

→ R. Rapp, Département
Ingénierie des procédés,
INRS, Centre de Lorraine,
Vandœuvre-lès-Nancy ;
J.P. Danet, F. Dubernet,
G. Magniez, service Prévention,
Caisse régionale d'assurance
maladie (CRAM) d'Aquitaine,
Bordeaux ;
H. Aussel, A. Rolin,
Département Formation,
INRS, Paris

Aéraulique des chantiers d'amiante

Étude et analyse des écoulements
de ventilation, par simulation numérique
avec EOL3D, du sas d'accès du personnel

© INRS, 2003

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'INRS, de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite.

Il en est de même pour la traduction, l'adaptation ou la transformation, l'arrangement ou la reproduction, par un art ou un procédé quelconque (article L. 122-4 du Code de la propriété intellectuelle). La violation des droits d'auteur constitue une contrefaçon punie d'un emprisonnement de deux ans et d'une amende de 150 000 euros (article L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle).

→ R. Rapp, Département
Ingénierie des procédés,
INRS, Centre de Lorraine,
Vandœuvre-lès-Nancy ;
J.P. Danet, F. Dubernet,
G. Magniez, service Prévention,
Caisse régionale d'assurance
maladie (CRAM) d'Aquitaine,
Bordeaux ;
H. Aussel, A. Rolin,
Département Formation,
INRS, Paris

Aéraulique des chantiers d'amiante

Étude et analyse des écoulements de ventilation, par simulation numérique avec EOL3D, du sas d'accès du personnel

ASBESTOS SITE VENTILATION

STUDY AND ANALYSIS OF THE VENTILATION AIRFLOWS OF PERSONNEL LOCKS BY NUMERICAL SIMULATION WITH EOL3D

In asbestos removal operations, access to the confined working area is ensured by a ventilated entry lock (tunnel). An assessment of the performance of the various tunnel ventilation configurations possible was carried out by numerical simulation with EOL3D, the predictive ventilation software developed by INRS. The cleaning time, the age distribution of the fresh air, and the distribution and average of the air velocities were the main indicators retained to assess the configurations.

Separated ventilation systems (from that of the confined area) were the most efficient in terms of air decontamination.

In contrast, the flow rates required are high ($> 4,000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$).

A good alternative consists in using a lock equipped with orifices laid out alternately (top/bottom) and subject to the negative pressure of the confined area. The surface area of the opening must allow the passage of a flow rate of about $1,000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ to obtain a decontamination time of less than one minute.

Tunnels, which favour an air flow located only at the top or bottom, should be avoided (e.g. a tunnel equipped with flexible screens).

● asbestos removal ● site ● ventilation ● numerical simulation

Dans les opérations de retrait de l'amiante, l'accès à la zone de travail confinée s'effectue par un sas d'entrée (tunnel) ventilé. Une évaluation des performances de diverses configurations aérauliques possibles du tunnel est réalisée par simulation numérique avec le logiciel de ventilation prévisionnelle, développé par l'INRS, EOL3D. Le temps d'assainissement, la distribution des âges de l'air neuf, la répartition et la moyenne des vitesses de l'air sont les principaux indicateurs retenus pour évaluer les configurations.

Les systèmes à ventilation séparée (de celle de la zone confinée) sont les plus performants du point de vue décontamination de l'air. Par contre, les débits à mettre en œuvre sont élevés ($> 4\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$).

Une bonne alternative consiste à utiliser un sas équipé d'orifices dont les positions sont alternées (haut/bas), soumis à la dépression de la zone confinée. Les surfaces d'ouverture doivent permettre le passage d'un débit de l'ordre de $1\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ pour obtenir un temps de décontamination inférieur à la minute.

Les tunnels, qui privilégient un écoulement uniquement localisé en partie basse ou haute, sont à éviter (par exemple, un tunnel équipé de rideaux souples).

● désamiantage ● chantier ● ventilation ● simulation numérique

Les opérations de retrait de matériaux contenant de l'amiante doivent se faire en respectant des règles spécifiques pour assurer la protection du personnel et de l'environnement. Ces règles font l'objet de documents d'information générale ou de guides comme le document INRS ED 815 [1], qui présente des solutions pratiques de prévention à mettre en œuvre lors des travaux dont la finalité est le retrait ou le confinement d'amiante ou de matériaux en contenant.

La méthode du bilan aéraulique développée par la CRAM d'Aquitaine, objet de l'article de Danet et coll. [2], constitue une aide à la conception et au contrôle des dispositifs de ventilation à mettre en œuvre sur les chantiers de désamiantage. Elle permet, en particulier, de prévoir les matériels aérauliques nécessaires à une maîtrise des flux d'air au sein de l'enceinte de confinement et fournit des méthodes d'évaluation de leur bon fonctionnement

(vérification sur le chantier des débits d'air transitant par le tunnel d'accès du personnel et le sas déchets). Cette publication fournit des recommandations précises sur les débits à mettre en œuvre dans l'enceinte de confinement mais n'étudie pas en détail la conception aéraulique des tunnels d'accès du personnel. Elle recommande, néanmoins, une configuration favorisant la circulation de l'air en chicane dans ce tunnel.

Cet article a pour objectif de présenter une évaluation des performances de diverses configurations aérauliques possibles du tunnel d'accès du personnel. L'évaluation est basée sur une simulation numérique des écoulements d'air associés aux différentes configurations envisagées. Des critères sont proposés pour évaluer les configurations aérauliques sur le plan de la prévention. Cette analyse nous permet de proposer des recommandations pour la conception de ces tunnels.

Les exigences de prévention sont brièvement rappelées en préambule au chapitre 1, consacré à la méthode d'évaluation. Les différentes configurations sont ensuite analysées dans le chapitre 2 : une comparaison de trois configurations types, dont le fonctionnement est assuré par la dépression du confinement, est tout d'abord effectuée ; la stabilité de la configuration la plus performante est ensuite analysée en présence de diverses perturbations (présence d'obstacles, ouverture de porte). Enfin, quelques configurations particulières recommandées dans certains guides sont étudiées.

1. Méthode d'évaluation

1.1. Le confinement et le tunnel d'accès du personnel : rappels

Le guide INRS [1] précise que le confinement de la zone à traiter a notamment pour objectif d'éviter une contamination de l'environnement extérieur par des fibres.

La mise en place du confinement statique comprend les opérations de calfeutrement et de pose de l'enveloppe d'étanchéité.

Le confinement dynamique consiste à créer un flux d'air propre et permanent pendant toute la durée du chantier, de l'extérieur vers l'intérieur de la zone des travaux. Il est obtenu par utilisation d'extracteurs qui maintiennent en dépression la zone de travail et en assurent le renouvellement de l'air.

L'entrée de l'air doit d'abord être assurée par le tunnel d'accès. Le débit dans celui-ci doit permettre de garantir une vitesse d'air d'au moins 0,2 à 0,5 m.s⁻¹. Il est conseillé de maintenir le niveau de dépression à une valeur voisine de 20 Pa. Enfin, avant le démarrage des opérations de retrait, un test de fumée permet de vérifier l'étanchéité du confinement, les capacités réelles des unités d'extraction et les conditions de balayage de la zone confinée, en particulier des tunnels, par les flux d'air.

