POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Excavation mécanique dans des formations rocheuses susceptibles de contenir de l'amiante: tests préliminaires et résultats des respirateurs à ventilation assistée THP3 dans

Original
Excavation mécanique dans des formations rocheuses susceptibles de contenir de l'amiante: tests préliminaires et résultats des respirateurs à ventilation assistée THP3 dans la galerie de reconnaissance de La Maddalena du projet Tunnel Euralpin Lyon – Turin / Sorlini, A., Patrucco, M., Pira, E., Nebbia, R., Garzaro, G.. - (2021). (XVIème Congrès international de l'association française des tunnels et de l'espace souterrain, AFTES 2020 posposte à AFTES 2021 Paris 6-8 Septembre 2021).

Availability:
This version is available at: 11583/2945560 since: 2021-12-15T12:55:58Z

Publisher:
AFTES

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright
GENERICO -- per es. Nature : semplice rinvio dal preprint/submitted, o postprint/AAM [ex default]

(Article begins on next page)

19 November 2026

Excavation mécanique dans des formations rocheuses susceptibles de contenir de l'amiante: tests préliminaires et résultats des respirateurs à ventilation assistée THP3 dans la galerie de reconnaissance de La Maddalena du projet Tunnel Euralpin Lyon – Turin

Mechanical tunnelling in rock formations suspected of containing asbestos: preliminary tests set up and results of THP3 powered respirators in the exploratory tunnel of La Maddalena, part of the Tunnel Euralpin Lyon-Turin project.

Achile SORLINI, Tunnel Euralpin Lyon Torin – TELT Sas, Torino, Italia
Mario PATRUCCO, Università degli Studi di Torino, Italia
Enrico PIRA, Università degli Studi di Torino, Italia
Rebecca NEBBIA, Politecnico di Torino, Italia
Giacomo GARZARO, Università degli Studi di Torino, Italia

Résumé

En Europe, le développement de systèmes de transport combiné rail-route modernes implique le creusement d'importants tunnels, notamment à travers les Alpes. Du point de vue de la santé et de la sécurité au travail, ces travaux sont sans aucun doute critiques, notamment pour le grand nombre de formations rocheuses susceptibles de contenir de l'amiante. La distribution des minéraux d'amiante est très irrégulière et incompatible avec les modèles géostatistiques. Par conséquent, quand la présence d'amiante n'est pas confirmée lors de l'excavation d'un tunnel mais qu'elle représente une probabilité, le seul moyen d'effectuer une évaluation est à travers les résultats de l'échantillonnage des déblais et des poussières. Le délai entre le début de l'émission due à l'excavation et la disponibilité des résultats des contrôles instrumentaux peut conduire à une dispersion incontrôlée des fibres dans les lieux de travail souterrains. Il se pose donc le problème de la protection de la santé des travailleurs pendant le temps nécessaire pour vérifier la présence réelle d'amiante. Par conséquent, dans le cadre d'une recherche réalisée en collaboration entre TELT, l'École Polytechnique et l'Université de Turin, l'utilisation des appareils de protection respiratoire à ventilation assistée a été évaluée sur un chantier d'excavation mécanique, la galerie de reconnaissance de La Maddalena où, par ailleurs, l'amiante n'a jamais été trouvé. Les conditions d'utilisation possible et les causes d'inconfort des respirateurs à ventilation assistée ont été étudiées à l'aide d'un questionnaire spécialement conçu à cet effet. La note présente les résultats de l'enquête qui pourront servir de référence utile pour la gestion de la sécurité et de la santé des travailleurs.

Abstract

The development of modern combined road-rail transport in Europe involves the boring of long tunnels, especially through the Alps. From a health and safety perspective, these works are certainly critical, because of the large number of rock formations which might contain asbestos. The distribution of asbestos minerals is highly irregular and incompatible with geostatistical models. Consequently, when the presence of asbestos is probable but not confirmed during tunnel excavation work, the only evaluation method is to test samples of the excavated materials and dusts and examine the results. The delay between the start of emissions caused by excavation and the availability of the results of instrumental checks can lead to significant uncontrolled dispersion of the fibres on underground worksites. This therefore raises the problem of protecting workers' health during the time necessary to verify the presence of asbestos.
The joint research carried out by TELT, the Polytechnic University and the University of Turin has evaluated the use of ventilation-assisted respiratory protection on a mechanical excavation worksite, La Maddalena exploratory tunnel, where asbestos has never been detected. In particular, the possible conditions of use and causes of discomfort when using respiratory protective equipment were studied using a specially designed questionnaire. The paper presents the results of the survey, which can prove a useful reference in managing workers' health and safety.

Excavation mécanique dans des formations rocheuses susceptibles de contenir de l'amiante: tests préliminaires et résultats des respirateurs à ventilation assistée THP3 dans la galerie de reconnaissance de La Maddalena du projet Tunnel Euralpin Lyon - Turin

Mechanical tunnelling in rock formations suspected of containing asbestos: preliminary tests set up and results of THP3 powered respirators in the exploratory tunnel of La Maddalena, part of the Tunnel Euralpin Lyon-Turin project.

Achile SORLINI, Tunnel Euralpin Lyon Torin – TELT Sas, Torino, Italia
Mario PATRUCCO, Università degli Studi di Torino, Italia
Enrico PIRA, Università degli Studi di Torino, Italia
Rebecca NEBBIA, Politecnico di Torino, Italia
Giacomo GARZARO, Università degli Studi di Torino, Italia

1 Introduction

La construction de tunnels fait partie des activités planifiées dans de nombreuses régions du monde, notamment en Europe, pour l'expansion des réseaux ferroviaires et routiers à grande vitesse (Barra Caracciolo et al. 2019).
La réalisation de ce type d'ouvrage implique souvent de creuser auparavant une galerie de reconnaissance, pour évaluer les caractéristiques des amas rocheux concernés et les types de minéraux présents ; en effet, notamment dans certaines formations, il est possible d'y déceler de fortes teneurs en quartz et la présence éventuelle d'amiante. De tels cas imposent une analyse de risque préliminaire (directives européennes 89/391 et 92/57), nécessairement fondée sur le recueil d'informations détaillées concernant la présence, la qualité, la quantité et le modèle de répartition spatiale des minéraux critiques.
On sait en outre que les formations de quartz montrent une répartition plutôt uniforme, compatible avec les modèles géostatistiques, tandis que la répartition des minéraux amiantifères est très irrégulière, leur formation au cours du processus métamorphique dépendant de la pression, de la température, de la composition des roches hôtes et de l'historique structurel (Labagnara et al., 2013a). Par conséquent, lorsque la présence d'amiante pendant l'excavation n'est pas directement confirmée mais qu'elle constitue une option probable, la reconnaissance des fibres d'amiante est évaluée avec les résultats d'échantillonnages directs effectués sur les matériaux en place et excavés, ainsi que dans l'atmosphère du chantier. Inévitablement, se pose le problème d'un retard substantiel entre le moment de la dispersion des fibres dans l'air et la disponibilité des résultats d'analyses de laboratoire, pouvant entraîner une dispersion incontrôlée et non négligeable de fibres d'amiante. C'est ce qu'indique l'analyse de l'arbre des événements de la Figure 1 (Wang et Roush, 2000).

