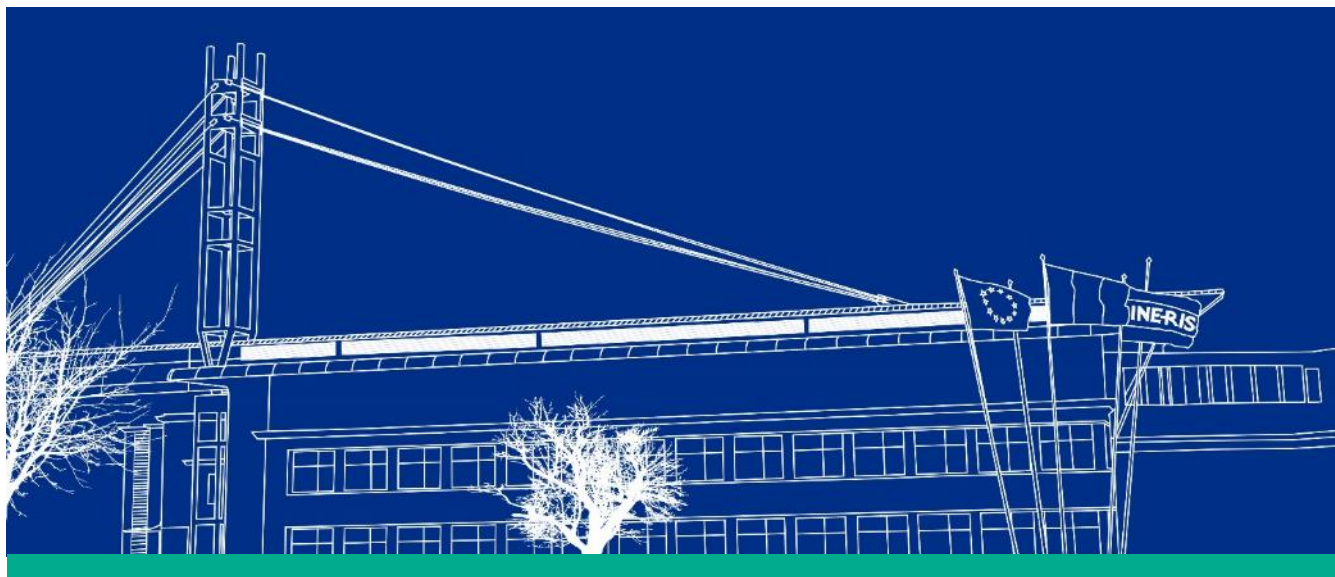




(ID Modèle = 454913)

Ineris - 227351 - 2818032 - v1.0

11/06/2025

Ventilation en carrières souterraines – Etat des lieux et évolutions récentes

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION INCENDIE DISPERSION EXPLOSION

