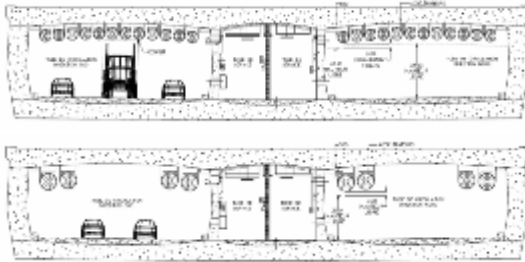
1. Résumé du PC-2
2. But du mandat d'analyse de la valeur
3. Contraintes d'aujourd'hui
4. Analyse de la valeur et analyse des dangers
5. Déroulement de l'atelier
6. Conclusion et leçons apprises
7. Résultats et recommandations



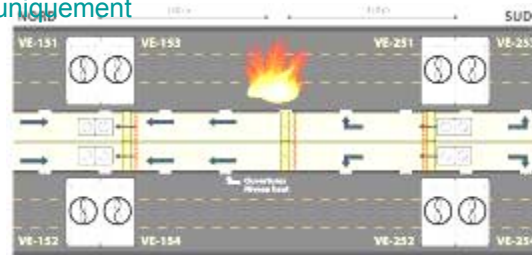
1. Résumé du PC-2

Options de ventilation étudiées

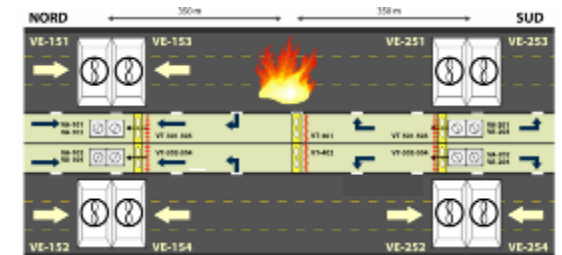
Option n° 1
Longitudinale avec accélérateurs



Option n° 2
Semi-transversale avec ventilateurs VA uniquement



Option n° 3
Semi-transversale avec ventilateurs VA et VE



Option n° 4
Semi-transversale avec séparations horizontales et 4 compartiments supérieurs



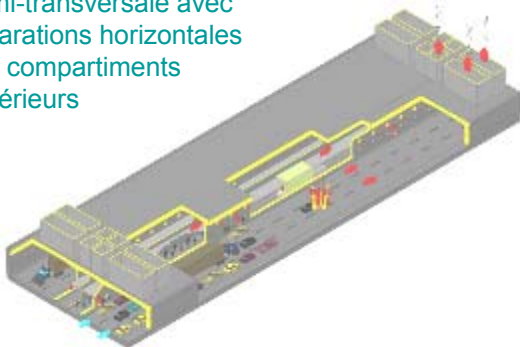
Option n° 5
Semi-transversale avec séparations horizontales et multiples compartiments



Option n° 6
Semi-transversale avec quelques ouvertures murales obturées



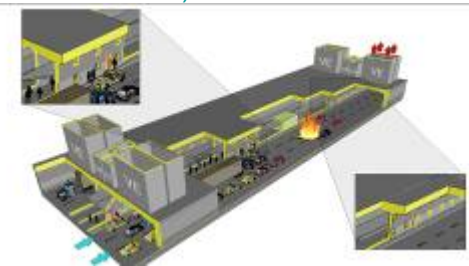
Option n° 7
Semi-transversale avec séparations horizontales et 2 compartiments supérieurs



Option n° 8
Longitudinale (transitoire) avec ventilateurs VE à l'entrée et à la sortie



Option n° 9
Longitudinale avec ventilateurs VE à la sortie (extraction massive)



1. Résumé du PC-2

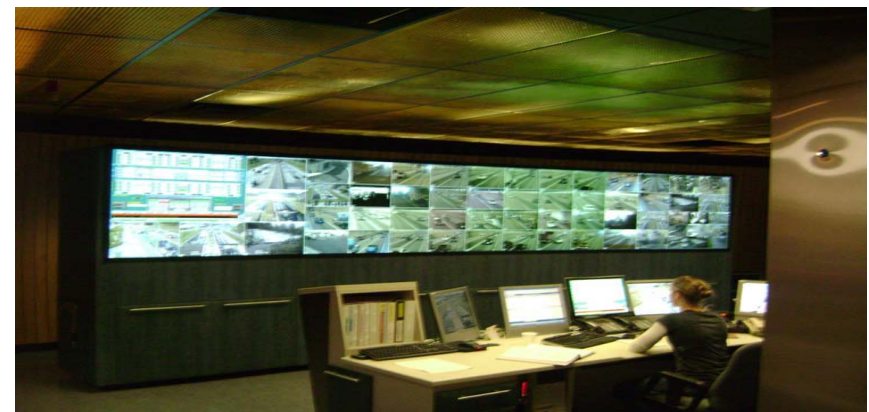
Description du projet



129 000 véhicules/jour

(débit journalier moyen annuel)

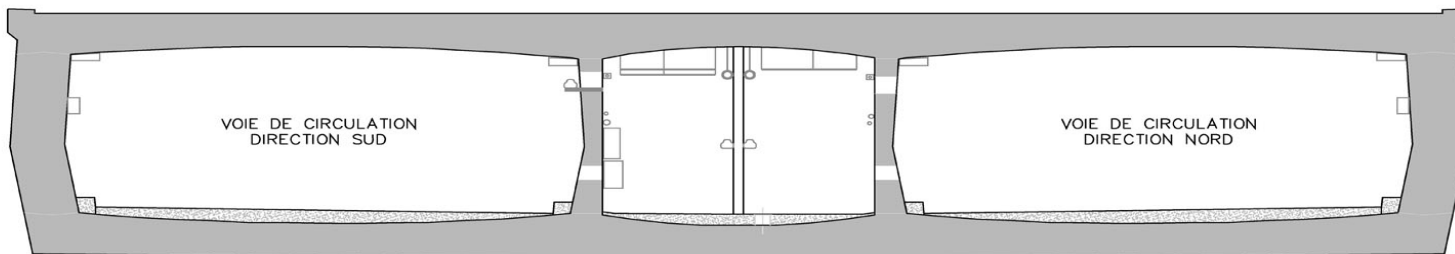
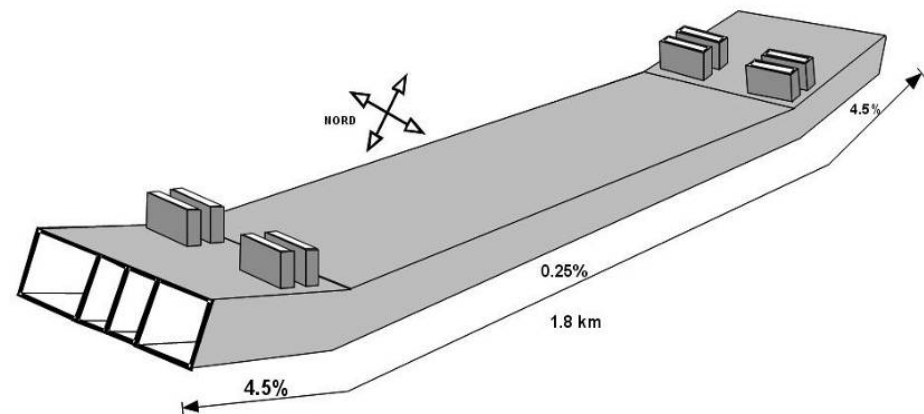
- Automobilistes
- Camionneurs
- Motocyclistes