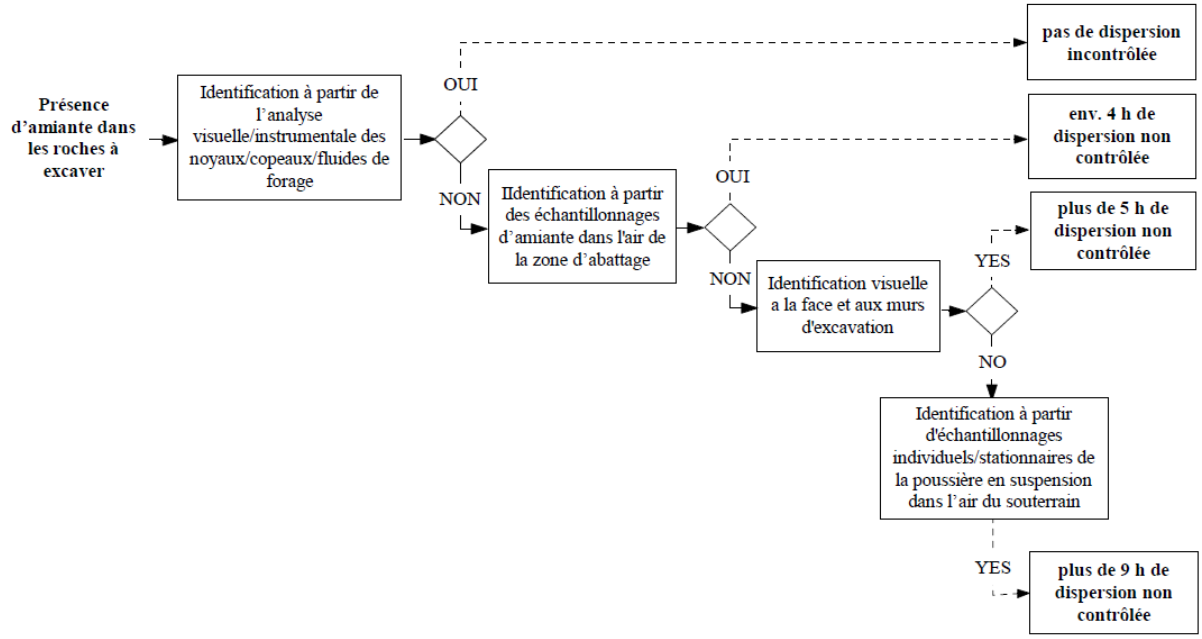


Figure 1. Analyse de l'arbre des événements sur le retard entre le début de la libération de polluants dans l'atmosphère du souterrain et la prise de conscience de la situation. L'exemple concerne un cas d'excavation par tunnelier (TBM) ouvert, vitesse d'avancement 20 m/jour, échantillonnage continu de l'amiante dans l'air, présence permanente de géologues dans la zone d'excavation. Labagnara et al. (2016).

Dans un tel cas, les activités d'excavation pourraient être envisagées et réalisées en adoptant des mesures techniques et organisationnelles spécifiques et adaptées à un véritable « chantier amiante », mais dans le cas présent (présence du facteur de risque non confirmée) ceci pourrait s'avérer excessif et insoutenable sur le plan économique (Labagnara et al. 2016). Par ailleurs, la nécessité de garantir également la santé et la sécurité des travailleurs pendant la durée nécessaire à l'identification précise des situations exige des solutions temporaires (lignes directrices européennes SHCMOEI), telles que des équipements de protection individuelle (EPI) pour la protection des voies respiratoires.
Comme le soulignent Akbar-Khanzadeh et al. (1995), les travailleurs sont souvent réticents à utiliser les EPI en raison de la gêne perçue. Considérant que la gêne occasionnée par les EPI peut interférer de manière critique avec la capacité des travailleurs à exercer une série d'activités typiques du creusement de tunnels, il est nécessaire d'identifier les EPI offrant une sécurité, des performances et un confort optimum.
Par ailleurs, tous les travailleurs ne peuvent pas porter ces EPI : les personnes atteintes de maladies cardiovasculaires, de réduction de la fonction pulmonaire causée par de l'asthme ou une bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO), de troubles neurologiques ou musculo-squelettiques, de réduction des fonctions sensorielles ou de troubles psychologiques, pourraient ne pas être à même de supporter ces dispositifs (Johnson and Berlin, 1973).
Selon les indications du Manuel technique de l'Administration de la sécurité et de la santé au travail (OSHA), il est nécessaire de définir un programme d'évaluation médicale pour déterminer la charge physiologique des travailleurs qui devront utiliser les équipements de protection individuelle (EPI). Cette évaluation devrait tenir compte des éléments suivants : la présence des états médicaux décrits ci-dessus, la charge imposée par l'environnement d'excavation au sein du tunnel, la charge de travail prévue, les paramètres anthropométriques du travailleur, ainsi que la durée et la fréquence d'utilisation des EPI. Il faut également tenir compte de la charge imposée par l'appareil respiratoire lui-même : stress musculo-squelettique, limitation des capacités auditives, visuelles et olfactives, stress psychologique et isolement de l'environnement de travail.
Le présent travail établit un rapport sur les résultats d'une étude pilote axée sur les perceptions de confort des travailleurs (en nombre limité, mais exhaustif dans le contexte) opérant avec des EPI sélectionnés durant le creusement mécanique d'une galerie de reconnaissance de diamètre moyen par tunnelier (TBM) ouvert dans des formations rocheuses contenant potentiellement des minéraux amiantifères, mais dont l'absence a été confirmée. Cette étude visait à recueillir des informations préliminaires, déterminer les facteurs critiques liés à l'usage de tels dispositifs dans les conditions

opérationnelles spécifiques, et formuler des propositions d'amélioration spécifiques au contexte. Ces résultats pourront constituer une base de départ consolidée pour la mise en place d'une analyse plus approfondie des travailleurs participant au creusement de longs tunnels avec une section ferroviaire standard.