Le sas personnel, ou tunnel d'accès, est un dispositif comprenant habituellement cinq compartiments, dont deux avec douches, qui permet au personnel d'accéder à la zone de travail en respectant des procédures d'entrée et de sortie bien définies.

Les portes de séparation entre les compartiments sont équipées de grilles ou ori-

fices permettant un transfert de l'air de l'extérieur vers la zone contaminée sous l'effet de la dépression maintenue dans cette dernière par les extracteurs.

Les vitesses résultant du débit d'air transitant à travers ce tunnel doivent permettre un entraînement des fibres et un assainissement progressif de l'atmosphère, compartiment par compartiment.

Ces vitesses ne peuvent cependant être trop importantes pour rester compatibles avec des valeurs limitant les risques d'inconfort, notamment sous la douche d'hygiène.

Il convient donc de définir un débit optimal, compromis entre celui nécessaire à un assainissement de l'ambiance et celui acceptable pour le personnel du point de vue confort thermique.

1.2. La simulation numérique

La simulation numérique constitue un moyen fréquemment employé dans l'étude et la compréhension des écoulements d'air. Le logiciel EOL3D, développé à l'INRS, est spécialement conçu pour l'étude par simulation numérique de locaux industriels [3]. Il permet, à partir de la description géométrique d'un local et des caractéristiques aérauliques de l'installation de ventilation, de résoudre numériquement les équations de la mécanique des fluides en un nombre fini de positions à l'intérieur du local (le domaine de calcul). On obtient ainsi le champ de vitesse d'air ou de concentration en polluant en ces points. Le logiciel comprend également des outils pour évaluer la qualité de l'air comme, par exemple, le calcul des âges internes.

Il permet également de suivre, en un ou plusieurs points déterminés du domaine de calcul, l'évolution temporelle de la concentration suite à une émission d'un polluant gazeux en un endroit quelconque du local.

1.3. Les critères d'évaluation

Des paramètres prépondérants dans l'estimation de la qualité de la ventilation d'un tunnel d'accès permettent d'effectuer une comparaison entre différentes configurations. Il s'agit du temps d'assainissement, de la distribution des vitesses de l'air et de la structure de l'écoulement (présence ou non de zones mortes). L'intensité de la vitesse de l'air intervient également dans l'estimation du confort thermique.

1.3.1. Temps de décontamination - Temps d'assainissement

Sur les chantiers de retrait de l'amiante, les professionnels dénomment « *temps de décontamination* » l'intervalle de temps mis par un opérateur pour passer de la zone de travail au compartiment où il enlève sa protection respiratoire (passages successifs dans les compartiments 5 à 2, *figure 1*).

Ce temps, nécessaire pour assurer la décontamination d'une personne dans de bonnes conditions, est normalement compris entre 15 et 20 minutes, soit en moyenne 3 à 4 minutes par compartiment. Malheureusement, il a été constaté sur le chantier que les procédures de sortie ne sont pas systématiquement respectées, avec un temps de passage entre les compartiments 5 et 2 pouvant se réduire à une durée totale de l'ordre de 3 minutes [4].

Le débit de ventilation mis en jeu doit être suffisant pour assurer l'évacuation de toute pollution spécifique durant ce temps de passage dans les compartiments. Le dispositif de ventilation associé au tunnel doit permettre d'assurer un assainissement de l'ambiance en moins de 3 à 4 minutes, temps de présence moyen du personnel dans chaque compartiment, et même si possible en moins d'une minute pour les cas extrêmes. Pour les hygiénistes, le temps mis par le dispositif de ventilation pour assurer l'assainissement de l'ambiance est habituellement noté temps de décontamination. Afin d'éviter toute ambiguïté, cet intervalle de temps sera dans la suite du document intitulé temps d'assainissement.

Le temps d'assainissement peut être assimilé à l'âge moyen du polluant évalué en un point R du local situé au niveau des voies respiratoires. Cet âge moyen dépend en général de la position S de la source de polluant : $\tau_R = \tau_R(S)$. Dans la présente étude, la position de la source est un point aléatoire d'un compartiment puisque, en principe, seule l'entrée de l'opérateur, complètement équipé de ses moyens de protection individuelle, peut être à l'origine d'une contamination de ce compartiment et donc du tunnel.

Pour s'affranchir de la dépendance de l'âge moyen du polluant par rapport à la position de la source, une moyenne réalisée à partir de deux positions possibles de la source S1 et S2 est suffisante :

$$\tau_R = (\tau_R(S1) + \tau_R(S2)) / 2$$

En effet, une étude comparative effectuée sur la première configuration décrite ci-après montre que le temps d'assainissement calculé à partir d'une émission en 105 points uniformément répartis dans le compartiment 4 est égal à la moyenne des temps d'assainissement calculés à partir de l'émission aux points S1 et S2. Les valeurs obtenues pour ces deux paramètres sont respectivement de 156 et 155 s.

La position des points R, S1 et S2 est constante et arbitraire pour tous les essais.

R est à 1,64 m de haut (niveau des voies respiratoires), sur l'axe central vertical du compartiment 4. Le premier point d'émission, repéré S1 sur la *figure 2*, se trouve au même niveau que le point d'observation mais il est situé à 0,12 m de la paroi arrière du compartiment. Le second point d'émission S2 est placé sous le point d'observation, à 0,56 m de hauteur, légèrement décalé vers l'avant (0,06 m par rapport au point d'observation).

À titre indicatif, l'évolution temporelle de la concentration observée au point repéré R, suite à une émission en S1 et S2, est donnée sur cette même figure 2. Ces courbes d'évolution permettent de déduire le temps d'assainissement moyen τ_R au niveau des voies respiratoires.

Ce paramètre τ_R servira d'élément majeur de la comparaison effectuée ci-après avec deux seuils, l'un à 240 s qui constitue une limite d'acceptabilité d'un système et l'autre à 60 s.