1.1. Description du tunnel

1. L'infrastructure

- Galerie sous-marine de 1,8 km



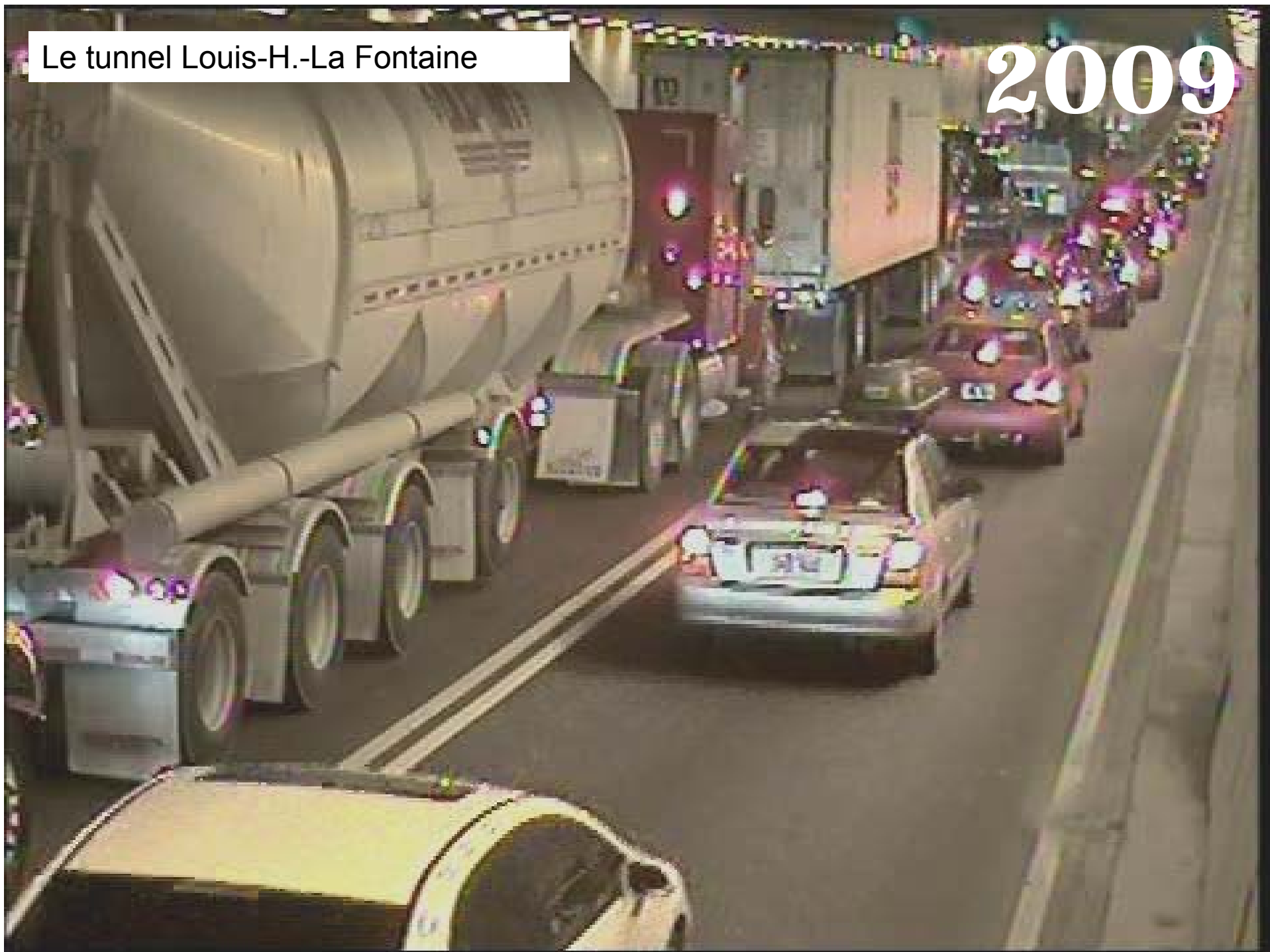
Le tunnel Louis-H.-La Fontaine

1967



Le tunnel Louis-H.-La Fontaine

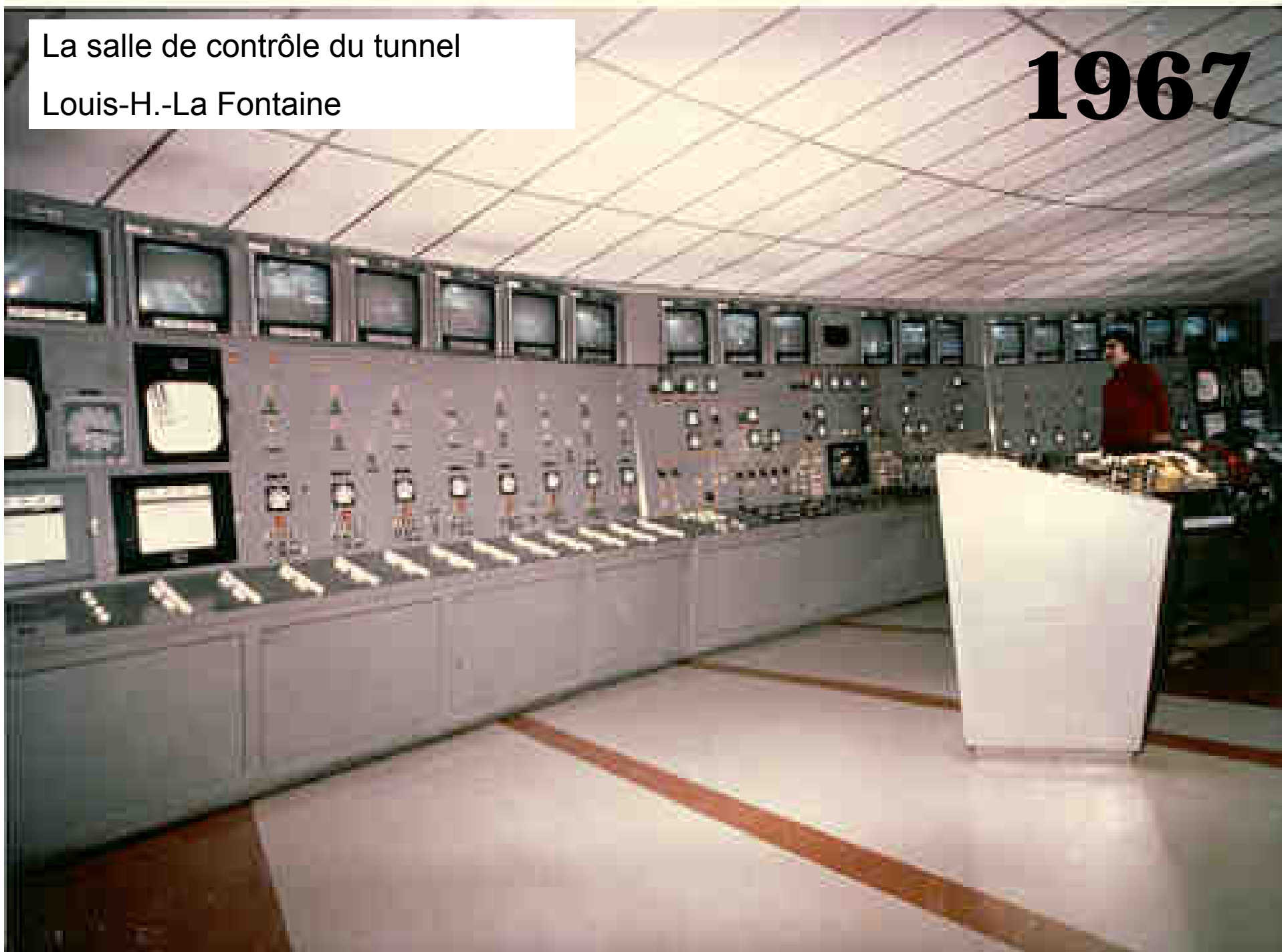
2009



La salle de contrôle du tunnel

Louis-H.-La Fontaine

1967



La salle de contrôle du tunnel

Louis-H.-La Fontaine

2008



1.1. Description du tunnel *(suite)*

10



2. Les équipements de sécurité

- 73 caméras de surveillance de la circulation, des corridors et des équipements
- Feux de voies et panneaux à messages variables
- 48 cabinets d'incendie munis d'extincteurs, de boyaux et même de mousse et de téléphones de secours
- 4 génératrices d'une puissance de 400 kW chacune

1.1. Description du tunnel (suite)

11

3. La réglementation

- Interdiction au transit de matières dangereuses sauf exception
 - *Maximum de 2 bouteilles à gaz de 53 ℓ chacune, maximum de 30 ℓ de liquide inflammable*
- Amende = minimum 600 \$ + 9 points d'inaptitude



4. Les consignes d'exploitation

- Surveillance 24 h/24 h
- Remorquage exclusif dédié durant les heures de pointe
- Plans d'intervention particuliers

1.1. Description du tunnel *(suite)*

12

5. Le comportement des usagers

- Roulez à une distance sécuritaire du véhicule en avant
- Aucun changement de voie n'est permis en tunnel sauf indication contraire
- En cas de panne, restez bien attaché dans votre véhicule avec feux clignotants activés
- En cas d'incendie, utilisez la sortie de secours la plus proche

6. L'exploitation du tunnel L.-H.-La Fontaine

- Coût annuel d'exploitation du Tunnel = 1,3 M\$
- Nombre annuel moyen d'accidents = 100 (impliquant 2 véhicules ou plus)
- Nombre annuel moyen de pannes = 500 (pannes sèches, mécaniques, crevaison)

2. But du mandat d'analyse de la valeur

13

Petit rappel

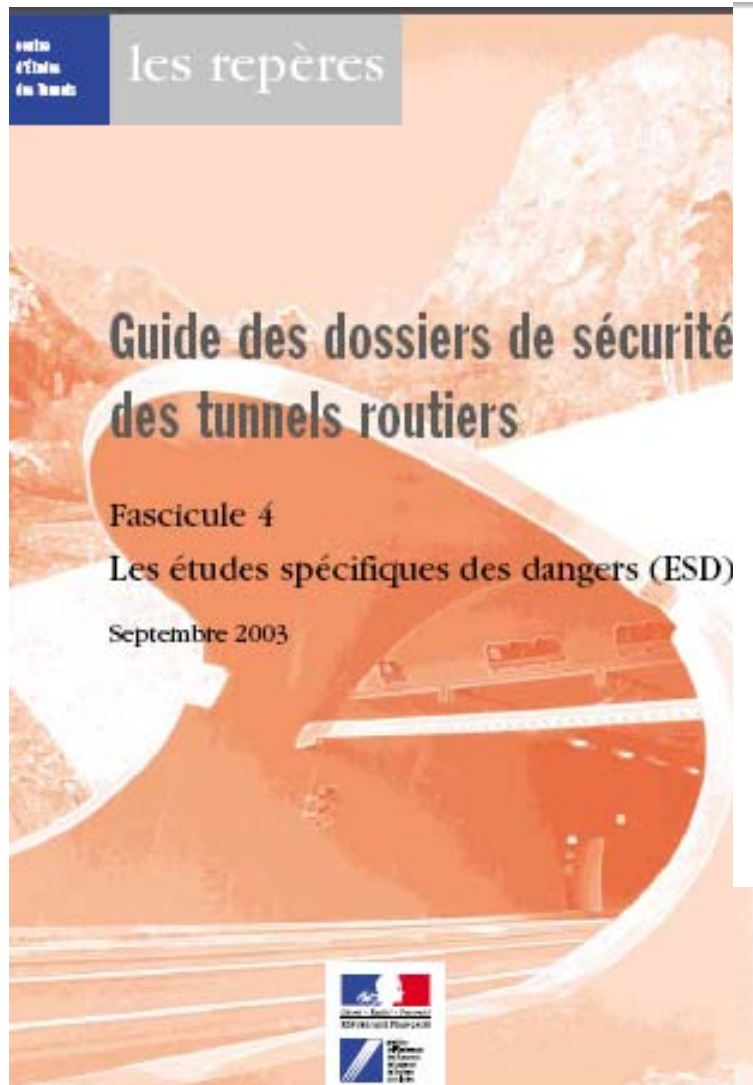
Au cours des 10 dernières années, plus de 42 M\$ en travaux ont été réalisés au tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine. Mais il en reste beaucoup à faire...