2 Matériel et méthodes

2.1 Choix des appareils respiratoires

Durant la première phase, les dispositifs filtrants à tester ont été sélectionnés dans une liste de la norme technique européenne EN 529:2005. Le Tableau 1 établit un résumé des différents types de dispositifs filtrants.

Tableau 1. Types de dispositifs filtrants et leur facteur de protection assignés (FPA).

Appareils respiratoires	Classe	FPA (utilisés en Italie)
Appareils respiratoires sans assistance		
Demi-masque	FFP1	4
	FFP2	10
	FFP3	30
Masque facial complet	P1	4
	P2	15
	P3	400
Appareils respiratoires à ventilation assistée ou forcée		
Appareil respiratoire électrique à cagoule/casque	THP1	5
	THP2	20
	THP3	200
Appareil respiratoire à demi-masque/masque complet	TMP1	10
	TMP2	100
	TMP3	400

Les appareils respiratoires anti-poussières à ventilation non assistée filtrent l'air inspiré par une action mécanique généralement associée à une action électrostatique. L'inconvénient majeur de ces dispositifs est la création d'une pression négative à l'intérieur du masque pendant l'inhalation. Les appareils respiratoires à ventilation assistée ou forcée utilisent quant à eux un ventilateur électrique pour forcer le passage de l'air à travers le filtre et l'envoyer dans un masque ou dans une cagoule/un casque, réduisant ainsi la possibilité de création d'une pression négative dans le masque pendant l'inhalation (Szeinuk et al. 2000).
Le facteur de protection assigné (FPA) est un paramètre à prendre en compte dans le choix des appareils respiratoires. Bien que l'appareil respiratoire à demi-masque/masque complet TMP3 présente le FPA le plus élevé, la nécessité d'associer la protection respiratoire à une protection de la tête (EN 397:2012/A1:2012), l'usage d'un casque étant obligatoire sur les chantiers, a conduit au choix de l'appareil respiratoire électrique à cagoule/casque THP3 comme dispositif le plus adapté.
Le Tableau 2 résume les exigences essentielles (et leurs normes de référence) auxquelles devraient répondre les appareils respiratoires à utiliser lors des opérations de creusement des galeries.

Tableau 2. Exigences essentielles et normes de référence.

Exigence	Norme de référence	Motivation
Classe de protection THP3	EN 12941:2009	Utilisation d'appareils respiratoires à ventilation assistée ou forcée dans les environnements de creusement de galeries susceptibles de présenter des fibres d'amiante.
Ventilation assistée	EN 12941:2009, EN 12942:2009	Aucune résistance respiratoire, adapté à un usage prolongé et aux activités difficiles.

À cagoule/casque	EN 397:2012	Pour associer la protection respiratoire à une protection de la tête (dans ce cas, l'usage du casque est obligatoire).

Les équipements suivants ont été sélectionnés parmi les appareils respiratoires disponibles sur le marché et satisfaisant aux exigences du Tableau 2 :

- casque à visière Sundstrom Safety(R) SR 580, classe de protection THP3 si utilisé avec les filtres adaptés, d'un poids d'environ 875 g avec le tuyau d'aspiration (données issues de la brochure technique du fabricant) ;
- unité de ventilation Sundstrom Safety(R) SR 500, 2 vitesses de flux (175 et 240 l/min), températures de fonctionnement -10 / +55 °C, humidité relative de fonctionnement < 90 %, poids d'environ 1350 g (données issues de la brochure technique du fabricant). Le ventilateur est équipé d'une batterie standard de 14,8 V et 2,2 Ah, de filtres à particules P3 et de préfiltres.

2.2 Tracé de l'ouvrage, technique et technologie de creusement

Les appareils respiratoires sélectionnés ont été testés dans la galerie de reconnaissance « La Maddalena » de la ligne ferroviaire Lyon-Turin (entrepreneur Tunnel Euralpin Lyon Torino SaS). Ce tunnel se trouve dans les Alpes nord-occidentales, dont la situation géologique, illustrée Figure 2 (Labagnara et al. 2013b) est caractérisée par la présence de quartz et d'amiante.

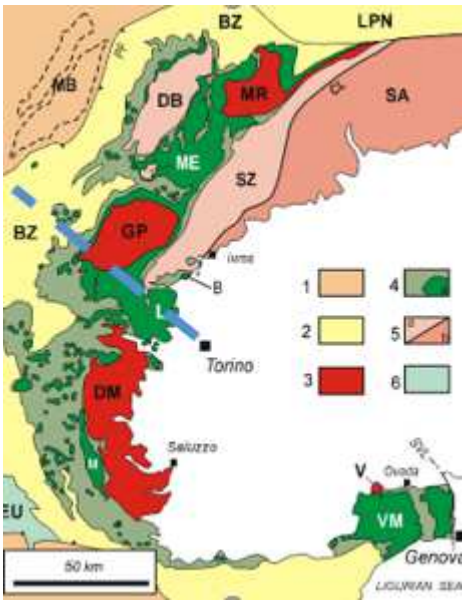


Figure 2. Carte tectonique simplifiée des Alpes occidentales. Image modifiée par Castelli et al. (2002). La ligne bleue désigne la zone concernée et donne une idée de la direction générale de la galerie ; elle met en évidence la possibilité de confrontation à des formations contenant du quartz et de l'amiante.

La galerie de reconnaissance « La Maddalena » a été creusé entre 2012 et 2017 sur une longueur de 7 020 m avec un tunnelier ouvert de 6,3 m de diamètre et d'une longueur totale de 250 m. La Figure 3 illustre la machine et résume ses principales données techniques.



Figure 3. Tunnelier dans la galerie de reconnaissance « La Maddalena ».

Le type de tunnelier utilisé a permis l'observation directe du profil rocheux creusé et le recueil de données détaillées pour les études géologiques et géotechniques (Figure 4). Les unités géologiques rencontrées ont été les suivantes : de 0+000 à 0+120 dépôts fluvio-glaciaires ; roches carbonatées tectonisées 0+200 ; de 0+200 à 1+150 gneiss aplitique du complexe d'Ambin (AMC) ; de 1+150 à 1+350 on passe du gneiss albitique au micaschiste quartzique du complexe d'Ambin (AMD) ; au-delà de la chaîne de 1+350 micaschiste du complexe de la Clarée (CLR).