Fig. 1. Configurations types tunnel1, tunnel2 et tunnel3

- Tunnel1, tunnel2 and tunnel3 type configurations

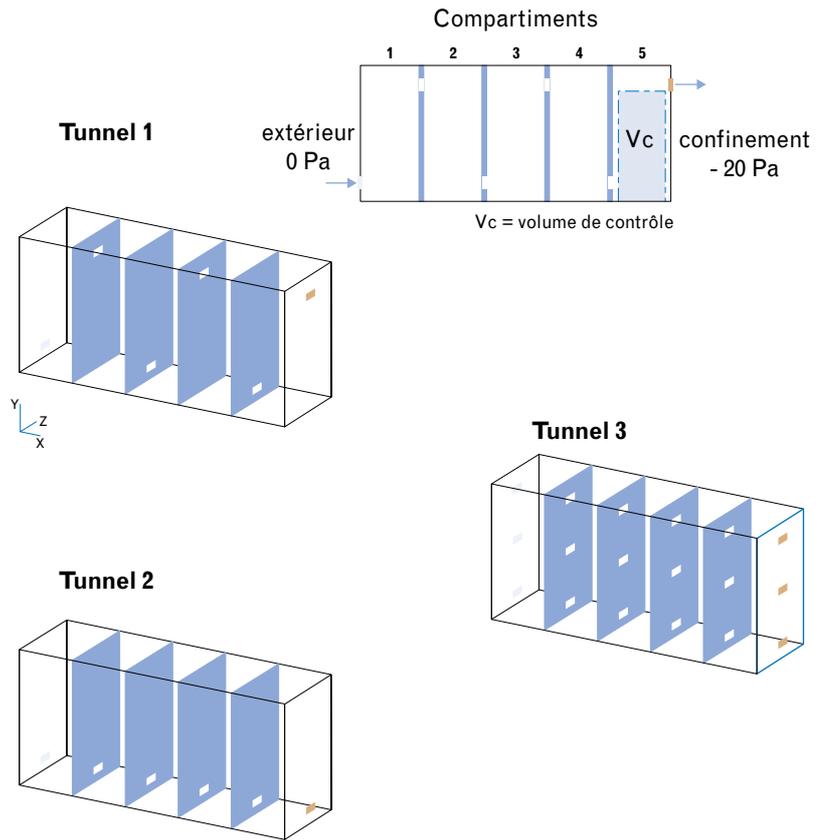
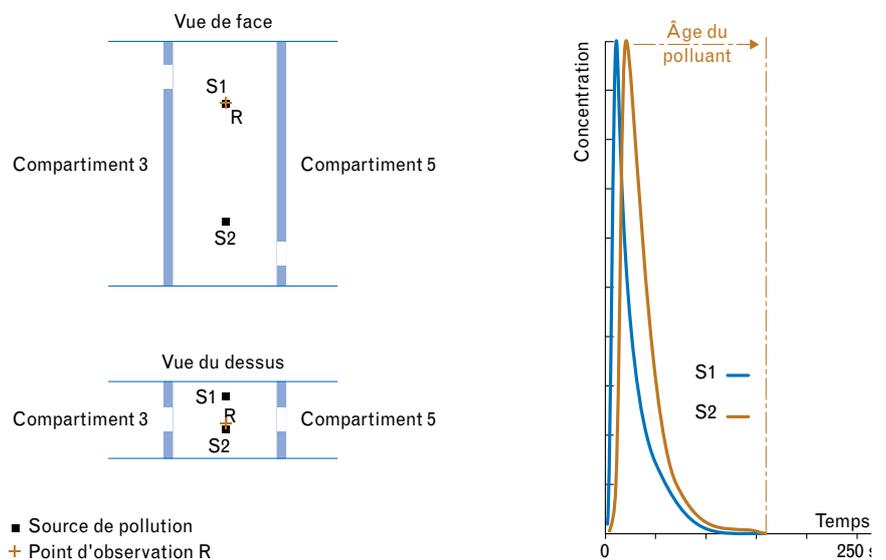


Fig. 2. Traçage des sources S1 et S2 - Tunnel1

- Tracing of sources S1 and S2 - Tunnel1



1.3.2. Distribution et moyenne des vitesses de l'air

Le transport et l'évacuation des particules ne peuvent être assurés que si le débit de ventilation est suffisant. Afin d'éviter au mieux les phénomènes de sédimentation, le système de ventilation doit garantir une vitesse minimale de l'air comprise entre 0,2 et 0,5 m.s⁻¹. Il convient également de garantir un minimum de confort du point de vue thermique. Compte tenu de la diversité des conditions climatiques pouvant être rencontrées et de l'évolution de l'activité et de l'isolement vestimentaire d'un compartiment à l'autre, la notion de confort thermique à l'intérieur d'un tunnel est difficile à appréhender. Mais, ce problème est particulièrement critique dans le compartiment assurant la douche corporelle. Dans ce compartiment, pour limiter au mieux le niveau d'inconfort, même avec une température de l'ordre de 25 °C, il convient de rechercher une vitesse de l'air la plus faible possible. Les vitesses supérieures à 0,5 m.s⁻¹ ne sont pas acceptables.

Avec un niveau d'activité léger debout (1,6 met) et une vitesse de l'air de 0,2 m.s⁻¹, une situation de confort est réalisable lorsque la température de l'air est voisine de 27 °C [5]. La sensation de froid augmente dès que la température diminue ou lorsque la vitesse de l'air augmente.

Pour la comparaison, trois paramètres sont définis à partir des vitesses calculées par simulation numérique :

- Vm : vitesse moyenne de l'air déterminée dans un volume de contrôle du compartiment 5. Ce volume englobe tous les points de calcul entre 0 et 1,80 m de haut, situés à plus de 0,15 m d'une paroi verticale ;
- Fi : fraction de ce même volume de contrôle où les vitesses sont inférieures à 0,2 m.s⁻¹ ;
- Fs : fraction de ce même volume de contrôle où les vitesses sont supérieures à 0,5 m.s⁻¹ ;

Afin de satisfaire les critères d'assainissement mais également ceux du confort thermique, on recherchera pour Vm une valeur légèrement supérieure à 0,2 m.s⁻¹.

Pour le facteur Fi, qui tient compte du point de vue assainissement de la limite inférieure admissible pour la vitesse de l'air, on recherchera une valeur la plus faible possible.

Il en est de même pour le facteur Fs qui, du point de vue confort, prend en compte la limite supérieure admissible pour la vitesse de l'air.

1.3.3. Zones mortes - Distribution des âges de l'air neuf

Le test de fumée permet de vérifier les conditions de balayage du tunnel par le flux d'air et de mettre en évidence la présence de zones mortes. L'existence de ces zones est liée à la configuration géométrique adoptée pour le tunnel, notamment les emplacements des orifices de passage de l'air.

Le calcul et la visualisation des cartes de l'âge de l'air neuf donnent directement une indication sur les zones du tunnel mal ou peu ventilées.

2. Résultats

2.1. Etude et comparaison de trois configurations types résultant d'une dépression de l'enceinte confinée

2.1.1. Description

Ces configurations sont représentées figure 1. Il s'agit à chaque fois d'un tunnel à cinq compartiments, de 5 m de long, 1 m de profondeur et 2,2 m de haut, dont la ventilation est assurée par la différence de pression de -20 Pa existant entre la zone de travail du confinement et l'extérieur.

Dans chaque porte, la surface totale des orifices de passage de l'air est de : 0,20 x 0,20 m².

Pour la configuration tunnel1, chaque porte ne comporte qu'une seule ouverture. Elles sont pratiquées alternativement en bas puis en haut des portes, le bord de l'orifice se trouvant à 0,20 m du sol ou du plafond, sur l'axe central de la porte.

Pour tunnel2, tous les orifices sont placés sur le bas des portes, toujours à 0,20 m du sol.

Pour tunnel3, chaque porte comporte trois ouvertures avec une surface totale de 3 x (0,20 x 0,067) m², réparties sur la hauteur de la porte.

Le volume de contrôle Vc du compartiment 5 est identique pour les trois configurations. Il est indiqué en bleu clair sur la vue de face de tunnel1 (cf. fig. 1).

2.1.2. Résultats et analyse

La même différence de pression étant appliquée entre les deux extrémités de chaque tunnel, le débit de ventilation calculé par simulation numérique résulte uniquement de la configuration géométrique du tunnel et de la position des ouvertures.