But du présent mandat

S'assurer que le projet répondra aux besoins exprimés au juste coût en améliorant les fonctionnalités et en réduisant le niveau de risque d'incidents et leurs conséquences en :

- Hiérarchisant les besoins
- Analysant les dangers possibles pouvant résulter d'un incident ou de composants vétustes
- Générant de nouvelles options de concept permettant de satisfaire les besoins à meilleur coût
- Sélectionnant les options et les pistes d'amélioration offrant la meilleure valeur

2.1 Codes, normes et procédures



MINISTÈRE DE L'INTÉRIEUR
Direction de la défense et de la sécurité civiles

MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT,
DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT
Direction des routes
Direction de la sécurité et de la circulation
Direction des transports terrestres

CIRCULAIRE INTERMINISTÉRIELLE N° 2000-83 DU 26 AOÛT 2000
relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national

NOR : EQW991640C

Texte(s) source(s) : néant.

Texte(s) abrégé(s) : néant.

Texte(s) modifié(s) : annule et remplace la circulaire interministérielle n° 81-109 du 29 décembre 1981.

Mots clés : tunnels routiers, sécurité

Mots clés libres : conception, exploitation

*Le ministre de l'Intérieur, le ministre de l'Équipement, des transports et du logement,
à Messieurs et Mesdames les préfets de région et de département*

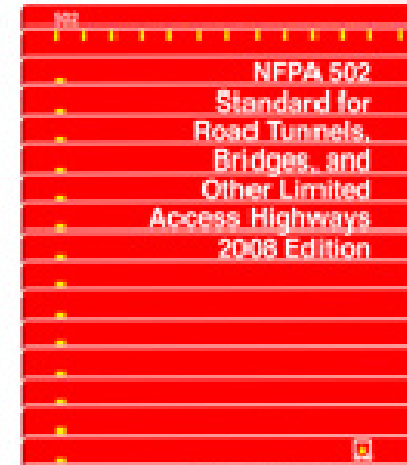
La présente circulaire annule et remplace la circulaire interministérielle n° 81-109 du 29 décembre 1981. Elle ée sa signature.

Elle concerne les tunnels du réseau routier national, y compris les autoroutes concédées, dont la longueur linaire d'un moins un tube lorsque l'ouvrage en ouvrage (pluvieux) est supérieure à 300 mètres. Pour ce sont considérées comme tunnels toutes les voies routières couvertes quel que soit leur mode de construction, crues ou inondées, tranchées couvertes, couvertures non transparentes à l'air, couvertures partielles possédant un ouverts vers l'extérieur inférieure à 1 m² par voie de circulation et par mètre linéaire. Sont toutefois les tunnels transfrontalières pour lesquels des dispositions particulières permettant les mêmes objectifs sont établis chaque cas avec les autorités compétentes des pays concernés.

Elle institue pour ces ouvrages une nouvelle procédure préalable à leur mise en service et des modalités de leur exploitation décrites en annexe n°1. Elle modifie de ce fait les modalités d'instruction et d'approbation des établis par la circulaire 94-36 du 5 mai 1994 pour le réseau routier national non concédé, et du 23 août 1999 pour autoroutes concédées.

La présente circulaire soumet par ailleurs les nouveaux tunnels du réseau routier national aux règles de l'art technique jointe en annexe n°2 intitulée "Instruction technique relative aux dispositions de sécurité dans les tunnels routiers (conception et exploitation)".

Dans le cadre de ce dispositif, le comité d'évaluation constitué après l'accident de tunnel de Mont-Benoit pour le diagnostic de sécurité des tunnels routiers d'une longueur supérieure à un kilomètre se voit confier, par son son champ de compétences, les attributions définies en annexe n°1. Ses membres sont désignés conjointement directeur des routes et par le directeur de la défense et de la sécurité civile, et son secrétariat est assuré par le



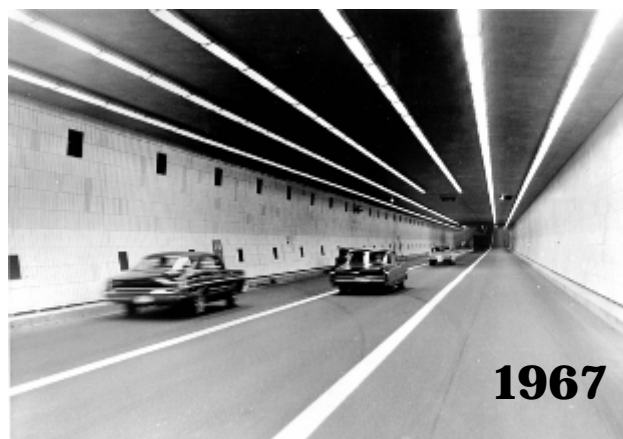
2.2 Structure en situation d'urgence



3. Contraintes d'aujourd'hui

Difficultés d'exploitation

- Débit maximum de circulation déjà atteint
- Vitesse de circulation difficile à contrôler
- Distance sécuritaire entre les véhicules difficile à respecter
- Interdiction de transport de matières dangereuses à surveiller
- Comportement des usagers imprévisible



4. Analyse de la valeur et analyse des dangers

17

L'APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

4. Analyse de la valeur et analyse des dangers

(suite)

18

L'équipe MULTIDISCIPLINAIRE était composée de

- Personnel du Ministère : exploitation, entretien, conception, gestion de projets
- Experts externes (retraités du Ministère) : entretien et exploitation
- Consultants externes : ventilation, architecture, sécurité, animateur

4. Analyse de la valeur et analyse des dangers

(suite)

19

Concept de la valeur

Équilibre entre les trois grands paramètres d'un projet

- Répondre aux besoins
- Satisfaire les besoins au juste coût
- Être livré à temps

Analyse des dangers (principaux risques)

- L'organisation humaine et la gestion des interventions
- Les incendies et les matières dangereuses
- Les attaques terroristes et le vandalisme
- Les systèmes défectueux ou désuets
- Les collisions entre véhicules (arrêt brusque, véhicules lourds)
- Les inondations et le refoulement
- La ventilation et l'éclairage
- Les conditions climatiques
- Les véhicules surdimensionnés

4. Analyse de la valeur et analyse des dangers

(suite)

20

Les étapes

1. L'arbre fonctionnel des besoins et l'analyse des dangers
2. L'évaluation de l'équipe sur
 - Les exigences NFPA 502, CE 2003/2004
 - Le niveau de satisfaction des besoins
 - Les réactions à la simulation du scénario catastrophe
3. La séance de créativité
4. La définition des critères d'évaluation et leur pondération
5. L'évaluation des options présentées à l'avant-projet conceptuel
6. L'optimisation de la meilleure option

4. Analyse de la valeur et analyse des dangers

(suite)