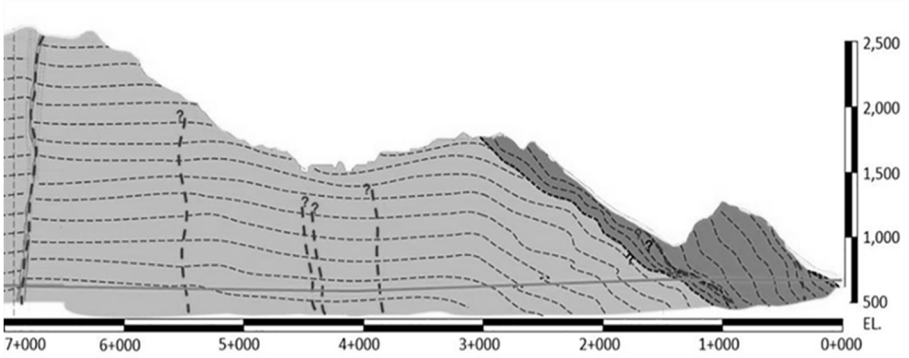


Figure 4. Profil géologique schématique, présence de gneiss et micaschistes à haute teneur en quartz, le long du tracé du tunnel de La Maddalena.

Les deux postes de travail sur la machine ont été équipés pour permettre le boulonnage des roches sans interrompre l'excavation.
Les températures rocheuses ont augmenté proportionnellement à la couverture, dépassant les 45 degrés centigrades à la couverture maximale de 2 000 m.
Selon le système de classification des masses rocheuses (RMR, Rock Mass Rating) (Bieniawski 1989), 47,1 % du tunnel ont été creusés dans une bonne masse rocheuse (classe II) ; 46,1 % dans une roche moyenne (classe III) ; 6,1 % dans une roche « excellente » (classe I) 0,7 % dans une masse rocheuse « médiocre ».
La masse rocheuse était en général très dure et abrasive, avec une force de compression uniaxiale souvent supérieure à 200 MPa ainsi qu'une abrasivité de Cerchar (Plinninger e Thuro 2004) et une dureté dans la plage « extrêmement abrasive » - « extrêmement dure ». La teneur en quartz était généralement de 40 à 50 %, avec des pointes à 80 %.

2.3 Conception et échantillon de l'étude

Les données qualitatives ont été croisées avec des données quantitatives pour permettre une meilleure compréhension des facteurs d'inconfort des appareils respiratoires étudiés (Paturzo et al. 2016). Afin d'étudier l'inconfort des travailleurs portant les appareils respiratoires sélectionnés, un questionnaire a

été distribué à tous les travailleurs (six au total) exerçant différentes activités à bord ou à proximité du tunnelier pendant le creusement d'une galerie de reconnaissance. Les membres de l'échantillon ont été classés comme aptes au travail par le médecin compétent. Selon les résultats d'une étude précédente (Padovese et al. 2017), même si les travailleurs participant au test sont formellement chargés d'exercer différentes missions, ils ont été considérés comme appartenant à un seul et même groupe d'exposition dénommé « travailleurs au front », en termes d'exposition aux polluants. Cette décision est due à la variabilité des activités spécifiques des travailleurs, qui doivent contribuer aux différents besoins circonstanciels. Les principales activités exercées par les travailleurs ont été le creusement, la perforation et le boulonnage, le positionnement des rails, l'agrandissement des installations, la fourniture de matériel par locomotive, le positionnement des supports contre la roche, l'entretien du chantier, les activités de menuiserie, le chargement, le transport, le déchargement de matériel et le transit à l'intérieur du tunnel.

L'étude a été conçue comme suit :

- examen de la documentation sur les facteurs d'inconfort possibles des APR (généraux et spécifiques au contexte) ;
- développement et validation d'un outil d'étude basée sur un questionnaire créé pour ce scénario ;
- recueil des données et analyse quantitative et qualitative des réponses fournies par les travailleurs.

2.4 Examen de la documentation

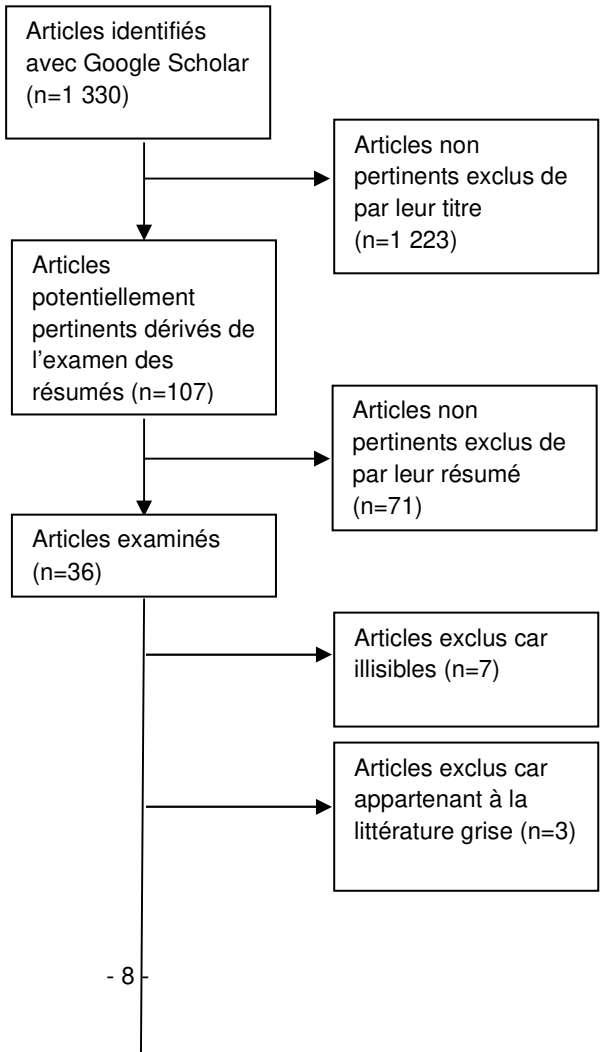
Un examen approfondi de la documentation a été effectué afin d'identifier les facteurs d'inconfort et de tolérabilité des appareils respiratoires. L'étude a été réalisée conformément à la déclaration PRISMA (Moher et al. 2009) sur les bases de données de l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et Google Scholar. Une recherche générale sur l'inconfort causé par l'usage d'APR a été effectuée dans la base de données ISO. Les termes de recherche utilisés pour la base de données ISO incluent les mots-clés suivants : « dispositifs de protection respiratoire » et « facteur humain ». La recherche a produit 14 normes, dont six étaient des doublons, et trois n'étaient pas pertinentes, car traitant principalement des taux métaboliques, des données anthropométriques et des effets du gaz carbonique et de l'oxygène sur la physiologie humaine. Au final, cinq normes ont été sélectionnées :