Rédaction : PENELON Thibault

Vérification : GENTILHOMME OLIVIER; TRUCHOT BENJAMIN; GOUZY AURELIEN; FRANCK CHRISTIAN

Approbation : DUPLANTIER STEPHANE - le 11/06/2025

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

Table des matières

1	Glossaire	6
2	Introduction	7
2.1	Contexte général	7
2.2	Contexte réglementaire	7
2.3	Méthodologie de l'étude.....	8
2.4	Rappel des objectifs de ventilation	9
2.5	Techniques de ventilation	11
3	Les incidents et accidents impliquant une problématique de ventilation	16
3.1	Recensement.....	16
3.1.1	Base ARIA du BARPI	16
3.1.2	Base de données du NIOSH américain recensant les victimes d'accidents en mines et carrières 17	
3.1.3	Autres sources	18
3.1.4	Retours des questionnaires aux inspecteurs « carrières » et des visites	20
3.2	Synthèse du retour d'expérience	20
4	Les évolutions récentes affectant les émissions gazeuses et particulaires.....	22
4.1	Emissions liées aux techniques d'exploitation.....	22
4.2	Emissions liées aux motorisations des machines (en fonctionnement normal ou en situation dégradée)	22
4.2.1	Emissions en fonctionnement normal.....	22
4.2.2	Emissions en situation dégradée	24
4.3	Conséquences de ces évolutions sur l'exposition des travailleurs	25
4.4	Conséquences de ces évolutions sur les systèmes de ventilation	26
5	Les évolutions technologiques en lien avec la ventilation	27
5.1	Evolutions technologiques des systèmes de ventilation (équipements, outils de contrôle) ..	27
5.2	Evolution des bonnes pratiques et normes de dimensionnement de la ventilation	28
5.2.1	Normes et guides de bonnes pratiques actuels.....	28
5.2.2	Synthèse et évolution des recommandations et bonnes pratiques	30
5.3	Evolution des outils de dimensionnement	31
5.3.1	Outils existants	31
5.3.2	Evolutions des méthodes de dimensionnement et de gestion des systèmes de ventilation en milieu souterrain	35
6	Conclusions	40
7	Annexes.....	43

Table des illustrations

Figure 1. Freins aérauliques : barrage (à gauche) ou remblai (à droite) [source : Carrière SAMIN].....	12
Figure 2. « Mur » de ventilateurs de ventilation primaire [source : carrière SAMIN]	13
Figure 3. Schémas de principe d'un dispositif d'aérage secondaire, dans un flux d'air primaire : en haut, avec ventilateur auxiliaire soufflant ; au milieu, avec un ventilateur auxiliaire soufflant et un ventilateur auxiliaire aspirant (système « push-pull ») ; en bas, avec ventilateur auxiliaire aspirant et cloison d'aérage.....	14
Figure 4. Résultats de l'interrogation de la base de données du NIOSH. Les encadrés orange indiquent les cas en lien potentiel avec l'aérage.....	18
Figure 5. A gauche : gaine de ventilation souple pincée par un passage de câbles ; à droite, ventilateur auxiliaire et gaine souple en série, désaxés et trop proches (source : Auxiliary Ventilation: Good Installation and Maintenance Practices for Miners, Workplace Safety North, 2021).....	19
Figure 6. Exemple d'équipement de dépoussiérage (source : Cogemacoustic)	20
Figure 7. Exemples de gaines de ventilation souples percées (source : Auxiliary Ventilation: Good Installation and Maintenance Practices for Miners, Workplace Safety North, 2021).....	20
Figure 8. Exemple de camion minier à batteries, assisté d'un système de type 'trolley' sur un chemin d'accès principal (mine d'extraction de métaux en Suède) [source : Epiroc]	23
Figure 9. A gauche : camion prototype, motorisation hybride pile à combustible-batteries [source : Anglo American] ; à droite : tombereau prototype articulé à pile à combustible hydrogène [source : Volvo CE]	24
Figure 10. Exemple d'une maquette numérique du réseau tridimensionnel d'une exploitation souterraine (source : Ineris).....	32
Figure 11. Exemples d'utilisation de la CFD : à gauche, effet de l'ajout de ventilateurs auxiliaires dans une portion d'exploitation par chambres et piliers [source : Gendruet et al, 2023 ⁵⁶] ; à droite, optimisation du positionnement d'accélérateurs dans une jonction entre deux galeries de réseau souterrain [source : De Souza et al, 2020]	35
Figure 12. Niveaux de ventilation à la demande (d'après Jackson et al., 2024)	36
Figure 13. Représentation d'un réseau aéraulique souterrain : à gauche, graphe du réseau de ventilation ; à droite, représentation sous forme d'un graphe Q-H (d'après Jia et al., 2020 ⁶⁶). Les rectangles correspondent à des tronçons de galeries, dont la largeur et la longueur représentent le débit de ventilation et la charge de chaque tronçon. Les lignes pointillées indiquent les quatre chemins indépendants	37
Figure 14. Illustration d'un couplage entre un modèle 1D d'un réseau souterrain simple (segments colorés sur l'image de gauche) et un modèle CFD de l'intérieur d'un tronçon de tunnel (nuage rose sur l'image de droite) pour simuler la dispersion de gaz dans un réseau souterrain (schématisé sur l'image du milieu) (source : Ineris)	38
Figure 15. Exemple de scan 3D d'une zone de carrière exploitée par chambres et piliers (source : Ineris)	39
Figure 16. Etapes pour l'exploitation de données géométriques obtenues par scan 3D dans des outils de simulation CFD pour l'optimisation d'un système de ventilation (d'après Trybala, 2024)	39