21

Selon Arnold Dix, expert de l'AIPCR

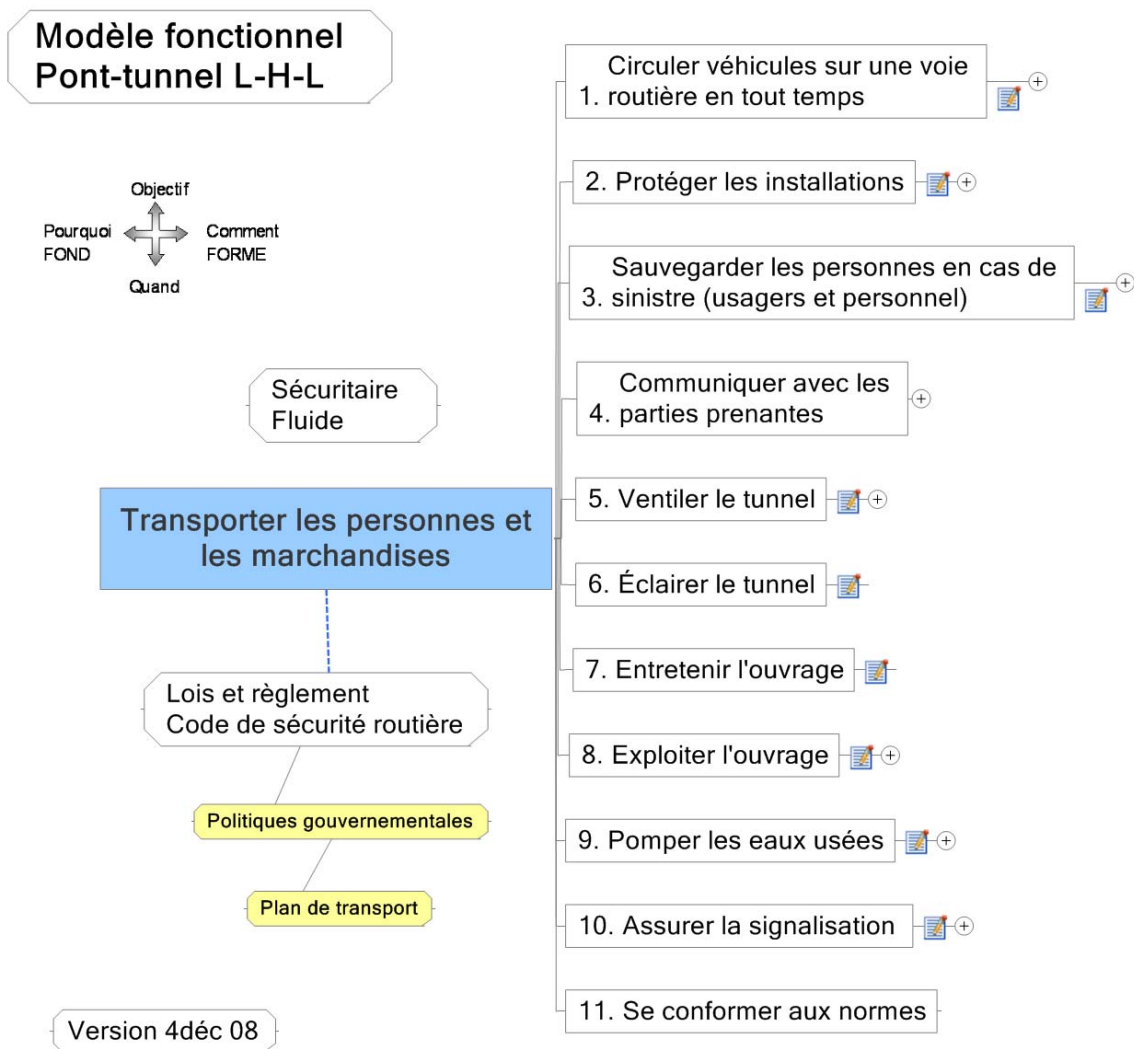
- La priorité est de protéger (dans l'ordre)
 1. les usagers
 2. les biens transportés
 3. les infrastructures publiques
- La prévention est importante
- Les efforts doivent être mis sur
 - les procédures (rapides, précises et optimales)
 - l'expertise des opérateurs
 - les services d'urgence (entraînement)
 - les usagers et leur éducation

5. Déroulement de l'atelier

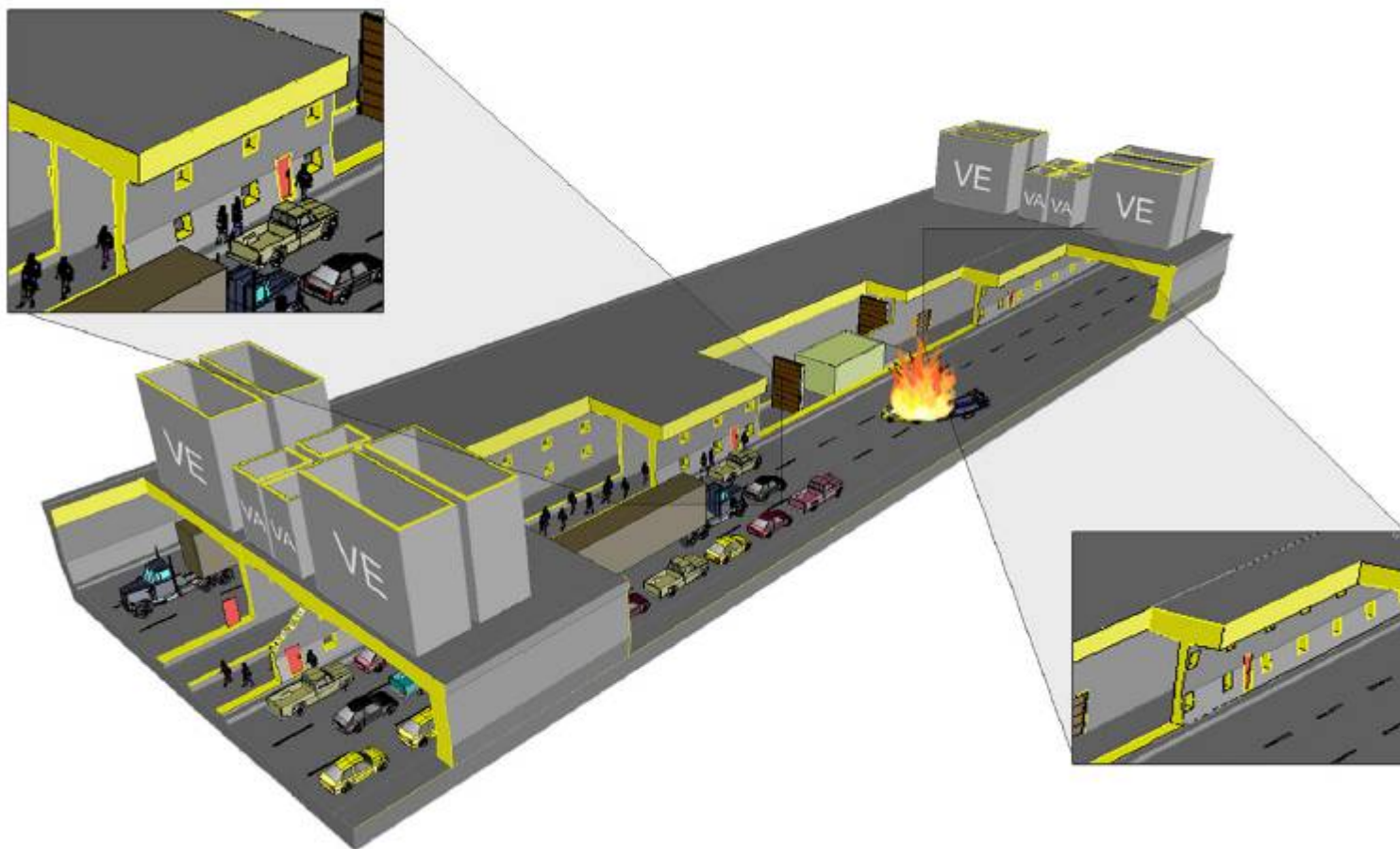
22

DÉROULEMENT DE L'ATELIER

5.1 : L'arbre fonctionnel



5.2 : Simulation du scénario catastrophe



5.2 : Simulation du scénario catastrophe *(suite)*

25

1. L'événement déclencheur : vers 5 h 15, une auto s'arrête sur la voie de droite au milieu du tunnel
2. L'événement aggravant : un accident se produit lorsqu'un camion semi-remorque fonce dans l'auto arrêtée
3. Un autre camion, qui le suit de très près, percute ce dernier en tentant une manœuvre pour l'éviter, mais le heurte de côté, et frappe son réservoir de carburant qui prend feu.
4. Le feu se propage rapidement aux trois véhicules.
5. La flamme se propage aux pneus des camions, ce qui génère une fumée très opaque.
6. La ventilation crée un apport d'oxygène qui attise le feu : la température devient très vite insoutenable.
7. Le contrôleur appelle les secours, mais les voies d'accès au tunnel sont déjà bloquées.
8. Au bout d'une heure, on réussit enfin à atteindre le site et à combattre l'incendie via la galerie technique.

Mise en garde : Cet événement est une fiction. Il a été utilisé pour un exercice d'analyse des dangers et de la valeur du tunnel L.-H.-La Fontaine dans le cadre de l'atelier du 3-5 décembre 2008. Les données énoncées ne sont pas fondées sur des mesures réelles. Si un tel déroulement ressemblait à une situation réelle, ce ne serait qu'une pure coïncidence.

5.2 : Simulation du scénario catastrophe *(suite)*

- **Fonctions actuelles du tube central**

Usages multiples

- Ventilation d'alimentation ou d'évacuation des fumées
- Refuge ou route d'évacuation des personnes
- Accès de service aux équipes d'entretien
- Drainage des eaux de ruissellement et d'infiltration
- Câblage et autres équipements d'instrumentation

5.2 : Simulation du scénario catastrophe (suite)

- **ÉVACUATION DES PERSONNES** : Tube central utilisé pour la ventilation et dans certains cas pour l'évacuation des personnes.



5.2 : Simulation du scénario catastrophe *(suite)*

- **DRAINAGE** : Présence dans le tube central de caniveaux non étanches, pour le drainage des eaux de ruissellement et d'infiltration.