- ISO/TS 16976-8:2013 traite de l'interaction entre les APR et les sens humains, tels que la vue et l'ouïe. Un APR pourrait influer négativement sur la vue de son porteur et peut faire obstacle à la réception ou la transmission de signaux acoustiques ou d'informations que l'utilisateur souhaite écouter (tels que des discours) ou qu'il a besoin d'entendre (comme des signaux d'avertissement) ;
- ISO/TS 16976-7:2020 précise qu'un APR et la façon dont il est utilisé peuvent influencer la communication ;
- ISO/TS 16976-6:2014 indique qu'« un inconfort courant lié à l'usage d'APR est le mal de tête », causé par une pression excessive sur les nerfs superficiels de la tête ;
- ISO/TS 16976-5:2013 affirme que certaines parties des APR sont en contact avec la peau du visage humain et que sur ces zones de contact, l'échange de chaleur peut être altéré. L'importance de cet effet dépend de nombreux facteurs, dont les plus significatifs sont la pression de contact, les dimensions de la zone de contact et les températures ;
- ISO/TS 16976-4:2019 traite de résistance respiratoire. Un APR requiert en effet plus d'effort de la part des muscles respiratoires, ce qui peut causer un inconfort.

Une recherche supplémentaire, spécifique aux appareils respiratoires électriques à cagoule/casque, a été réalisée à l'aide de Google Scholar. Cette recherche a produit 1 330 articles. Parmi les 1 330 références identifiées, 1 223 ont été exclues de par leur titre. Parmi les 107 articles restants, 71 ont été exclus parce que leurs résumés n'étaient pas pertinents, 7 ont été exclus parce qu'il était impossible de récupérer leur texte intégral, 3 parce qu'il s'agissait de littérature grise telle que des thèses, des procédures de congrès et des documents non soumis à des examens par les pairs, et 12 ont été exclus parce qu'ils n'étaient pas pertinents. Un article a été intégré après lecture des références des études incluses. Au final, 15 documents ont été sélectionnés (Figure 5).



Figure 5. Casque à visière Sundstrom Safety(R) SR 580 et unité de ventilation Sundstrom Safety(R) SR 500



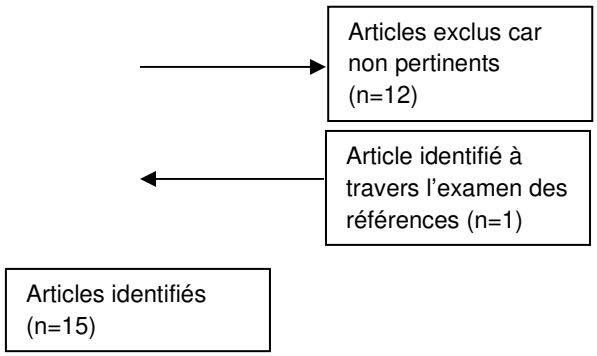


Figure 6. Diagramme de flux de la recherche bibliographique.

Parmi les documents pertinents, même si ceux-ci se réfèrent principalement aux milieux sanitaires, quelques facteurs d'inconfort possibles ont été identifiés. Les éventuelles preuves d'inconfort ont été extraites des résultats des études. Le Tableau 3 présente la liste complète des facteurs d'inconfort analysés.

Tableau 3. Facteurs d'inconfort identifiés dans la documentation et leurs références.

Facteur d'inconfort	Preuve d'inconfort	Bibliographie
Inconfort thermique	oui	(Szeinuk et al. 2000) ; (ISO/TS 16976-5:2013) (Linauskas and Kalos 1984) (Salazar et al. 2001)
	non	(Caretti and Barker 2014) (Fennelly, 1997) (Johnson et al., 2005) (Del Ferraro et al., 2017) (Powell et al., 2017)
Mauvaise adhérence	oui	(Linauskas and Kalos 1984) (Szeinuk et al. 2000) ; (Salazar et al. 2001)
Douleur	oui	(Szeinuk et al. 2000) ;
Déficience visuelle	oui	(Johnson 2016) (Linauskas and Kalos 1984) (Khoo et al. 2005) (ISO/TS 16976-8:2013) (AlGhamri et al. 2013) (Salazar et al. 2001)
Déficience de la parole et de l'audition	oui	(Johnson 2016) (Linauskas and Kalos 1984) (Khoo et al. 2005) (ISO/TS 16976-8:2013) (Salazar et al. 2001) ISO/TS 16976-7:2013 (Radonovich et al. 2009) (Bollinger and Schuzt 1987) (Hines et al. 2019) (Fennelly 1997)
	non	(Schumacher et al., 2009)
Inconfort respiratoire	oui	(Khoo et al. 2005) (ISO/TS 16976-4:2012)
	non	(Bollinger and Schuzt, 1987) (Powell et al., 2017) (Schumacher et al., 2009)
Maux de tête	oui	(ISO/TS 16976-6:2014)
Sécheresse oculaire	oui	(Powell et al. 2017)
Poids	oui	(Johnson 2016) (Caretti and Barker 2014) (Khoo et al. 2005) (Linauskas and Kalos 1984) (Bollinger and Schuzt 1987 (Schumacher et al. 2009)
Logistique	oui	(Caretti and Barker 2014)
Bruit (moteur)	oui	(Caretti and Barker 2014)
Altération de la capacité motrice fine	oui	(AlGhamri et al. 2013)
Fatigue/effort	oui	(Johnson 2016) (Salazar et al. 2001)
	non	(Powell et al. 2017)
Formation de buée sur la visière	oui	(Linauskas and Kalos 1984)
Encombrement	oui	(Johnson 2016) (Linauskas and Kalos 1984) (Khoo et al. 2005) (Salazar et al. 2001) (Bollinger and Schuzt 1987) (Schumacher et al. 2009)

2.5 Mise au point du questionnaire

Sur la base des facteurs d'inconfort énoncés au Tableau 3, un questionnaire spécifique a été mis au point en tenant compte des différentes phases de la construction du tunnel.
Ce questionnaire a été conçu pour le recueil et la mémorisation des données selon une approche systématique, et a été structuré à l'aide de la méthode suggérée par Hsu et al. (2004) pour l'inconfort lié aux dispositifs de protection auditive.
Il est organisé comme suit :

- La partie 1 concerne les spécifications techniques de l'appareil respiratoire testé et les données de base relatives au contexte dans lequel l'appareil est testé.
- La partie 2 présente les détails des activités exercées par les travailleurs participant au test.
- La partie 3 contient les résultats du test en termes de retours des travailleurs.