Résumé

Ce rapport de synthèse vise à dresser un état des lieux et une veille technique relatifs à la ventilation pour les carrières souterraines en exploitation. La problématique de ventilation des carrières étant similaire à celle des mines, de nombreux éléments sont issus de documents techniques et publications scientifiques portant sur la problématique de la ventilation pour les mines souterraines.

Les sujets suivants y sont abordés :

- Un rappel sur les réglementations qui s'appliquent et sur les objectifs de la ventilation en milieu souterrain, ainsi que sur les grands principes de la ventilation dans un réseau de galeries souterraines ;
- Un tour de l'accidentologie en carrières et mines, en lien avec la problématique de la ventilation ;
- Une analyse des évolutions des technologies d'exploitation (en particulier, les nouvelles motorisations) et de leur influence sur les besoins en ventilation, du fait de l'évolution des risques associés ;
- Un état des lieux des technologies de ventilation et de leur évolution, et des méthodes et outils de dimensionnement des réseaux de ventilation pour leur optimisation.

Indispensable à la sécurité et à l'amélioration des conditions de travail des personnels, l'enjeu de la ventilation des réseaux souterrains est important des points de vue économique et climatique, les opérations de ventilation pouvant représenter jusqu'à près de la moitié de la consommation énergétique d'une exploitation souterraine.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, , Verneuil-en-Halatte : Ineris - 227351 - v1.0, Ventilation en carrières souterraines – Etat des lieux et évolutions récentes11/06/2025.

Mots-clés :

Carrières souterraines, ventilation, aérage

1 Glossaire

AFTES	Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain
ATEX	Atmosphère explosive
ARIA	Analyse, Recherche et Information sur les Accidents (Base de données de retour d'expérience)
BARPI	Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i> (Véhicule électrique à batteries)
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (mécanique des fluides numérique)
CNAM	Caisse Nationale d'Assurance Maladie
FDS	<i>Fire Dynamics Simulator</i> (code de calcul CFD du NIST)
HVO	Huiles Végétales Hydrogénées
INRS	Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles
MSHA	Mine Safety and Health Administration (États-Unis)
NIOSH	National Institute for Occupational Safety & Health (États-Unis)
NIST	National Institute of Standards and Technology (organisme états-unien)
NSW	New South Wales (Nouvelle-Galles du Sud, Australie)
RGIE	Règlement Général des Industries Extractives
SIA	Société suisse des Ingénieurs et des Architectes
VLEP	Valeurs Limites d'Exposition Professionnelle
VOD	<i>Ventilation on Demand</i> (Ventilation à la demande)

2 Introduction

2.1 Contexte général

La sous-opération 2.2 du programme d'appui SIT05 vise à dresser un état des lieux et une veille technique relatifs à la ventilation pour les carrières souterraines en exploitation. Le présent rapport constitue la synthèse des travaux réalisés de 2022 à 2024. Le terme « aérage » est souvent utilisé pour qualifier la ventilation des réseaux souterrains des carrières et des mines.