5.2.1: Évaluation de la réponse aux besoins durant la simulation du scénario catastrophe

Fonction	Critère	Niveau	Flexibilité	Commentaires	Notes
1 Circuler véhicules sur une voie routière	Modes desservis	Autos, camions, bus (pas de bicyclettes ni de piétons)	F0	Tous les matins et les soirs, il y a un refoulement de la circulation dans le tunnel. Le goulot est causé par l'augmentation des camions.	7
2 Protéger les installations	Nombre et types d'incidents	Accidents routiers, vandalisme, événements naturels, terrorisme			7
3 Sauvegarder les personnes en cas de sinistre (usagers et personnel)	Redondance des équipements névralgiques	Salle de contrôle, ventilation, signalisation, communications, certains éclairages et télésurveillance	F0		4
4 Communiquer avec les parties prenantes	Délais				
5 Ventiler le tunnel					
6 Éclairer le tunnel	Luminosité dans les voies de circulation	Selon l'Illuminating Engineering Society	F0		10
7 Entretenir l'ouvrage	Glace et neige	Niveau provincial	F0	Classé au-dessus du niveau de service de la province	10
8 Exploiter l'ouvrage					
9 Pomper les eaux					
10 Signaliser :				Technologie DEL	
10.1 Les dangers		Pré-signalisation lumineuse dynamique	F0	Aucune	0
10.2 Le cheminement de la route			F1	Destination de la prochaine ville	10
10.3 L'évacuation		Simple, compréhensible, dynamique et lumineuse	F0	Ligne de vie, main courante lumineuse, signaux clignotants	4
10.4 La voie fermée		Feux de voie sur chaque voie	F0	Affichage dynamique indiqué plus loin à l'entrée	4
10.5 Les travaux en cours	Signalisation fixe du Tome 5 du MTQ		F1		10
11 Se conformer aux normes					

5.2.1: Évaluation de la réponse aux besoins durant la simulation du scénario catastrophe *(suite)*

30

Certaines fonctions étaient moins performantes

- 4.Communiquer avec les parties prenantes
 - **Message de ne pas entrer dans le tunnel** F0 0 point
 - **Message de sortir par n'importe quel moyen** F0 0 point
 - **Communiquer aux usagers dans leur véhicule** F0 0 point
 - **Communication des dangers dans le tunnel** F0 2 points
- 3.Sauvegarder la vie des personnes en cas de sinistre (usagers et personnel)
 - **Empêcher l'accès au tunnel durant un accident ou un feu** F0 1 point
 - **Encourager l'auto- évacuation** F0 0 point
 - **Protéger contre la fumée et la chaleur** F0 0 point
- 5.Ventiler le tunnel
 - **Contrôler la fumée par le désenfumage** F0 8 points
 - **Empêcher la contamination de l'air des évacués** F0 2 points
- 2.Protéger les installations
 - **Contrôler la vitesse de circulation et distance entre les camions** F0 0 point

5.2.1 : Évaluation de la réponse aux besoins durant la simulation du scénario catastrophe (suite)

FONCTIONS À AMÉLIORER

Communiquer avec les usagers

- Informer les usagers sur les comportements à adopter
- Informer les usagers en temps réel avant et durant un événement
- Informer et éduquer les usagers sur les dangers de la conduite en tunnel

Protéger les usagers en cas d'incendie

- Prévoir des dispositifs de fermeture physique du tunnel
- Encourager l'auto-sauvetage rapidement dès les premières minutes

Ventiler et contrôler les fumées

- Protéger le chemin d'évacuation des fumées
- Éviter la dé-stratification et la remontée des fumées

Protéger l'infrastructure

- Considérer les systèmes fixes de protection incendie (déluge, etc.)
- Considérer un système de détection d'incendie permettant la localisation

5.3 : Séance de créativité

Plus de 80 idées ont été émises!



ÉCOUTEZ-LA
LISTEN TO IT



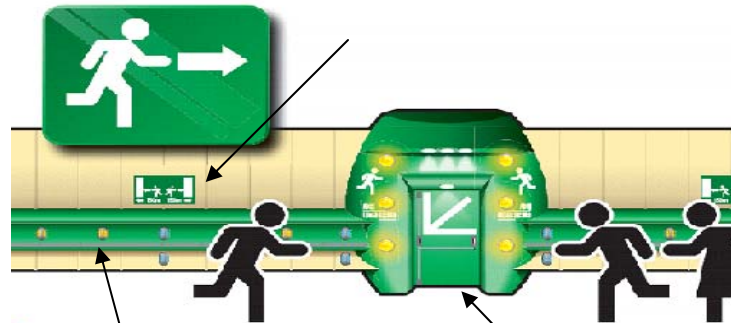
Voiture arrêtée

Objet sur la chaussée



Contre-Sens

Fumée



Ligne de vie

Indication de l'issue de secours



5.4 : Définition de critères d'évaluation et de leur pondération

	Critères	Poids
1	Sécurité (intrinsèque à sauvegarder la vie et la santé des usagers et du personnel, systèmes fonctionnels en toutes circonstances, option propice à tous les intervenants)	20
2	Confort des usagers (qualité de l'air suffisante, niveau de bruit maximum en pointe et en normal, température limite, vitesse de l'air acceptable)	7,9
3	Accessibilité des issues (personnes à mobilité réduite, déplacement des blessés, force d'ouverture des portes, pas d'obstacles, pompiers circulant avec équipement)	8,7
4	Constructibilité (maintien de la circulation, faisabilité technique, contraintes géométriques) Impact durant les travaux	7,1
5	Exploitabilité (facilité d'opération, vulnérabilité aux erreurs humaines)	8,1
6	Maintenabilité (fiabilité, facilité d'actions de réparation, MTBF, MTTR)	7,3
7	Risque technologique (maturité technologique, fiabilité reconnue, disponibilité des pièces, historique de marché, plusieurs fournisseurs)	6,7
8	Vision long terme (adaptabilité au développement futur, capacité d'accepter de nouvelles technologies, DD, ce qui va hypothéquer l'avenir, encombrement)	7,4
9	Délais d'évacuation en cas d'urgence Distance ou temps pour se déplacer vers la zone sécuritaire à pied ou en voiture. De l'incident, la réaction de l'opérateur, jusqu'à l'évacuation	6,0
10	Capacité de gestion de la circulation (Pouvoir arrêter le trafic, détourner la gestion de voie, fermer le tunnel, réagir)	10,0

5.5 : Évaluation des options

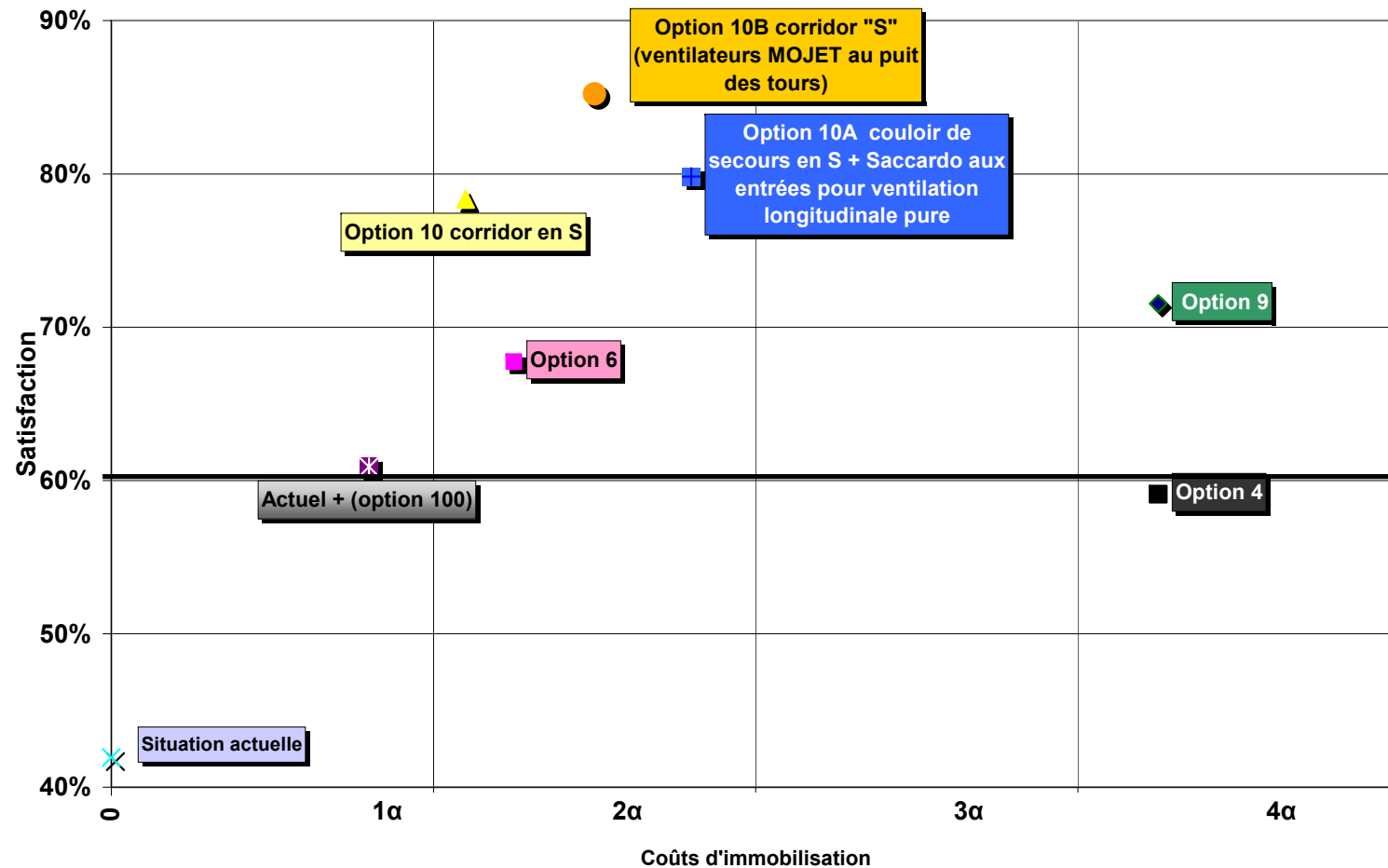
	CRITÈRES DE PERFORMANCE										
	N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Poids	20,0	7,9	8,7	7,1	8,1	7,3	6,7	7,4	6,0	10,0
Description sommaire	SÉCURITÉ	CONFORT	COULOIRS DE SECOURS	CONSTRUCTIBILITÉ	EXPLOITABILITÉ	MAINTENABILITÉ	RISQUE TECHNOLOGIQUE	CYCLE DE VIE	EVACUATION DES PERSONNES	GESTION DE LA CIRCULATION	PERFORMANCE
Situation actuelle (statu quo)	5	7	2	1	4	4	7	7	4	1	42%
Situation actuelle (statu quo) + amélioration au niveau des communications avec les usagers	6	7	4	10	7	1	6	7	6	7	61%
Option 4 : construction d'un deuxième étage + séparation au milieu du tunnel + ventilation transversale	10	9	6	1	1	1	6	4	7	7	59%
Option 9 : construction d'un deuxième étage + séparation au milieu du tunnel + ventilation longitudinale	10	10	8	4	4	4	6	4	10	7	72%
Option 6 : alimentation en amont + évacuation en aval + balancement des bouches transversales	7	7	4	8	9	7	6	8	4	7	68%
Option 10 : couloir de secours en S + remplacement des VE pour ventilation longitudinale pure	8	9	8	8	9	8	6	7	8	7	78%
Option 10A : couloir de secours en S + Saccardo aux entrées pour ventilation longitudinale pure	9	8	8	7	10	7	6	8	8	7	80%
Option 10B : couloir de secours en S + MOJET au pied des tours d'entrée pour longitudinale pure	10	8	8	7	10	6	5	8	10	10	85%