Le *tableau 1* donne, pour chacun des tunnels, les résultats obtenus suivant les critères précédemment définis.

Ces résultats sont repris et présentés *figure 3* sous forme d'histogrammes, avec les limites préconisées pour les différents paramètres (valeurs minimale recommandée et maximale admissible pour τ_R , Fi et Fs, et plage préconisée pour Vm).

TABLEAU 1

CONFIGURATIONS TUNNEL1, TUNNEL2, TUNNEL3 (*)
- TUNNEL1, TUNNEL2, TUNNEL3 CONFIGURATIONS

Configurations	τ_R (s)	Vm (m.s ⁻¹)	Fi (%)	Fs (%)	Débit (m ³ .h ⁻¹)
tunnel1 : orifices alternés	155	0,24	62	12	280
tunnel2 : orifices en partie basse	385	0,29	58	18	400
tunnel3 : orifices répartis	260	0,22	62	14	340

(*) Résultats des calculs exprimés en :
- temps d'assainissement moyen (τ_R en s) ;
- vitesse moyenne dans le volume de contrôle (Vm en m.s⁻¹) ;
- fraction du volume de contrôle où l'intensité de la vitesse de l'air est inférieure à 0,2 m.s⁻¹ (Fi en %) ;
- fraction du volume de contrôle où l'intensité de la vitesse de l'air est supérieure à 0,5 m.s⁻¹ (Fs en %) ;
- débit de ventilation (m³.h⁻¹).

Dans les trois configurations, la vitesse moyenne dans le volume de contrôle V_m est comprise entre 0,2 et 0,3 $m.s^{-1}$, avec cependant une vitesse de l'air inférieure à 0,2 $m.s^{-1}$ pour environ 60 % des points de ce volume (F_i). La vitesse de l'air est supérieure à 0,5 $m.s^{-1}$ pour 10 à 20 % des points suivant la configuration, le meilleur résultat étant obtenu pour tunnel1.

Remarque :

Pour tunnel1, ces résultats sont variables d'un compartiment à l'autre du fait de l'alternance dans la position des orifices de passage de l'air. Le même calcul, effectué sur le compartiment 4, donne pour ce tunnel une vitesse moyenne dans le volume de contrôle de 0,15 $m.s^{-1}$, un facteur F_i de 74 % et un facteur F_s de 0 %.

Le temps d'assainissement moyen est variable d'une configuration à l'autre, avec un temps inférieur à 3 minutes pour tunnel1, proche de 4 minutes pour tunnel3 et supérieur à 6 minutes pour tunnel2.

La *figure 4 (page suivante)* présente les cartes d'iso-valeurs des âges de l'air neuf calculés pour les trois configurations. Elles indiquent le temps nécessaire à l'air neuf entrant dans le tunnel pour parvenir au point considéré.

La carte obtenue pour la configuration tunnel1 est caractéristique d'un écoulement de type piston avec un âge de l'air qui augmente avec la distance séparant le point considéré de l'introduction de l'air.

Quelques effets minimes de recirculation peuvent être observés, mais l'âge est très faible dans le premier compartiment (inférieur à 20 - 30 s) et le maximum est bien obtenu dans le dernier compartiment, au niveau de l'ouverture de sortie de l'air (environ 150 s).

Pour la configuration tunnel2, l'air neuf passe très rapidement du premier compartiment au dernier, avec en sortie un âge proche de 90 s. Par contre, toute la partie supérieure du tunnel est très mal ventilée avec des âges qui atteignent 90 s dès le premier compartiment et 180 s dans le dernier.

Dans la configuration tunnel3, l'influence de la disposition des trois fentes est très nette. En regard des fentes, l'âge de l'air en sortie est de l'ordre de 120 s. Par contre, dans le reste des compartiments, il s'échelonne entre 50 s pour le premier compartiment et 150 s pour le dernier.

Des trois types de tunnels étudiés (tunnel1 à tunnel3), la configuration tunnel2 ou similaire est absolument à proscrire. La ventilation d'une grande partie des compartiments est inefficace.

Seule la configuration tunnel1 permet de bien respecter le seuil relatif au temps d'assainissement moyen (ou décontamination). La configuration tunnel3 en est cependant très proche.

Le calcul des autres critères effectués dans le dernier compartiment donne des résultats assez similaires pour ces deux configurations.

Pour tunnel1, ces résultats sont fonction du compartiment considéré et une modification des résultats est obtenue lorsque le volume de contrôle est pris dans le compartiment précédent, avec notamment une vitesse moyenne inférieure à 0,2 $m.s^{-1}$.

2.2. Fonctionnement de la configuration tunnel1 : facteurs d'influence

2.2.1. Description

La configuration tunnel1 a été retenue pour étudier quelques situations particulières susceptibles d'entraîner une modification ou une perturbation dans son fonctionnement.

Les facteurs d'influence suivants ont été étudiés :

- la présence d'une personne dans un compartiment (compartiment 4) ;
- l'ouverture d'une porte (entre les compartiments 2 et 3) ;
- l'ouverture de deux portes consécutives (entre les compartiments 2 et 4) ;
- une chute de pression dans le confinement, avec une différence de pression portée à -10 Pa.

Ces configurations sont respectivement repérées par tunnel1_h, tunnel1_1po, tunnel1_2po et tunnel1_10Pa.

Fig. 3. Schématisation des résultats pour la comparaison des configurations tunnel1, tunnel2 et tunnel3

- Diagram of the results to compare the tunnel1, tunnel2 and tunnel3 type configurations