2.2 Contexte réglementaire

Pour rappel, la différence entre une « mine » et une « carrière » est définie par le code minier à l'article L311-1. Elle repose uniquement sur le type de substances minérales ou fossiles qui en est extrait, et non sur le mode d'exploitation. Les substances conduisant une exploitation d'extraction à relever du régime légal des mines sont listées dans l'article L111-1 du code minier (métaux, hydrocarbures, graphite, diamant, sels, gaz carbonique, hydrogène naturel...). Les exploitations de gisement d'autres substances que celles listées précédemment (consistant essentiellement en des matériaux de construction : pierre, sable, gypse, ...) relèvent du régime légal des carrières.

Régime d'exploitation

L'exploitation des carrières impose d'en maîtriser les impacts (risque de pollution des eaux, bruit, poussières, impacts sur la faune et la flore, impact visuel) au cours de l'exploitation mais aussi une fois que celle-ci est terminée.

Les carrières relèvent depuis 1993 de la législation des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE), sous la rubrique 2510 de la nomenclature des installations classées. Les conditions dans lesquelles elles peuvent être exploitées sont définies dans le code de l'environnement.

Le régime juridique de leur création, de leur fonctionnement et de leur fermeture diffère selon qu'elles sont soumises à déclaration ou autorisation.

L'arrêté ministériel du 22 septembre 1994 modifié s'intéresse aux exploitations de carrières **soumises à autorisation** :

- Il fixe les conditions d'exploitation ;
- Il fixe les exigences réglementaires en matière d'implantation dans l'environnement et de limitation des risques que doivent respecter ces installations, notamment : aménagements, accès, déclaration de début des travaux, défrichage, archéologie, extraction, prévention des pollutions, rejets, poussières, bruit, vibrations, remise en état, remblayage, sécurité, etc.

L'arrêté ministériel du 26 décembre 2006 encadre, quant à lui, le fonctionnement des exploitations de carrières **soumises à déclaration**.

Réglementation du travail dans les carrières

La réglementation citée ci-avant cadre les autorisations d'exploitation des carrières et la gestion des impacts de leur exploitation sur le voisinage et l'environnement.

La réglementation du travail en carrières est portée à la fois par le code du travail et par le Règlement Général des Industries Extractives (RGIE, décret n°80-331 du 07/05/1980). En effet, depuis 2009, l'article 33 de la loi n° 2009-526 du 12 mai 2009 rend applicable, dans les carrières, les dispositions relatives à la santé et la sécurité au travail issues de la 4^{ème} partie du code du travail. Toutefois, certaines dispositions spécifiques aux carrières et aux mines issues du RGIE peuvent être appliquées en complément ou adaptation des dispositions de la 4^{ème} partie du code du travail (article L.4111-4 du code du travail).

C'est en particulier le cas du Titre « Aérage » du RGIE, qui reste applicable à l'heure actuelle. Les autres Titres du RGIE également applicables à ce jour sont : Atmosphère irrespirable ; Chantiers chauds ; Combustibles liquides ; Explosifs ; Grisou ; Moteurs thermiques ; Poussières inflammables.

2.3 Méthodologie de l'étude

Les différents items à explorer dans le cadre du présent état des lieux et veille technique relatifs à la ventilation en souterrain, identifiés au démarrage de cette opération, sont indiqués dans le tableau ci-après.

Thème	Sous-thèmes
Accidentologie / REX défaillances de ventilation	Recueil d'accidents et d'incidents de ventilation / avec problématique de ventilation Analyse des causes/conséquences identifiées, enseignements à tirer
Technologies d'exploitation	Identification et caractérisation des sources nouvelles d'émission (chaleur, gaz inflammables/toxiques, poussières, humidité, fumées d'incendie) Caractérisation des risques associés Nouveaux critères sécurité/sanitaire/confort travailleurs et sûreté/stabilité des excavations Implications sur les besoins en ventilation et sur méthodes de dimensionnement
Technologies de ventilation	Recensement des technologies de ventilation existantes et nouvelles - Caractéristiques associées - Modes de mise en œuvre
Outils de dimensionnement des réseaux de ventilation	Définition des besoins en termes de sorties des outils de dimensionnement Recensement des préconisations, bonnes pratiques et normes, en place et en construction, pour le dimensionnement de la ventilation Inventaire des méthodes de dimensionnement (méthodes et outils de calcul) Propositions d'adaptations en lien avec les évolutions techno – Faisabilité Mise en place d'outils le cas échéant (abaques...)