Le Tableau 4 présente les principaux éléments du questionnaire de la partie 3.

Tableau 4. Éléments du questionnaire mis au point pour l'étude.

Éléments du questionnaire
1. Le casque avec visière constitue-t-il un obstacle à certaines activités ?
2. Le casque présente-t-il des problèmes d'adhérence ?
3. Le casque avec visière cause-t-il une gêne thermique ?
4. Le casque avec visière entrave-t-il la communication entre collègues ?
5. La visière présente-t-elle des problèmes de formation de buée ?
6. La réduction du champ visuel cause-t-elle des problèmes ?
7. Le casque avec visière est-il inconfortable en raison du raccordement du tuyau ?
8. L'absence de lampe sur le casque cause-t-elle des problèmes ?
9. Le casque avec visière est-il trop lourd et inconfortable ?
10. Le tuyau constitue-t-il un obstacle à certaines activités ?
11. Le tuyau s'enchevêtre-t-il durant certaines activités ?
12. Le tuyau a-t-il été écrasé au cours de certaines activités ?
13. La sangle du ventilateur constitue-t-elle un obstacle à certaines activités ?
14. Le ventilateur délivre-t-il un flux d'air gênant ?
15. Le harnais du ventilateur de la ceinture n'assure pas un port stable et confortable ?

2.5 Recueil de données

Les 6 participants ont été équipés de l'appareil respiratoire sélectionné. À l'instar d'enquêtes précédentes (LaVela et al. 2017 ; Locatelli et al. 2014), les participants étaient déjà experts dans l'utilisation d'APR (en particulier de masques FFR). Il a été demandé à chaque participant de remplir le questionnaire chaque fois qu'il utilisait l'appareil respiratoire. Le test a impliqué des tours non consécutifs dans un laps de temps de 10 jours, chaque tour ayant duré en moyenne 4 heures. Il a également été demandé aux participants d'évaluer et de signaler tout facteur d'inconfort non encore identifié dans le questionnaire pour contribuer à son amélioration (DeVellis, 2003), et d'exprimer librement d'éventuelles gênes que l'analyse de la littérature n'aurait pas permis d'identifier précédemment. Tous les travailleurs ont complété le questionnaire à l'issue de chaque tour identifié.

2.6 Analyse des données

La statistique descriptive a été utilisée pour analyser les facteurs d'inconfort. La répartition des fréquences a été recueillie à travers des données catégoriques. L'analyse des données a été effectuée avec le programme IBM SPSS® pour Windows (version 25 ; IBM SPSS Statistics, Armonk, NY). Les réponses qualitatives sur l'inconfort ont été analysées selon une approche qualitative. Après lecture du texte, une analyse des contenus a été réalisée selon la méthode Sandelowski et Barroso (Sandelowski et Barroso 2003). Enfin, les données qualitatives et quantitatives ont été intégrées pour définir une série finale de facteurs d'inconfort, d'obstacles à l'usage des appareils respiratoires testés et de suggestions d'amélioration (O'Cathain 2010).

2.7 Éthique

Cette étude a suivi les principes éthiques d'Helsinki (Schmidt et Frewer 2007) pour la recherche impliquant des sujets humains. Tous les participants ont pris part volontairement à l'étude après recueil de leur consentement éclairé, et les données obtenues ont été traitées sous forme anonyme.

3 Résultats

16 questionnaires ont été complétés. Chaque travailleur a répondu à une série de deux à trois questionnaires. Un participant n'a pas pu porter l'appareil respiratoire une fois en raison d'une condition clinique au visage.

Dans l'ensemble, la plus forte gêne est liée à la communication (question 4, 16/16 réponses affirmatives) et au fait que l'appareil respiratoire est gênant en raison du tuyau flexible (question 7, 6/16 réponses affirmatives). Les questions 8 et 9 ont totalisé 5/16 réponses affirmatives. Les questions 3 et 15 ont totalisé moins de trois réponses affirmatives. Enfin, aucune des autres questions n'a jamais comporté de réponse affirmative.

Le Tableau 5 présente les facteurs d'inconfort identifiés pendant les activités exercées par les travailleurs.

Tableau 5. Facteurs d'inconfort identifiés et nombre de travailleurs associés (sur le nombre total de travailleurs participant à cette activité).

Inconforts	Creusement	Positionnement des supports	Entretien	Chargement, transport et déchargement de matériel
Inconfort thermique	20 %	33 %	20 %	-
Difficulté de communication	100 %	100 %	100 %	100 %
Inconfort dû à la fixation du tuyau flexible	60 %	66 %	20 %	33 %
Absence de lampe sur le casque	40 %	33 %	40 %	33 %
Poids	20 %	-	20 %	33 %
Stabilité	20 %	33 %	20 %	33 %

4 Discussion

Cette étude a révélé les facteurs d'inconfort des travailleurs utilisant les appareils respiratoires électriques à cagoule/casque dans un environnement de creusement de tunnels. Le principal facteur d'inconfort déclaré par les travailleurs est la réduction de la possibilité de communication vocale. La solution de terrain à ce problème, commune à tous les dispositifs de protection respiratoire et particulièrement critique dans le cas des demi-masques ou des masques complets, implique l'ouverture de la visière, c'est-à-dire l'annulation de l'efficacité protectrice de l'appareil. Une solution à ce problème pourrait être l'utilisation de transmetteurs/récepteurs radio intégrés à l'appareil respiratoire, et l'installation de câbles rayonnants ou structures similaires dans l'ensemble du tunnel (Jarrett et al., 2018), avec une amélioration significative de l'état général de sécurité et de santé au travail. Un autre facteur d'inconfort courant est dû au poids de l'appareil respiratoire, qui rend ce dernier peu pratique, notamment à cause du raccord de tuyau situé dans sa partie postérieure. Ces appareils respiratoires sont encombrants s'ils sont associés à des casques d'usage courant dans les opérations souterraines. Ils sont en effet plus lourds, et le tuyau encombrant peut interférer avec les mouvements de la tête. Néanmoins, l'efficacité de leur protection dans des situations potentiellement critiques, assurément supérieure à celle des appareils respiratoires sans alimentation, justifie pleinement leur usage.

La présence d'une lampe sur le casque s'est souvent avérée nécessaire en raison des conditions de travail spécifiques. Malheureusement, à la différence des dispositions applicables aux mines, la législation italienne sur les tunnels encore en vigueur (décret présidentiel 320/1956) prévoit uniquement la fourniture aux travailleurs de lampes seules, qui pourraient ne pas être immédiatement disponibles et manœuvrables. Cette situation crée donc un risque de collision et d'écrasement. En outre, la législation la plus récente qui transpose les directives européennes 89/391/CEE et 92/57/CEE n'est pas exhaustive à ce sujet.