5.5 : Évaluation des options (suite)

	Performance	Coût
Option 4 : 2 étages + ventilation transversale pure	59%	4,1 α
Option 9 : 2 étages + ventilation longitudinale pure	72%	4,1 α
Option 6 : Balancement des bouches transversales + ventilation semi-longitudinale	68%	1,6 α
Option 10 : Corridor d'évacuation en forme de S	78%	1,4 α
Option 10A : Corridor en S + Saccardo	80%	2,3 α
Option 10B : Corridor en S + MOJET au pied des tours d'entrée pour longitudinale pure	85%	1,9 α
Option 100 : Statu quo + ajout d'équipements de communication aux usagers	61%	1 α

5.5 : Évaluation des options (suite)

Graphique du taux de satisfaction vs coûts de construction



6. Conclusion et leçons apprises

37

Conclusion

- La série des options 10 est la plus prometteuse tant au niveau de la réalisation des objectifs de sécurité que des investissements à y consacrer
- Il faut approfondir les avantages et désavantages de chaque scénario de la série 10 avant de prendre une décision finale quant à la solution à implanter

Leçons apprises

- Il faut une méthode systémique efficace : l'analyse de la valeur et l'analyse des dangers (besoins, normes et « scénario catastrophe »)
- Il faut mobiliser les exploitants, le service de projets et les consultants vers une vision commune
- Il faut garder l'accent sur la valeur optimale et le comportement humain des usagers
- Il faut critiquer avec respect les idées et opinions

7. Résultats et recommandations

38

- Poursuivre l'étude d'avant-projet définitif
- Approfondir la série des options 10
- Tenir compte que l'incendie peut être déclenché n'importe où dans le tube de circulation
- Prévoir un investissement de travaux de 45 M\$ au cours des prochaines années
- Coordonner les différentes phases des travaux avec tous les autres travaux à venir dans le tunnel

Merci de votre attention

39

Avez-vous des questions?

Pour nous joindre

Centre intégré de gestion de la circulation
Ministère des Transports du Québec
640, avenue Viger Ouest
Montréal (Québec) H3C 3S8

Raymond Chabot Grant Thornton
600, rue de La Gauchetière Ouest
Bureau 2000
Montréal (Québec) H3B 4L8

Alexandre Debs, ing. M. Sc. A., MBA **René Donais**, ing., CVS (Life)