Afin de recueillir des informations relatives à la problématique de ventilation des carrières souterraines exploitées en France, un questionnaire a été établi (cf. annexe 1) et transmis aux inspecteurs « carrières ». La dizaine de retours reçus a permis de remonter des informations, plus ou moins détaillées, provenant des exploitants et/ou des inspecteurs, concernant une vingtaine de sites en exploitation (gypse, calcaire – ornemental ou à chaux –, grès ornemental, pierre à ciment prompt, ...).

En synthèse :

- les modes d'exploitation sont en très grande majorité par « chambres et piliers »¹ (quelques spécificités de type « chambres montantes ») ;
- les modes de ventilation sont variés (naturelle ou mécanique, par soufflage ou aspiration, utilisation d'un ou plusieurs ventilateurs, ...) ;
- les sites sont généralement exploités depuis plusieurs dizaines d'années ; certains sites disposent néanmoins d'équipements de ventilation changés récemment ;
- peu d'incidents liés à la ventilation sont remontés via les questionnaires.

Sur la base de ces retours, quatre visites de carrières ont été effectuées :

- Carrière Placoplâtre, Baillet en France, le 05/07/2023 ;

¹ Méthode d'exploitation consistant à creuser les gisements souterrains de façon à former en alternance des chambres vides et des piliers, lesquels servent à soutenir le toit. Une exploitation par chambres montantes consiste à creuser verticalement vers le haut depuis une galerie de base (horizontale).

- Mines d'Orbagnoux, Corbonod, le 28/09/2023 ;
- Carrière SAMIN de Tacon, Valserhône, le 10/10/2023 ;
- Carrière Vicat de la Pérelle, Saint Laurent du Pont, le 11/10/2023.

Ces sites ont été choisis en fonction des informations qui ont été remontées via les questionnaires : études d'aérage récentes, modifications récentes du système de ventilation, particularités d'exploitation, incidents signalés en lien avec la problématique d'aérage.

L'ensemble des éléments reçus via les questionnaires et les informations obtenues lors des visites de sites ont permis de confronter notre connaissance de l'activité d'exploitation des carrières souterraines sur le territoire français à des situations de terrain. Les analyses de ces éléments sont présentées dans ce rapport.

Afin de compléter les connaissances de l'état de l'art sur les problématiques de ventilation en milieu souterrain, l'étude s'est appuyée également sur des ressources bibliographiques, des guides, des informations recueillies auprès de fabricants et la participation au congrès international WTC 2022 (*World Tunnel Congress*, Danemark).

2.4 Rappel des objectifs de ventilation

Les objectifs de la ventilation en milieu souterrain sont en particulier de contrôler :

- les concentrations en gaz et vapeurs toxiques et/ou inflammables émis en conditions d'exploitation normale naturellement, par décomposition d'éventuelles matières organiques – terres importées pour remblai –, ou par les moteurs thermiques ou encore par les tirs à l'explosif (notamment : méthane, radon, sulfure d'hydrogène, monoxyde de carbone, oxydes d'azote, oxydes de soufre, ...) ;
- les concentrations en particules (empoussièrement minéral, particules issues de la combustion des moteurs thermiques, poussières de tir, ...) ;
- le taux d'oxygène ;
- la chaleur ;
- l'humidité (formation de brouillard, ...).

Le rôle de la ventilation est ainsi de capter (au plus près de la source) et/ou de diluer dans de l'air neuf et évacuer les gaz et poussières, pour respecter les seuils admissibles dans l'ensemble du réseau souterrain.