Étroitement lié aux conditions de travail spécifiques, l'inconfort thermique a été souvent signalé par les travailleurs participant à l'étude. En effet, et notamment durant les opérations impliquant un travail pénible, les travailleurs ont signalé vouloir un débit d'air supérieur au débit maximal fourni par l'appareil respiratoire. Ce résultat est néanmoins trompeur, parce que le débit d'air de l'appareil respiratoire n'est pas prévu pour gérer les questions climatiques. Le motif de l'inconfort réside dans les conditions

thermiques du sous-sol (température de 29 degrés centigrades, humidité supérieure à 85 %) aux dates de test, notamment dans certaines zones de la machine, où des opérations telles que le creusement, le positionnement des supports ou l'entretien ont été réalisées. Dans tous les cas, en raison de la variabilité des plaintes, il est possible de tenir compte d'une composante subjective qui mérite de plus amples investigations. Indépendamment de l'usage de ces appareils respiratoires, des améliorations des systèmes de ventilation dans le tunnel et le tunnelier pourraient contribuer aux conditions générales de confort.
Enfin, les participants ayant indiqué que la ceinture sur laquelle le ventilateur est accroché glisse vers le bas, influençant la stabilité des appareils respiratoires, on pourrait recommander l'amélioration du harnais pour garantir un port plus stable et confortable.

4.1 Limites de l'étude

Cette étude comporte quelques limites. La petite taille de l'échantillon pourrait influencer la possibilité de généraliser les résultats, bien qu'il faille préciser que tous les travailleurs exposés possibles ont été interrogés. Comme déjà démontré par Guest et al. (2006), six personnes pourraient représenter un bon échantillon pour une codification qualitative. En outre, l'étude est la première en son genre à identifier les facteurs d'inconfort des travailleurs dans l'environnement de creusement des tunnels.

5 Conclusions

L'usage d'appareils respiratoires électriques à cagoule/casque est une solution possible dans les environnements de creusement à l'intérieur des formations rocheuses susceptibles de contenir des minéraux amiantifères, décelés à travers l'évaluation préliminaire des risques, afin de protéger les travailleurs durant l'inévitable délai d'identification des conditions de risque possibles ou avérées.
Même si l'utilisation de ces appareils respiratoires provoque inévitablement une certaine augmentation de la charge de travail, les résultats ont confirmé la faisabilité de cette utilisation pendant le creusement de tunnels. Rappelons en outre que l'information, la formation et l'entraînement peuvent également jouer un rôle fondamental pour inciter les travailleurs à porter ces appareils malgré les facteurs d'inconfort identifiés.
Étant donné l'importance de l'usage de ces appareils respiratoires pendant le creusement à l'intérieur des formations rocheuses contenant potentiellement des minéraux amiantifères, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour confirmer les résultats de cette étude avec un échantillon de travailleurs plus large et une comparaison des appareils respiratoires électriques à cagoule/casque de différents fabricants.

6 Remerciements

Nous remercions nos collègues Marco Clari et Salvatore Pentimalli, ayant fourni des compétences qui ont grandement contribué à ces recherches.
Cette étude a bénéficié du soutien économique de Tunnel Euralpin Lyon Turin – TELT Sas.

7 Bibliographie

AlGhamri, A.A., Murray, S.L., Samaranayake, V.A., 2013. The effects of wearing respirators on human fine motor, visual, and cognitive performance. Ergonomics 56:5, 791-802.
Akbar-Khanzadeh, F., Bisesi, M. S., Rivas, R. D., 1995. Comfort of personal protective equipment. Applied Ergonomics 26, 195-198
Barra Caracciolo, A., Ademollo, N., Cardonia, M., Di Giulio, A., Grenni, P., Pescatore, T., Rauseo, J., Patrolecco L., 2019. Assessment of biodegradation of the anionic surfactant sodium lauryl ether sulphate used in two foaming agents for mechanized tunnelling excavation. Journal of Hazardous Materials 365, 538-545.
Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering. Wiley-Interscience.
Bollinger, N. J., Schutz, R. H., 1987. NIOSH guide to industrial respiratory protection. DHHS (NIOSH) Publication No. 87-116.
Caretti, D.M., Barker, D.J., 2014. Effects of Respirator Ambient Air Cooling on Thermophysiological Responses and Comfort Sensations. Journal of Occupational and Environmental Hygiene 11:5, 269-281
Castelli, D., Rostagno, C., Lombardo, B., 2002. Jd-Qtz-bearing metaplagiogranite, from the Monviso meta-ophiolite (Western Alps). Ofioliti 27, 81–90.
Del Ferraro, S., Tombolini, F., Plebani, C., Molinaro, V., 2017. Thermophysiological response of Newton manikin equipped with power assisted filtering device incorporating a full-face mask in hot environment. International Journal of Hyperthermia 33:7, 717-723.