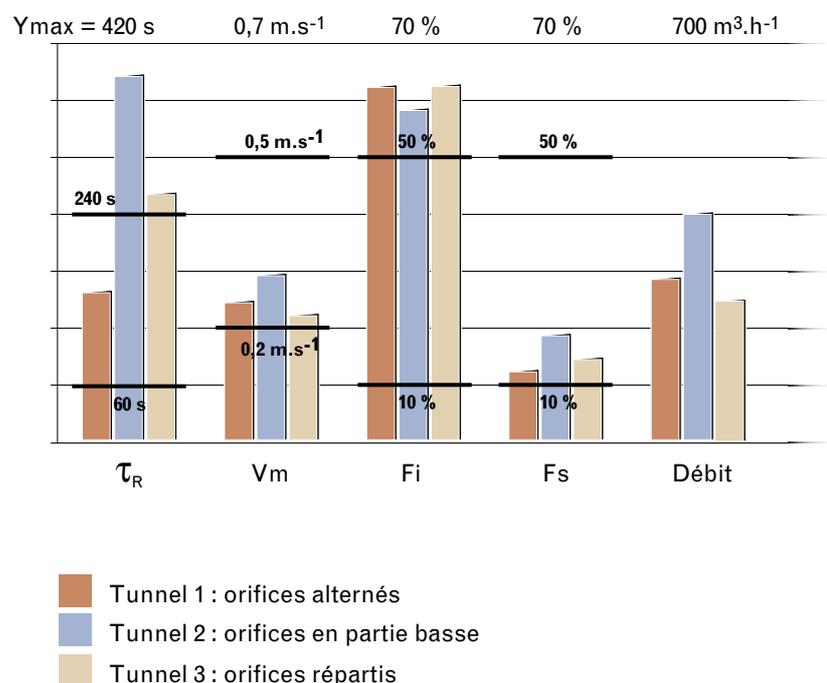
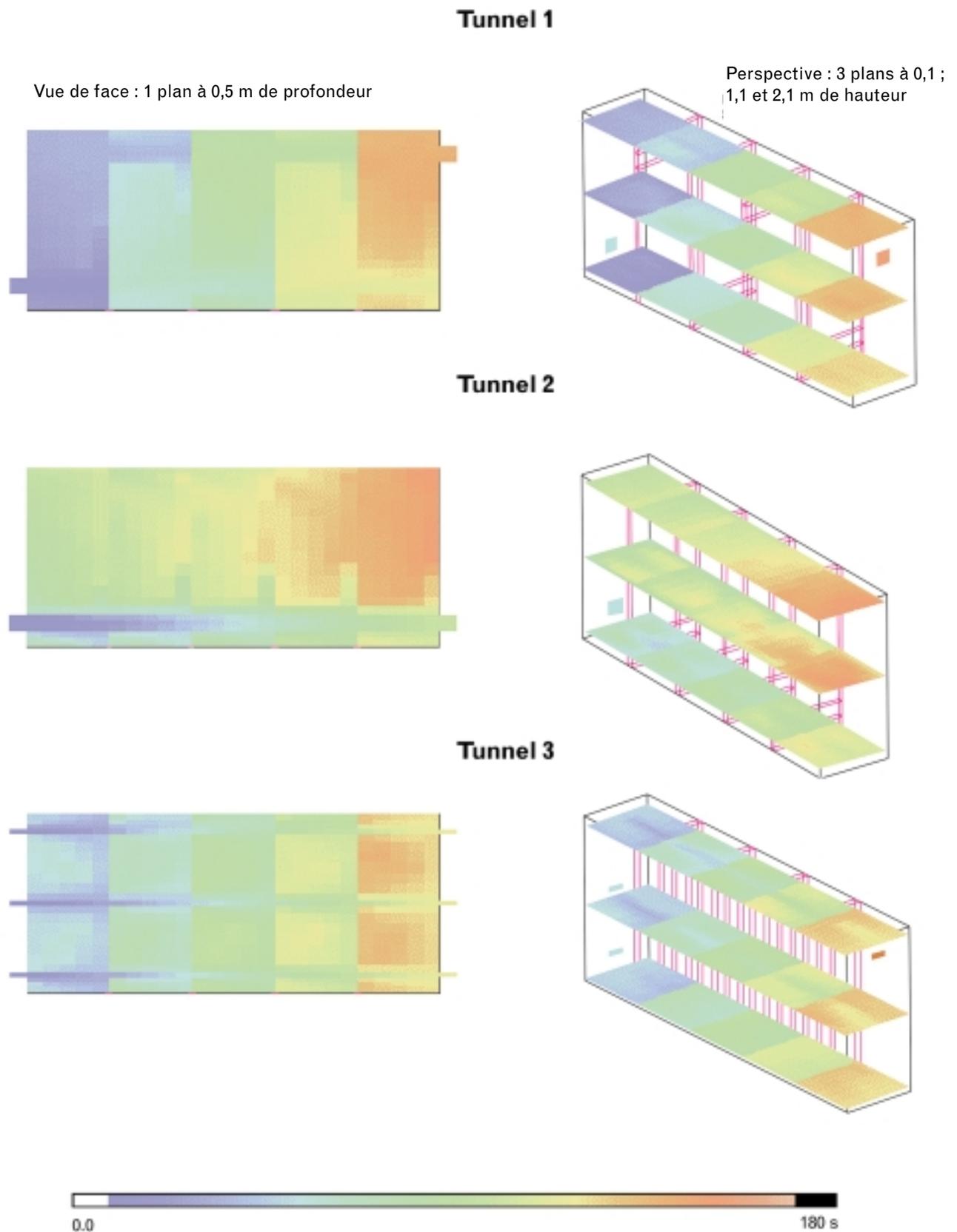


Fig. 4. Cartes des âges de l'air neuf - Tunnel1, tunnel2, tunnel3 - *Maps of fresh air ages - Tunnel1, tunnel2, tunnel3*

2.2.2. Résultats et analyse

Les résultats obtenus pour ces différentes configurations sont donnés [tableau II](#). À titre indicatif, les résultats relatifs à la configuration tunnel1 y sont également rappelés.

Ces résultats sont également repris sous forme d'histogrammes présentés [figure 5](#).

Remarque

Pour la configuration tunnel1_1po, le temps d'assainissement moyen calculé dans le compartiment 4, tel qu'il a été défini, est de 130 s. Par contre, si le même calcul est effectué dans le compartiment 3, ce temps passe à 250 s. Rappelons que, dans cette configuration, la porte entre les compartiments 2 et 3 est ouverte.

La présence d'une personne dans un sas amont n'entraîne pas de modifications des résultats (comparaisons tunnel1 et tunnel1_h).

L'ouverture d'une ou deux portes a pour conséquence immédiate une augmentation du débit de ventilation (configurations tunnel1_1po et tunnel1_2po). Il en résulte un accroissement de la vitesse moyenne dans le volume de contrôle et une réduction du nombre de points à vitesse inférieure à $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ (facteur F_i). Malgré cette augmentation du débit de ventilation, le temps d'assainissement moyen est proche de quatre minutes lorsqu'une porte est ouverte. Cette valeur se trouve à la limite du seuil fixé pour ce critère. Par contre, ce seuil est largement dépassé dans la configuration tunnel1_2po. Le temps à prévoir pour assurer une évacuation de la pollution passe à près de sept minutes, approximativement le triple du temps calculé en situation normale toutes portes fermées.

Pour ce type de tunnel, l'ouverture d'une ou deux portes a une nette influence sur la qualité de la ventilation. Lorsqu'une seule porte est ouverte, situation correspondant au passage d'un compartiment à l'autre, les performances de la ventilation permettent de rester proche du critère d'admissibilité en termes de temps de décontamination. Par contre, en situation anormale, avec deux portes ouvertes, un net dysfonctionnement du système est mis en évidence et ce, malgré l'augmentation du débit.