Le règlement RGIE indique, dans le Titre Aérage, article 4 :

« Les travaux accessibles doivent être aérés de façon à :

- garantir la salubrité de l'atmosphère ;
- éviter toute accumulation de gaz dangereux ;
- assurer des conditions de travail acceptables. »

Les teneurs limites sont définies dans l'Arrêté du 08/06/1990², qui indique (article 1) :

« Les travaux souterrains accessibles doivent être aérés de façon que, à tout moment :

- la teneur en oxygène de l'atmosphère y soit au moins égale à 19 % ;

- sauf dans le cas d'application des dispositions de l'article 2, les teneurs instantanées en substances dangereuses de l'atmosphère respirée par chaque personne soient au plus égales à :

- 1 % pour le dioxyde de carbone ;
- 50 ppm pour le monoxyde de carbone ;
- 25 ppm pour le monoxyde d'azote ;
- 3 ppm pour le dioxyde d'azote ;
- 5 ppm pour le sulfure d'hydrogène ;
- 2 ppm pour le dioxyde de soufre. »

² relatif à la teneur minimale en oxygène ainsi qu'aux teneurs limites en substances dangereuses admissibles dans l'atmosphère des travaux souterrains

L'article 2 du même arrêté précise que des dépassements des teneurs limites définies à l'article 1 sont possibles sous certaines conditions, et définit de nouvelles valeurs limites, moins restrictives, à ne pas dépasser.

Ces valeurs semblent avoir été basées sur les VLEP³ (court terme ou 8h selon les gaz) définies à la date de l'Arrêté. Certaines VLEP ayant évolué depuis, les valeurs ne correspondent plus. Par exemple, pour le dioxyde d'azote, les VLEP 8h et VLEP CT sont, depuis 2019, respectivement de 0,5 ppm et 1 ppm (contre une VLEP CT de 3 ppm auparavant). La recommandation R.494 portée par la CNAM⁴ préconise, logiquement, de respecter a minima les VLEP, ce qui s'avère, pour certaines substances, plus contraignant que l'arrêté ministériel du 08/06/1990.

NB : Par ailleurs, il est fait référence, dans le RGIE, à la possibilité que le Préfet donne un accord préalable. Or le Code du Travail donne désormais la responsabilité de la santé et la sécurité des travailleurs à l'employeur, donc le Préfet ne peut pas, a priori, s'y substituer.

Il peut être également noté que le RGIE n'impose pas de limite de concentration en particules fines des moteurs diesel, ni de débit minimal en fonction du nombre et de la puissance des moteurs thermiques utilisés. Une VLEP pour les particules diesel, déjà applicable depuis 2023 pour l'ensemble des activités de surface, entrera en vigueur à partir du 21 février 2026 pour les chantiers souterrains (extraction souterraine et creusement des tunnels). Il s'agit de la VLEP-8h = 0,05 mg/m³ (mesurée sous forme de carbone élémentaire⁵) portant sur les particules de diamètre inférieur à 2,5 µm (PM2,5). Aucune valeur limite d'exposition professionnelle court terme n'est définie.

Pour les poussières, le titre *Empoussiérage* du RGIE ayant été abrogé depuis le 1^{er} janvier 2014, les VLEP-8h pour les poussières totales (4 mg/m³) et pour les poussières alvéolaires (0,9 mg/m³) définies dans le Code du Travail s'appliquent désormais.