DeVellis, R.F., 2003. Scale Development: Theory and Applications. Thousand Oaks, CA: Sage.
Directive 89/391/EEC on the introduction of measures to encourage improvements in the safety and health of workers at work.
Directive 92/57/EEC on the implementation of minimum safety and health requirements at temporary or mobile construction sites.
DPR 320/1956: Norme per la prevenzione degli infortuni e l'igiene del lavoro in sotterraneo.
EN 397:2012/A1:2012. Industrial safety helmets.
EN 529:2005. Respiratory protective devices. Recommendations for selection, use, care and maintenance. Guidance document.
EN 12941:1998/A2:2008. Respiratory protective devices - Powered filtering devices incorporating a helmet or a hood - Requirements, testing, marking.
EN 12942:1998/A2:2008. Respiratory protective devices - Power assisted filtering devices incorporating full face masks, half masks or quarter masks - Requirements, testing, marking.
Fennelly, K. P., 1997. Personal respiratory protection against mycobacterium tuberculosis. Clinics in Chest Medicine 18:1, 1-17.
Gaggero, L., Sanguineti, E., Gonzalez, A.Y., Militello, G. M., Scuderi, A., Parisi, G., 2017. Airborne asbestos fibres monitoring in tunnel excavation. Journal of Environmental Management 196, 583-593.
Guest, G., Bunce, A., Johnson, L., 2006. How many interviews are enough? An experiment with data saturation and variability. Field methods 18(1), 59-82.
ISO/TS 16976-4:2019 Respiratory protective devices -- Human factors -- Part 4: Work of breathing and breathing resistance: Physiologically based limits
ISO/TS 16976-5:2013. Respiratory protective devices -- Human factors -- Part 5: Thermal effects
ISO/TS 16976-6:2014. Respiratory protective devices -- Human factors -- Part 6: Psycho-physiological effects
ISO/TS 16976-7:2020 Respiratory protective devices -- Human factors -- Part 7: Hearing and speech
ISO/TS 16976-8:2013. Respiratory protective devices -- Human factors -- Part 8: Ergonomic factors
Hines, S. E., Brown, C., Oliver, M., Gucer, P., Frisch, M., Hogan, R., Roth, T., Chang, J., McDiarmid, M., 2019. User acceptance of reusable respirators in health care. American Journal of Infection Control, available online 10 January 2019, in Press, Corrected Proof.
Hsu, Y., C. Huang, C. Yo, C. Chen, and C. Lien, 2004. Comfort evaluation of hearing protection. International Journal of Industrial Ergonomics 33, 543-551.
Jarrett, J., Hansen, E., Harrison, S., 2018. Underground Communication Innovations. In North American Tunnelling 2018 Proceedings, A. Howard, B. Campbell, D. Penrice, M. Preedy, J. Rush (ed.). Washington, D.C.: SME. pp 83-91.
Johnson, AT, Berlin, H.M., 1973. Interactive Effects of Heat Load and Respiratory Stress on Work Performance of Men Wearing CB Protective Equipment. Edgewood Arsenal Technical Report ED-TR-83059 APG, MD 21010.
Johnson, A. T., Mackey, K. R., Scott, W. H., Koh, F. C., Chiou, K.Y.H., Phelps, S. J., 2005. Exercise Performance While Wearing a Tight-Fitting Powered Air Purifying Respirator with Limited Flow. Journal of Occupational and Environmental Hygiene 2:7, 368-373.
Johnson, A. T., 2016. Respirator masks protect health but impact performance: a review. J Biol Eng. 10, 4.
Khoo, K., P. Leng, I.B. Ibrahim, and T.K. Lim, 2005. The changing face of healthcare worker perceptions on powered air-purifying respirators during the SARS outbreak. Respirology.
Labagnara, D., Patrucco, M., Rossetti, P., Pellegrino, V., 2013a. Predictive assessment of the asbestos content in the Western Italian Alps: an essential tool for an effective approach to risk analysis and management in tunnelling operations and muck reuse. Environmental Earth Sciences 70, 857-868.
Labagnara, D., Martinetti, A., Patrucco, M., 2013b.Tunnelling operations, occupational S&H and environmental protection: a Prevention through Design approach. American Journal of Applied Sciences 10, 1371-1377.
Labagnara, D., Patrucco, M., Sorlini, A., 2016. Occupational Safety and Health in Tunnelling in Rocks Formations Potentially Containing Asbestos: Good Practices for Risk Assessment and Management. American Journal of Applied Sciences 13, 646-656.
LaVela, S.L., C. Kostovich, S. Locatelli, M. Gosch, A. Eagan, and L. Radonovich, 2017. Development and initial validation of the Respirator Comfort, Wearing Experience, and Function Instrument [R-COMFI]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene 14, 135-147.
Linauskas, S.H.; Kalos, F., 1984. Study of efficiency and current use of respiratory protective devices.
Locatelli, S.M., LaVela, S.L., Gosch, M., 2014.Health care workers' reported discomfort while wearing filtering facepiece respirators. Workplace Health Saf. 62, 362–368.
O'Cathain, A., Murphy, E., Nicholl, J., 2010. Three techniques for integrating data in mixed methods studies. Bmj, 341, c4587.
Paturzo, M., Colaceci, S., Clari, M., Mottola, A., Alvaro, R., Dickson, V. V., Vellone, E., 2016. I disegni di

ricerca con metodo misto: un approccio metodologico innovativo per la ricerca infermieristica. ASSIST INFERM RIC 35, 82-86.
Plinninger, R.J., Thuro, K., 2004. Wear prediction in Hard rock excavation Using the cerchar abrasiveness index (CAI). EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium.
Moher, D.; Liberati, A.; Tetzlaff, J.; Altman, DG, 2009. PRISMA Group. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. PLoS. Med. 6, doi: 10.1371/journal.pmed.1000097.
Padovese, P., Berti, A., Pavan, I., Pavan, S., Fiori, S., Belotti, F., Nava, P., SORLINI A. et al., 2017. Workers' exposure to airborne particulate and crystalline silica (quartz) during the excavation of a geognostic tunnel with a full - face machine. Italian Journal of Occupational and Environmental Hygiene 8, 13-19.
Powell, J. B., Kim, J. H., Roberge, R. J., 2017. Powered air-purifying respirator use in healthcare: Effects on thermal sensations and comfort. Journal of Occupational and Environmental Hygiene 14:12, 947-954.
Radonovich, L. J. Jr. , Yanke, R., Cheng, J., Bender, B., 2009. Diminished Speech Intelligibility Associated with Certain Types of Respirators Worn by Healthcare Workers, Journal of Occupational and Environmental Hygiene 7:1, 63-70.
Salazar, M.K., Connon, C., Takaro, T. K., Beaudet, N., Barnhart, S., 2001. An Evaluation of Factors Affecting Hazardous Waste Workers' Use of Respiratory Protective Equipment AIHAJ - American Industrial Hygiene Association 62:2, 236-245
Sandelowski, M., Barroso, J., 2003. Classifying the findings in qualitative studies. Qual. Health Res. 13, 905-923
Schmidt, U. and Frewer, A., eds., 2007. History and Theory of Human Experimentation: The Declaration of Helsinki and Modern Medical Ethics. History and Philosophy of Medicine, 2 . Franz Steiner Verlag, Stuttgard, 364.
Schumacher, J., Gray, S. A., Weidelt, L., Brinker, A., Prior, K., Stratling, W. M., 2009. Comparison of powered and conventional air purifying respirators during simulated resuscitation of
casualties contaminated with hazardous substances. Emergency Medicine Journal 26, 501-505.
Szeinuk, J., Beckett, W.S., Clark, N., Hailoo, W.L., 2000. Medical Evaluation for Respirator Use. American Journal of Industrial Medicine 37, 142-157.
Wang, J.X., Roush, M.L., 2000. What Every Engineer Should Know About Risk Engineering and Management. Taylor & Francis.
Occupational Safety and Health Administration, OSHA: "OSHA Technical Manual" (OTM) available at https://www.osha.gov/dts/osta/otm/otm_viii/otm_viii_2.html (accessed October 11, 2018)