Tél. : 514 390-4181

Alexandre.Debs@mtq.gouv.qc.ca

Tél. : 514 954-4630

donais.rene@rcgt.com



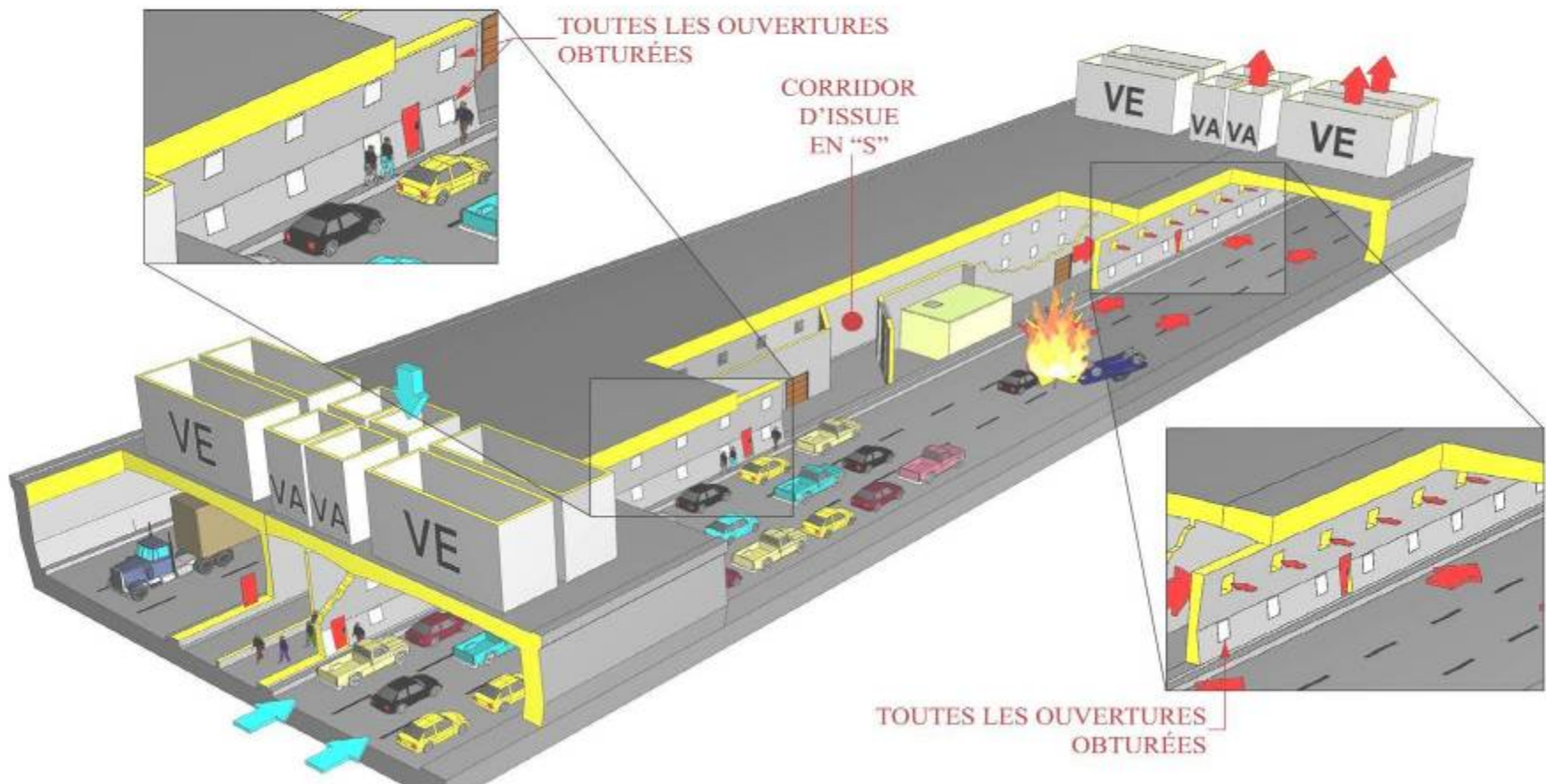
Merci de votre attention

41

ANNEXES TECHNIQUES ILLUSTRATIONS

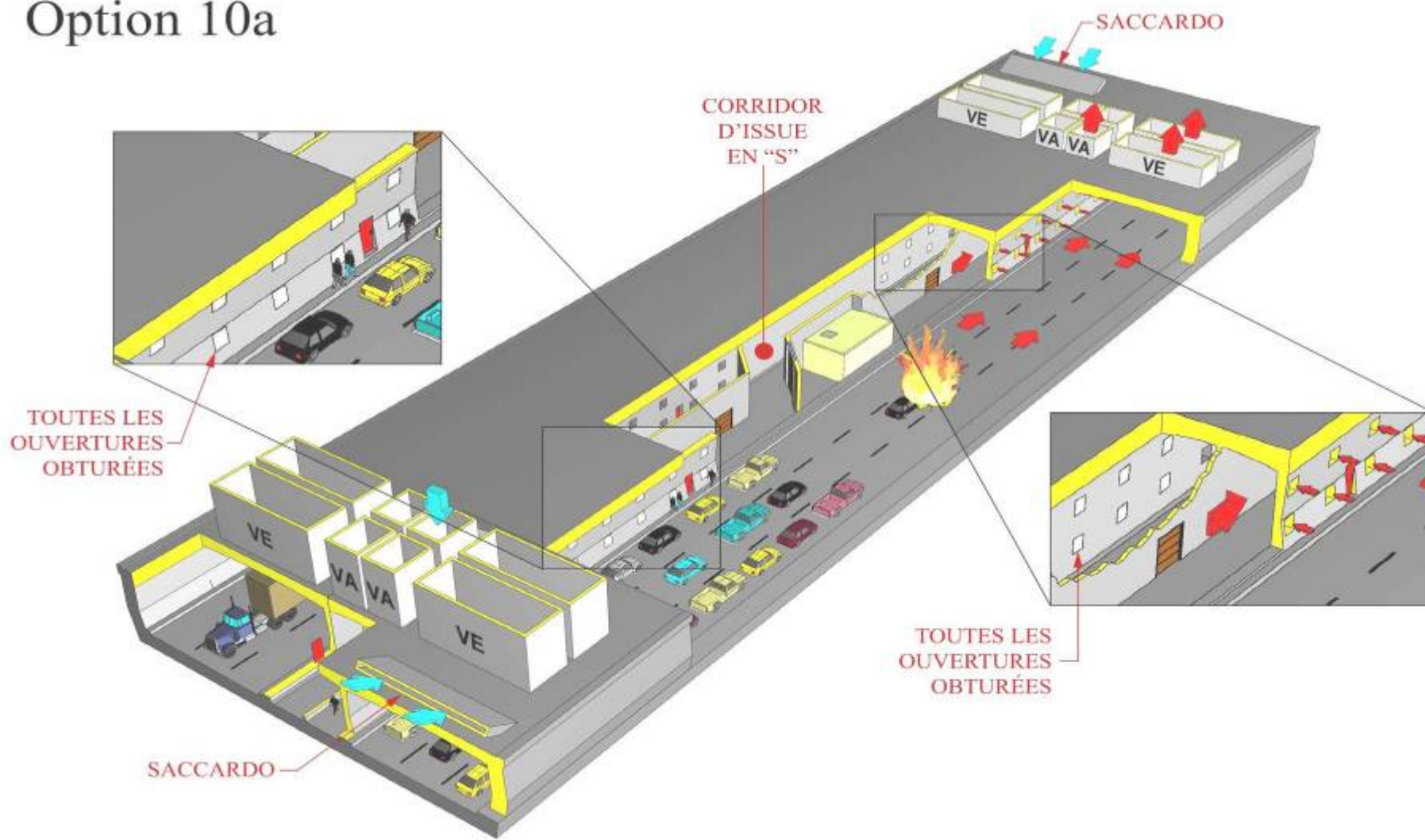
Optimisation des meilleures options

Option 10



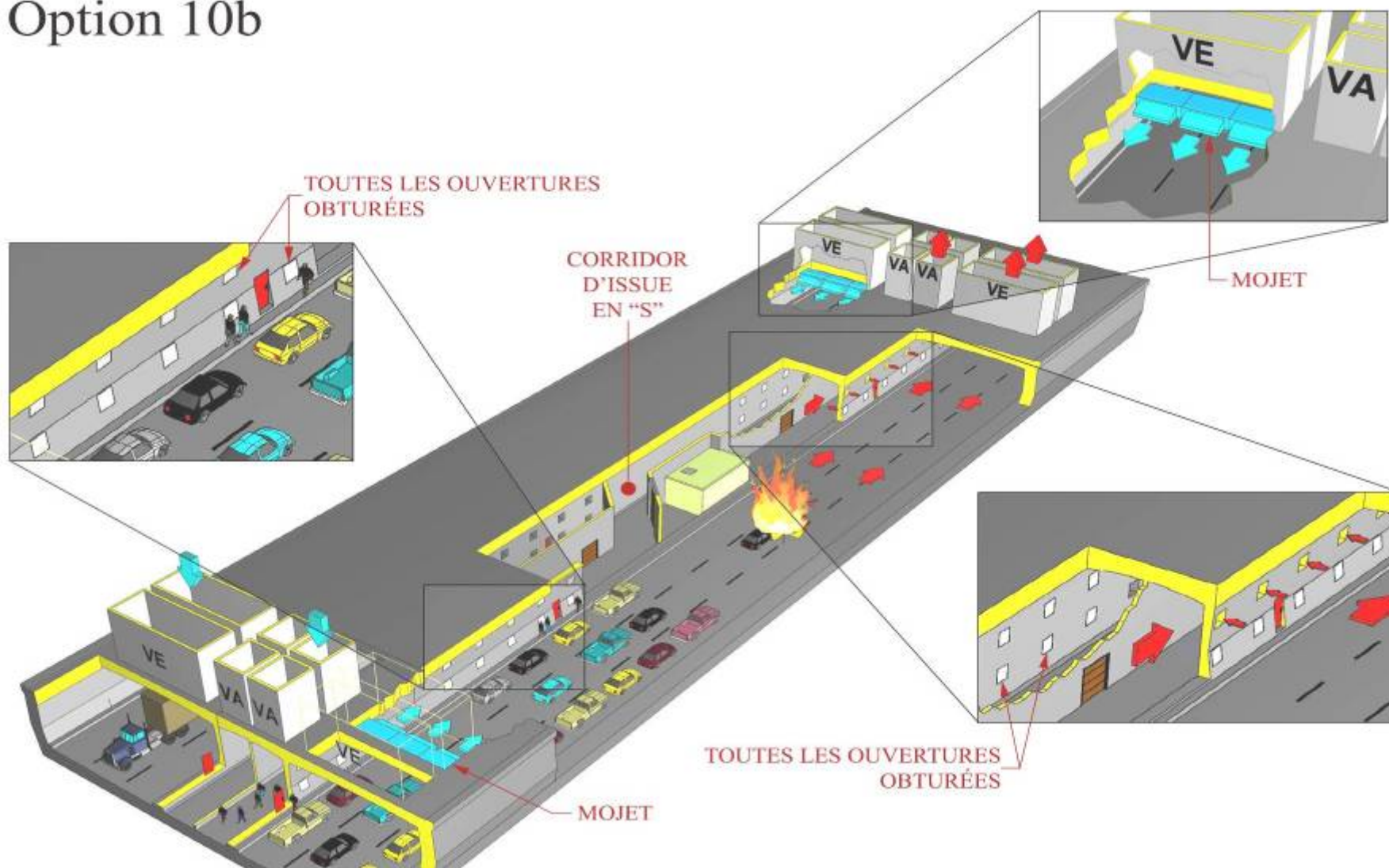
Optimisation des meilleures options

Option 10a

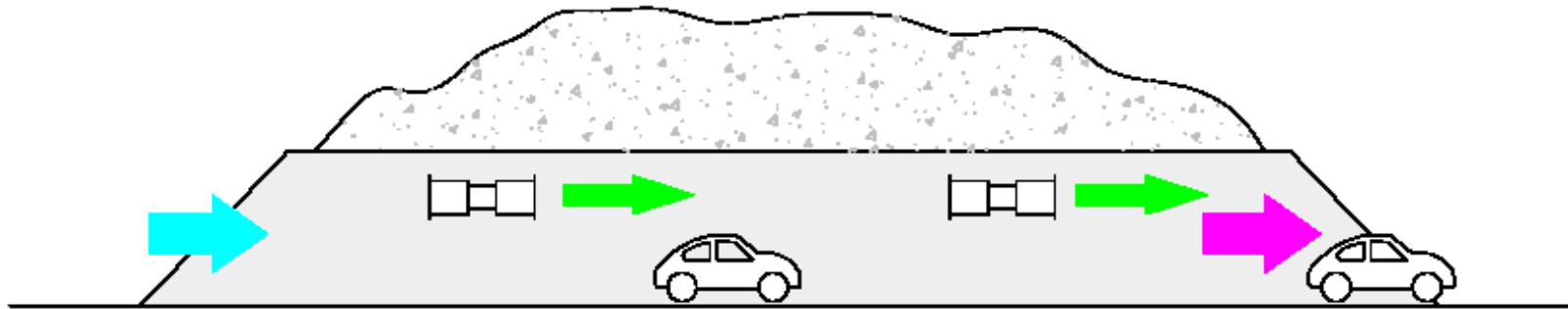


Optimisation des meilleures options

Option 10b

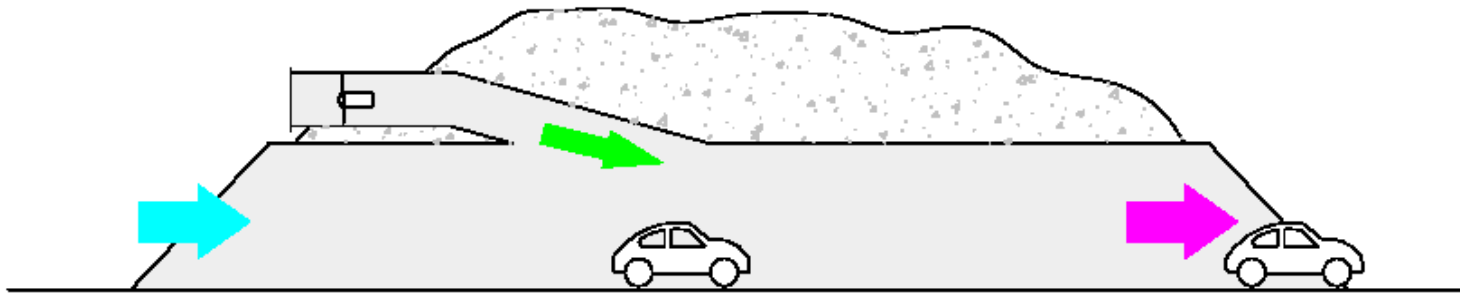


Jetfans



- Blow in the axial direction
- Velocity of discharge flow ~ 30 to 40 m/s
- Efficiency of jets influenced by Coanda effect
- Installation efficiency $\eta_i \sim 0.85$ for ceiling mounting, $\eta_i \sim 0.73$ for corner mounting

Saccardo (impulse) nozzles



- Marco Saccardo patented an 'Improved Method and Apparatus for Ventilating Tunnels' in UK patent number 2026, dated 1898
- Jet velocity ~ 30 m/s
- Discharge angle 30° or less

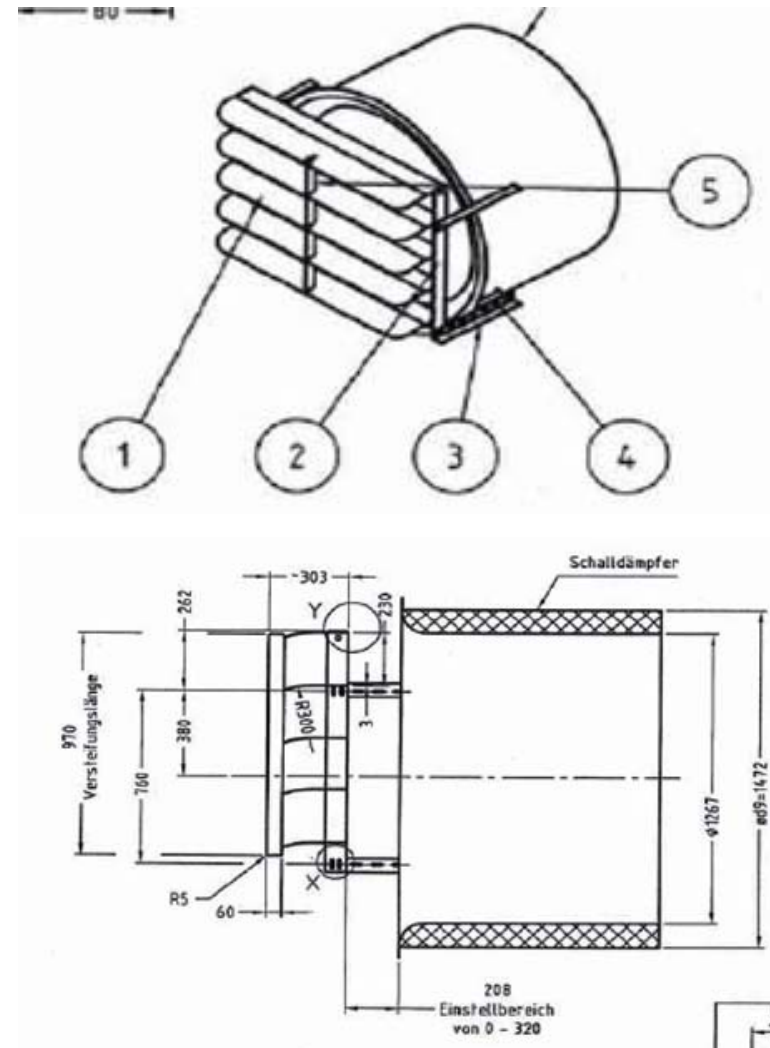
Banana Jet®



- Improves installation efficiency, by directing jet toward tunnel centreline at 7° angle - *but*