En outre, des contraintes de renouvellement d'air pour la respiration du personnel et de vitesse d'air vis-à-vis du confort existent également. Le RGIE prescrit de ne pas dépasser 8 m/s de vitesse d'air dans les zones où se trouve du personnel (hors puits, travers-bancs, et retours d'air principaux). Une telle vitesse d'air est toutefois très inconfortable pour travailler. Ainsi, la recommandation AFTES/GT12R9F1 (2005)⁶ pour les chantiers souterrains préconise notamment une vitesse d'air entre 0,3 m/s et 0,7 m/s pour assurer un courant d'air suffisant sans gêner les opérateurs. Cette valeur minimale de 0,3 m/s est retrouvée dans la recommandation R.494 de la CNAM⁷ visant les travaux souterrains linéaires. La recommandation AFTES/GT27R1F1 (2003)⁸ propose en revanche une fourchette de vitesse d'air en galerie entre 0,5 m/s et 1,5 m/s pour le confort des ateliers. La recommandation GT27R1F2 (prépublication, 2023)⁹ reprend la valeur minimale de 0,5 m/s et évoque par ailleurs un maximum de 2,5 m/s, jusqu'à 3,5 m/s sur de courtes périodes si les émissions de gaz le nécessitent (nombreux engins à moteur diesel travaillant en simultané, par exemple), supérieure à la recommandation de 2003 mais très inférieure à la prescription du RGIE, pour ne pas mettre en suspension trop de poussières.

Par ailleurs, la recommandation AFTES/GT12R9F1 déjà citée préconise un apport d'air neuf minimal nécessaire à la respiration des personnes de 25 à 90 m³/h/personne selon l'activité physique du personnel. Des débits supérieurs, de 90 m³/h/personne (0,025 m³/s/personne) à 324 m³/h/personne (0,090 m³/s/personne) selon l'activité physique des opérateurs et selon la température ambiante, sont préconisés dans la recommandation GT27R1F2.

Source Paramètre	RGIE	CNAM (2016)	AFTES / GT27R1F1 (2003)	AFTES / GT12R9F1 (2005)	AFTES / GT27R1F2 (2023)
---------------------	------	-------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------

³ VLEP = Valeurs limites d'exposition professionnelle

⁴ Recommandation du Comité Technique National des Industries du Bâtiment et des Travaux publics (CTN B), « Mise en œuvre de dispositifs de ventilation en travaux souterrains linéaires », R. 494, 2016.

⁵ INRS, Emissions particulières d'échappements de moteurs Diesel M-436 – MétroPol https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol/fiche.html?refINRS=METROPOL_436

⁶ AFTES, Recommandations de l'AFTES – La lutte contre les nuisances dans les chantiers souterrains, GT12R9F1, 2005.

⁷ CNAM (CTN B), Mise en œuvre de dispositifs de ventilation en travaux souterrains linéaires, Recommandation du CTN B, R.494, 2016.

⁸ AFTES, Recommandations de l'AFTES – Ventilation des ouvrages souterrains en cours de construction, GT27R1F1, 2003.

⁹ AFTES, Recommandations de l'AFTES – Ventilation mécanique des ouvrages souterrains en cours de construction et de réhabilitation, GT27R1F2, 2023 (pré-publication).

Vitesse minimale		0,3 m/s	0,5 m/s	0,3 m/s	0,5 m/s
Vitesse maximale	8 m/s		1,5 m/s	0,7 m/s	2,5 m/s (3,5 m/s courtes périodes)
Indicatif ou contraignant ?	Contraignant	Recommandé pour travaux souterrains linéaires	Recommandé pour les chantiers d'ouvrages souterrains (a priori remplacée par GT27R1F2)	Recommandé pour les chantiers souterrains	Recommandé pour les chantiers d'ouvrages souterrains

Tableau 1. Synthèse des recommandations de vitesse d'air dans les milieux souterrains

Concernant les conditions thermiques de travail, l'AFTES/GT12R9F1 rappelle le principe d'éviter de dépasser 26°C aux postes de travail et renvoie aux normes suivantes concernant les ambiances chaudes : NF EN ISO 7730¹⁰ ou NF EN ISO 7243¹¹.