Enfin, la chute de la différence de pression, simulée dans la configuration tunnel1_10Pa, entraîne une réduction du débit de ventilation de près de 30 %. Le temps d'assainissement moyen reste dans les limites fixées. Par contre, la vitesse moyenne dans le volume de contrôle

TABLEAU II

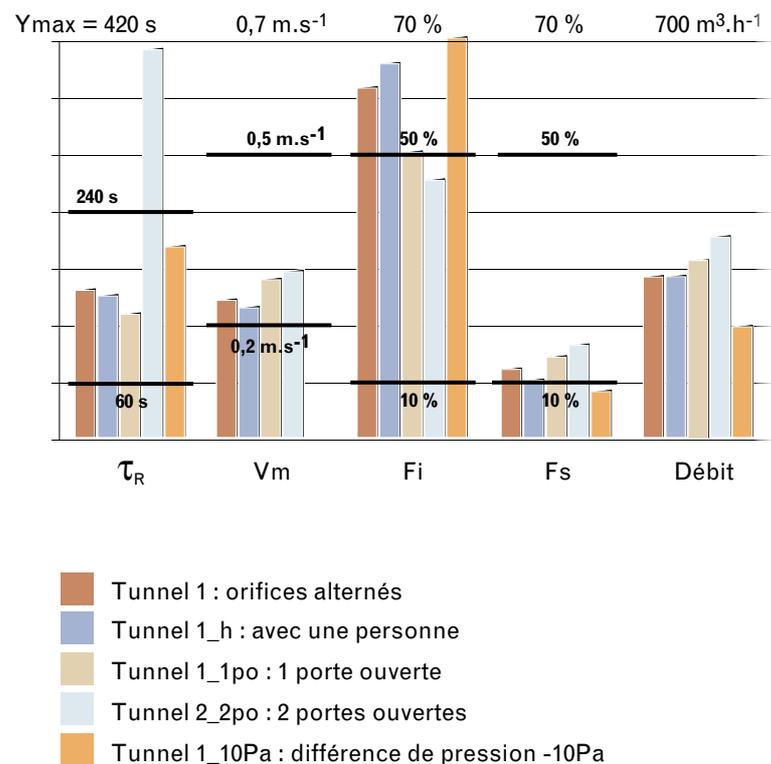
CONFIGURATIONS TUNNEL1, TUNNEL1_h, TUNNEL1_1po, TUNNEL1_2po, TUNNEL1_10Pa (*)
- TUNNEL1, TUNNEL1_h, TUNNEL1_1po, TUNNEL1_2po, TUNNEL1_10Pa CONFIGURATIONS

Configurations	τ_R (s)	Vm (m.s ⁻¹)	Fi (%)	Fs (%)	Débit (m ³ .h ⁻¹)
tunnel1 : orifices alternés	155	0,24	62	12	280
tunnel1_h : avec une personne	150	0,23	66	10	280
tunnel1_1po : une porte ouverte	130/250	0,28	51	14	320
tunnel1_2po : deux portes ouvertes	410	0,30	45	16	360
tunnel1_10Pa : dif. de pression -10Pa	205	0,17	77	8	200

(*) Résultats des calculs exprimés en :

- temps d'assainissement moyen (τ_R en s) ;
- vitesse moyenne dans le volume de contrôle (Vm en m.s⁻¹) ;
- fraction du volume de contrôle où l'intensité de la vitesse de l'air est inférieure à $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ (F_i en %) ;
- fraction du volume de contrôle où l'intensité de la vitesse de l'air est supérieure à $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ (F_s en %) ;
- débit de ventilation (m³.h⁻¹).

Fig. 5. Schématisation des résultats - Diagram of the results



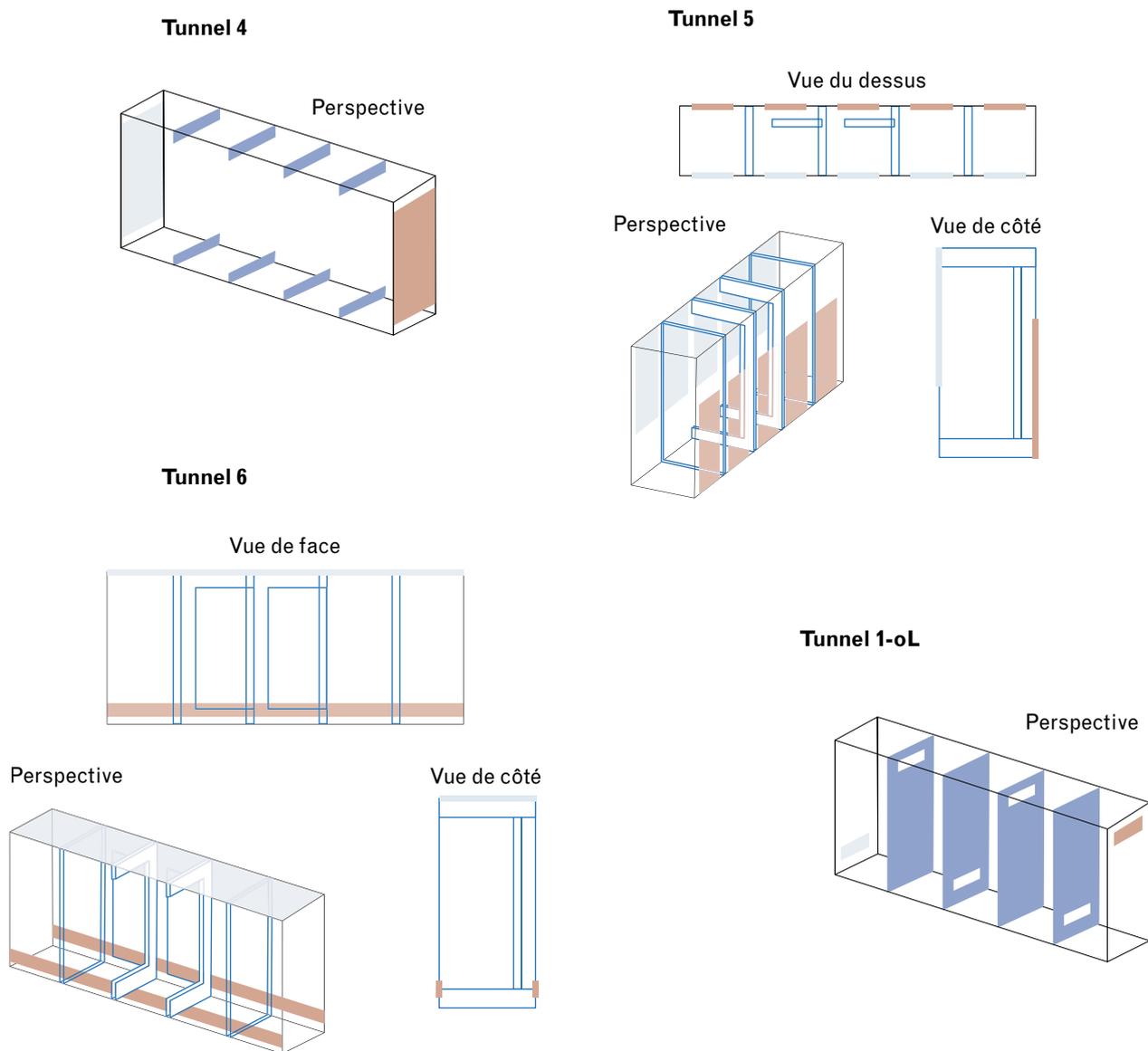


Fig. 6. Schémas des configurations tunnel4, tunnel5, tunnel6 et tunnel1_oL - Diagrams of the tunnel4, tunnel5, tunnel6 and tunnel1_oL configurations

chute à $0,17 \text{ m/s}^{-1}$ et, pour plus des trois quarts des points de ce volume, la vitesse de l'air est inférieure à $0,2 \text{ m/s}^{-1}$. Pour cette configuration, une différence de -10 Pa entre les deux extrémités du tunnel ne permet pas d'assurer dans le compartiment considéré une vitesse moyenne supérieure à $0,2 \text{ m/s}^{-1}$.