- Nozzles can encroach upon traffic space
- No additional thrust, beyond reduction of Coanda effect
- 'Wall jet' is generated on road surface, above which smoke can move upstream

Deflection louvres

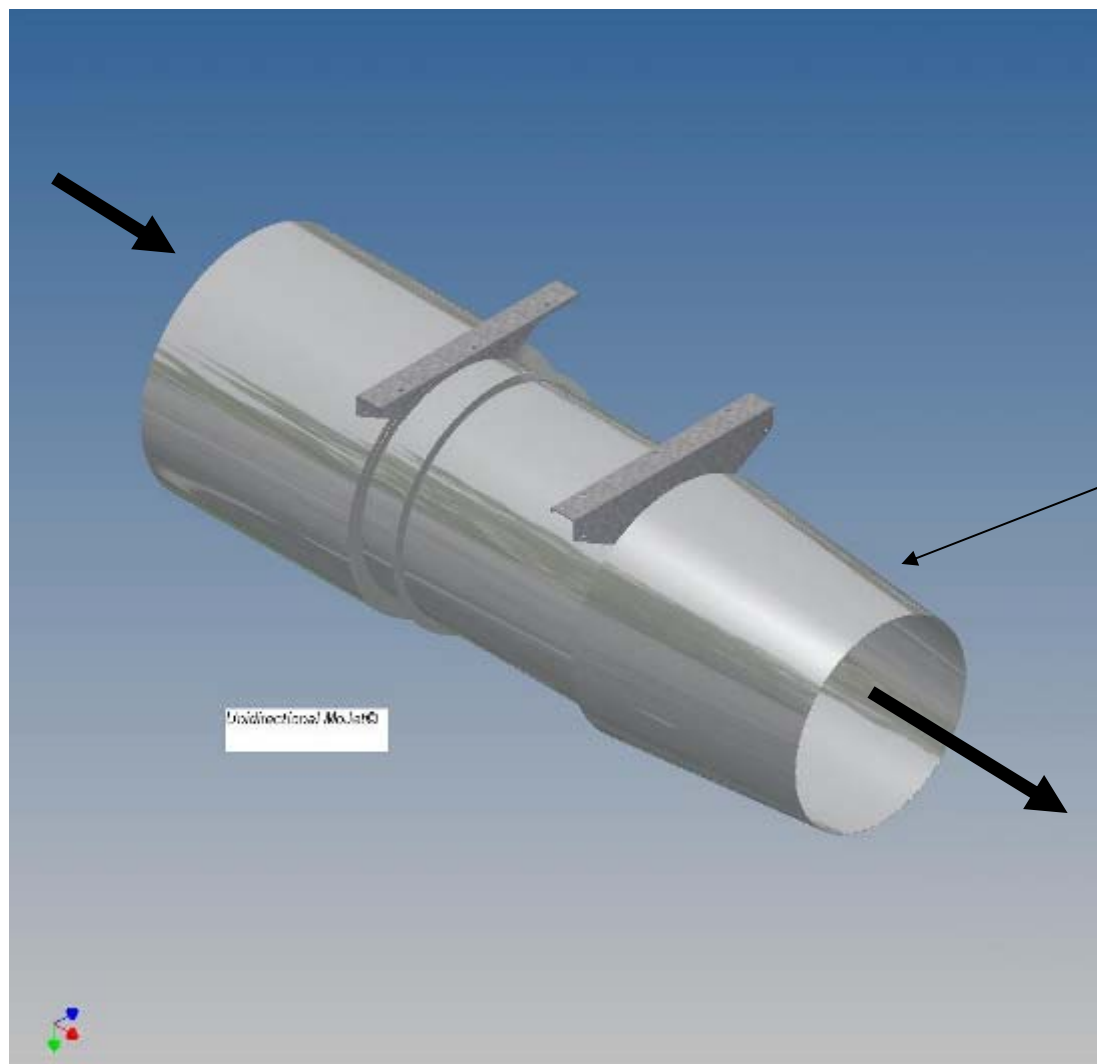
- Deflection louvres at the silencer outlet can enhance the installation efficiency, *but*
- Conventional louvres designs generate a large pressure drop on outlet side of silencer
- The *inlet* pressure drop is even greater – hence best suited to unidirectional fans only
- Design of louvres does not optimize the available fan characteristic and outlet velocity



Basic principles of the MoJet™

- MoJets™ combine the advantages of jet fans and Saccardo nozzles
- Convergent nozzles are installed on one or both sides of a fan
- The accelerated flow leads to an increased thrust
- The nozzle is directed towards the tunnel centreline, enhancing the installation efficiency
- UK patent applications 0902131.2, 0819608.1, 0821278.9 and 0819608.1 apply

MoJet™ (unidirectional version)



Convergent
nozzle



MoJet™ design