Remarque

Le débit de ventilation Q est relié à la chute de pression ΔP par une relation qui peut être mise sous la forme simplifiée $Q = K \times (\Delta P)^{1/2}$, avec K fonction notamment des caractéristiques des orifices de passage de l'air. Le débit de ventilation obtenu à partir d'une chute de pression de 20 Pa est de $280 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, soit pour cette configuration géométrique un coefficient K voisin de $62,6$. Le débit de ventilation peut alors être recalculé à partir de la connaissance de la différence de pression. Ainsi, tous les autres para-

mètres étant fixés, un ΔP de 10 Pa donne le débit de ventilation de :

$$62,6 \times \sqrt{10} = 198 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

très proche des $200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ obtenus par la simulation numérique.

2.3. Autres configurations possibles

Il est apparu opportun ici, d'une part, d'étudier les performances de dispositifs particuliers proposés dans certains guides [6], notamment ceux à ventilation indépendante et, d'autre part, de faire une proposition de modification de la configuration tunnel1, afin d'améliorer sensiblement ses performances.

2.3.1. Description

Quatre configurations supplémentaires sont étudiées. Elles sont présentées *figure 6* et correspondent à la description ci-après :

■ Configuration tunnel4 : tunnel à flux laminaire fonctionnant par la dépression du confinement, sans portes intérieures ou avec des portes à persiennes [6].

La configuration, sans portes intérieures, est étudiée dans cet article.

Le débit souhaité est obtenu par des panneaux de grandes dimensions, filtrants ou à tôle perforée, placés en entrée et sortie du tunnel.

La vitesse au niveau de ces panneaux est fixée à la vitesse minimale recommandée de $0,2 \text{ m/s}^{-1}$ dans le tunnel.

Elle est supposée uniforme sur toute la surface des panneaux. Leurs dimensions sont de 1,0 x 1,80 m² pour obtenir un débit proche de 1 300 m³.h⁻¹.

■ Configuration tunnel5 : tunnel à cinq compartiments à ventilation indépendante. Chacun des compartiments est ventilé séparément par un dispositif constitué d'un plénum d'introduction placé en partie haute sur une paroi latérale et d'une reprise en partie basse sur la paroi latérale opposée.

Les dimensions des orifices de passage de l'air sont de 0,60 x 1,40 m² et la vitesse est fixée uniformément à 0,30 m/s, soit un débit de ventilation d'environ 900 m³.h⁻¹ par compartiment (4 530 m³.h⁻¹ pour le tunnel). Deux portes de la partie centrale du tunnel sont ouvertes.

■ Configuration tunnel6 : tunnel à cinq compartiments à ventilation indépendante à flux descendant. Chaque compartiment est ventilé séparément avec une surface diffusante en plafond de 1,0 x 1,0 m² et deux reprises de 1,0 x 0,20 m² placées sur les parois latérales à environ 0,20 m du sol. La vitesse d'introduction est fixée uniformément à 0,24 m.s⁻¹. Elle est de 0,60 m.s⁻¹ sur les reprises. A ces vitesses correspond un débit d'environ 860 m³.h⁻¹ par compartiment (4 350 m³.h⁻¹ pour le tunnel). Dans l'étude de cette configuration, deux portes de la partie centrale du tunnel sont ouvertes.

■ Configuration tunnel1_oL : tunnel à cinq compartiments, identique à tunnel1, mais avec des orifices de passage d'air plus importants de 0,60 x 0,20 m².

2.3.2. Résultats et analyse

Le *tableau III* présente les résultats obtenus pour ces différentes configurations. Y sont également rappelés ceux de la configuration tunnel1.

Remarque :

Pour tunnel1 et tunnel1_oL, les résultats relatifs aux vitesses sont donnés pour deux compartiments : 5 puis 4.

La *figure 7* synthétise ces résultats sous forme d'histogrammes.

Les systèmes à ventilation séparée à débit très élevé (supérieur à 4 000 m³.h⁻¹) sont les plus performants du point de vue décontamination de l'air (configurations tunnel5 et tunnel6).

Le temps d'assainissement moyen est très faible, inférieur ou égal à 5 s, pour une

TABLEAU III

CONFIGURATIONS TUNNEL1, TUNNEL4, TUNNEL5, TUNNEL6 ET TUNNEL1_oL (*)

- TUNNEL1, TUNNEL4, TUNNEL5, TUNNEL6 AND TUNNEL1_oL CONFIGURATIONS

Configurations	τ_R (s)	Vm (m.s ⁻¹)	Fi (%)	Fs (%)	Débit (m ³ .h ⁻¹)
tunnel1 : orifices alternés	155	0,24 / 0,15	62 / 74	12 / 0	280
tunnel4 : sans portes intérieures	30	0,19	39	0	1 300
tunnel5 : ventilation indépendante latérale	< 5	0,21	43	0	4 530
tunnel6 : ventilation indépendante descendante	5	0,22	22	0	4 350
tunnel1_oL : orifices alternés larges	45	0,45 / 0,30	26 / 24	31 / 11	1 130

(*) Résultats des calculs exprimés en :

- temps d'assainissement moyen (τ_R en s) ;

- vitesse moyenne dans le volume de contrôle (Vm en m.s⁻¹) ;

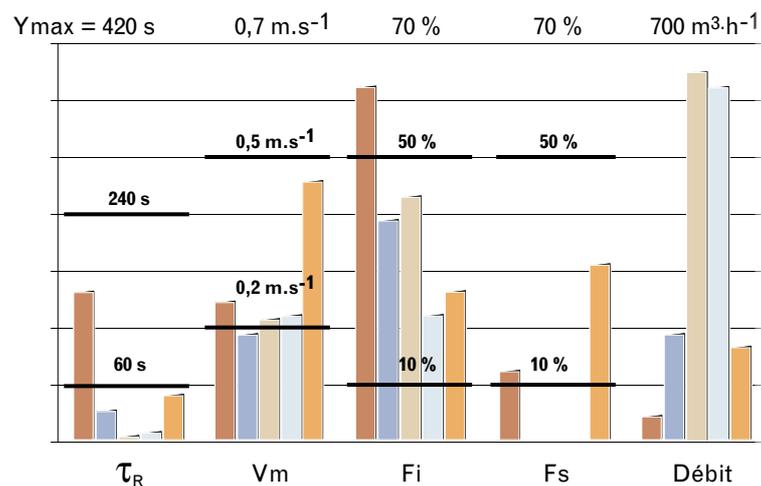
- fraction du volume de contrôle où l'intensité de la vitesse de l'air est inférieure à 0,2 m.s⁻¹ (Fi en %) ;

- fraction du volume de contrôle où l'intensité de la vitesse de l'air est supérieure à 0,5 m.s⁻¹ (Fs en %) ;

- débit de ventilation (m³.h⁻¹).

Fig. 7. Schématisation des résultats

- Diagram of the results



- Tunnel1 : orifices alternés
- Tunnel4 : sans portes intérieures
- Tunnel5 : ventilation indépendante latérale
- Tunnel6 : ventilation indépendante descendante
- Tunnel1_oL : orifices alternés larges

première limite fixée à une minute et la vitesse moyenne est voisine de 0,2 m.s⁻¹. Pour la configuration tunnel₆, la fraction de volume où l'intensité de la vitesse est inférieure à 0,2 m.s⁻¹ est également très faible, alors que les points supérieurs à 0,5 m.s⁻¹ sont inexistantes.

Mais les débits de ventilation mis en œuvre, de l'ordre de 4 500 m³.h⁻¹, sont également très importants.

La configuration tunnel₄, sans portes intérieures, présente des résultats satisfaisants avec un temps d'assainissement de 30 s pour un débit de 1 400 m³.h⁻¹.

La vitesse moyenne dans le volume de contrôle étant très légèrement inférieure à 0,2 m.s⁻¹, il conviendrait d'augmenter légèrement ce débit de ventilation pour dépasser cette limite, ce qui permettrait également d'améliorer le facteur Fi. Il est cependant préférable de conserver les cloisons pour éviter le transfert de polluant entre les différentes zones du tunnel.

Pour la dernière configuration tunnel_{1_0L}, correspondant à la configuration initiale tunnel₁ mais avec des orifices de passage d'air élargis, le temps d'assainissement moyen est de 45 s, valeur inférieure au premier seuil de une minute. Le débit de ventilation mis en œuvre pour une telle configuration est de 1 130 m³.h⁻¹.

Suivant le compartiment, la vitesse moyenne dans le volume de contrôle est comprise entre 0,3 et 0,45 m.s⁻¹, avec environ 25 % des points de ce volume présentant une vitesse de l'air inférieure à 0,2 m.s⁻¹. Par contre, 11 à 31 % des points présentent une vitesse supérieure à 0,5 m.s⁻¹. Il est donc possible de réduire légèrement ce débit de façon à améliorer les résultats relatifs au confort (Fs) tout en restant dans les limites admises pour les autres critères. Pour ce type de configuration, le débit optimum se situe aux environs de 1000 m³.h⁻¹.

Remarque :

Dans la relation $Q = K \times (\Delta P)^{1/2}$, précédemment définie, pour la même chute de pression de 20 Pa, il est possible de considérer en première approximation que le coefficient K varie uniquement en fonction des surfaces des ouvertures.

Ainsi, pour la différence de pression de 20 Pa, le coefficient K est voisin de 7 000 pour des ouvertures de 0,2 x 0,2 m² et un débit de 280 m³.h⁻¹. Il est égal à 9 416 avec des ouvertures de 0,2 x 0,6 m² et un débit de 1 130 m³.h⁻¹.

Par extrapolation, un débit de 1 000 m³.h⁻¹ conduit à une première estimation du coefficient K voisin de 9 000 et des dimensions des ouvertures de 0,2 x 0,55 m².

CONCLUSIONS

Sur la plupart des chantiers de retrait de l'amiante, l'assainissement de l'air du tunnel d'accès du personnel est assuré par un flux d'air neuf circulant, sous l'effet de la dépression, de l'extérieur du confinement vers l'intérieur ou zone à traiter.

Une évaluation des performances de diverses configurations aérauliques possibles du tunnel d'accès est réalisée par simulation numérique avec EOL3D.

Différents indices sont définis pour effectuer la comparaison :

- le temps d'assainissement (évalué à partir de l'âge moyen du polluant au niveau des voies respiratoires d'un opérateur),
- la fraction du volume de la zone occupée par l'opérateur où les vitesses sont inférieures à 0,2 m.s⁻¹,
- et la fraction du même volume où les vitesses sont supérieures à 0,5 m/s.

Les deux premiers indices caractérisent la décontamination du tunnel qui devrait être favorisée par une augmentation des débits de ventilation. A l'opposé, le confort thermique pris en compte à l'aide du dernier indice nécessiterait plutôt une limitation des flux d'air neuf.

Pour un tunnel dont le fonctionnement est assuré par la dépression entre la zone de travail et l'extérieur, il convient tout d'abord de cloisonner chaque compartiment pour minimiser les transferts de pollution des zones les plus polluées vers les zones propres. Il faut ensuite positionner les orifices de passage de l'air sur les cloisons, de façon à assurer le balayage de l'intégralité du volume par le flux d'air. Tout dispositif n'engendrant qu'un écoulement localisé dans la partie basse (ou haute) du tunnel est à proscrire.

C'est le cas, par exemple, des tunnels où les portes intérieures sont remplacées par des rideaux souples.

Le tunnel à orifices alternés présente les résultats les plus intéressants. Pour un débit de 280 m³/h, il est possible d'obtenir l'évacuation du polluant d'un compartiment en moins de trois minutes. Aucune altération des résultats n'est observée en fonctionnement normal, sous une différence de pression de 20 Pa, suite à la présence d'une personne ou à l'ouverture d'une porte. Par contre, une altération des performances est observée lorsque la dépression chute à 10 Pa ou lorsque deux portes intérieures sont laissées ouvertes. Pour obtenir un temps d'assainissement moyen inférieur à une minute, il convient d'augmenter la surface des orifices de passage de l'air. Ce temps est obtenu pour un débit d'environ 1 000 m³/h mais au détriment d'un certain confort avec, dans ce cas, une augmentation sensible du niveau des vitesses de l'air.

Les systèmes à ventilation indépendante de l'enceinte de confinement donnent de très bons résultats suivant les critères précédemment définis. Cependant, les débits à prévoir sont importants : de l'ordre de 4 500 m³/h pour un tunnel de 10 à 15 m³. Le surcoût, la mise en œuvre et leur utilisation plus complexes sont certainement un frein à l'adoption de cette solution.

Sur le terrain, il conviendra de trouver un juste compromis, en fonction des situations, sans négliger d'autres facteurs non pris en compte dans cette étude : par exemple, les moyens à mettre en œuvre pour assurer le niveau adéquat des températures ainsi que les facteurs comportementaux humains.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Travaux de retrait ou de confinement d'amiante ou de matériaux en contenant. Guide de prévention. Ministère de l'emploi et de la solidarité. Paris, INRS-OPPBT, ED 815, 2000, 100 p.

[2] DANET J.P., DUBERNET F., MAGNIEZ G., AUSSSEL H., ROLIN A. - Le bilan aéraulique des chantiers d'amiante. Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et Sécurité du Travail, 2000, 181, ND 2137, 32 p.

[3] FONTAINE J.R., BRACONNIER R., RAPP R., AUBERTIN G. - EOL : un logiciel de ventilation prévisionnelle applicable à l'assainissement de l'air des locaux de travail. Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et Sécurité du Travail, INRS, 1996, 165, ND 2029, 16 p.

[4] DANET J.P. - Retrait de matériaux friables contenant de l'amiante - Fonctionnement d'un confinement dynamique. Mémoire d'ingénieur CNAM. Bordeaux, juin 2001, N° d'ordre 333.

[5] NF EN ISO 7730 - Ambiances thermiques modérées. Détermination des indices PMV et PPD et spécification des conditions de confort thermique. Paris, AFNOR, 1995, 40 p.

[6] Aéraulique générale des chantiers d'amiante. Les Guides Pratiques d'UNICLIMA. Paris, Éditions SEPAR, juillet 1999.