Ces critères imposent des contraintes au dimensionnement du réseau de ventilation d'une carrière souterraine, auxquelles s'ajoutent, pour les exploitants, des contraintes d'optimisation des coûts du système de ventilation et de consommation d'électricité. En effet, il est estimé que la ventilation mécanisée peut représenter jusqu'à 40 à 50 % de l'énergie consommée par une mine/carrière. L'enjeu du changement climatique s'ajoute à l'enjeu économique.

La ventilation du milieu souterrain participe également à préserver les travailleurs vis-à-vis d'expositions aux gaz et poussières émis accidentellement, telles que des percements de poches de gaz, des mises en suspension accidentelles de poussières, ou encore des fumées d'incendie. En cas d'incident de ce type, la ventilation peut ainsi, par exemple, participer à maintenir des conditions ambiantes supportables pendant un temps suffisant pour permettre l'évacuation ou la mise à l'abri des personnes.

Ainsi, sans exiger du dispositif de ventilation qu'il protège le personnel en toute situation accidentelle, notamment d'incendie, le RGIE requiert, à l'article 12 du Titre « Aérage » (Circulaire du 7 novembre 1988), que le dossier technique d'aérage comporte « une étude relative aux conséquences d'incendies sur l'aérage ». Il s'agit d'étudier spécifiquement, de manière préventive, au moyen d'un outil de simulation, les perturbations de l'aérage en cas d'incendie. Une telle analyse, en fournissant une meilleure connaissance des écoulements aérauliques dans des situations dégradées, alimente l'identification des actions d'urgence à envisager en cas d'incendie pour protéger le personnel. Des stratégies de ventilation en situation d'incendie peuvent également être élaborées à la lumière de ces simulations.

2.5 Techniques de ventilation

L'apport actif d'air frais dans un milieu souterrain est généralement assuré par un ou plusieurs ventilateurs qui fournissent un flux adapté aux besoins de l'exploitation. L'air frais se répartit ensuite dans les galeries en fonction des résistances à l'écoulement de chaque zone (pertes de charge), et des freins (barrages étanches, rideaux à franges, portes, ...) qui sont posés pour canaliser les flux et favoriser la circulation d'air vers les zones à ventiler en priorité (voir Figure 1).

Des relais de ventilation peuvent également être mis en place pour améliorer la distribution de l'air dans les galeries (aérage secondaire – voir plus loin).

¹⁰ Norme NF EN ISO 7730, Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local, 2006.

¹¹ Norme NF EN ISO 7243, Ambiances chaudes - Estimation de la contrainte thermique de l'homme au travail, basée sur l'indice WBGT (température humide et de globe noir), 2017.



Figure 1. Freins aérauliques : barrage (à gauche) ou remblai (à droite) [source : Carrière SAMIN]

Aspiration / soufflage

L'apport d'air frais peut être assuré par soufflage (galeries en surpression) ou par aspiration (galeries en dépression), selon les besoins.

Le soufflage permet de maîtriser l'apport d'air neuf, tandis que l'aspiration permet de capter les poussières et les gaz. Les deux techniques peuvent être associées pour favoriser l'aérage de fronts de taille (bouchons de tirs, poussières de taille, particules émises par les moteurs des engins d'exploitation...). Dans le cas d'une ventilation par aspiration, il est recommandé que la bouche d'aspiration soit positionnée au plus près de la zone à ventiler pour une plus grande efficacité, tout en respectant une distance minimale pour ne pas être dégradé par les tirs à l'explosifs et ne pas gêner les mouvements des opérateurs et des engins.

Ventilation primaire / secondaire

L'air est amené en fond de la carrière souterraine par la ventilation principale, également appelée aérage primaire. L'aérage primaire assure un courant d'air depuis la/les entrées d'air frais jusqu'au(x) point(s) de retour d'air, « en ne passant qu'une fois par les ouvrages traversés » (RGIE, Titre aérage, article 1).

Un exemple illustratif de ventilateurs assurant l'aérage primaire d'une carrière souterraine est présenté sur la Figure 2.

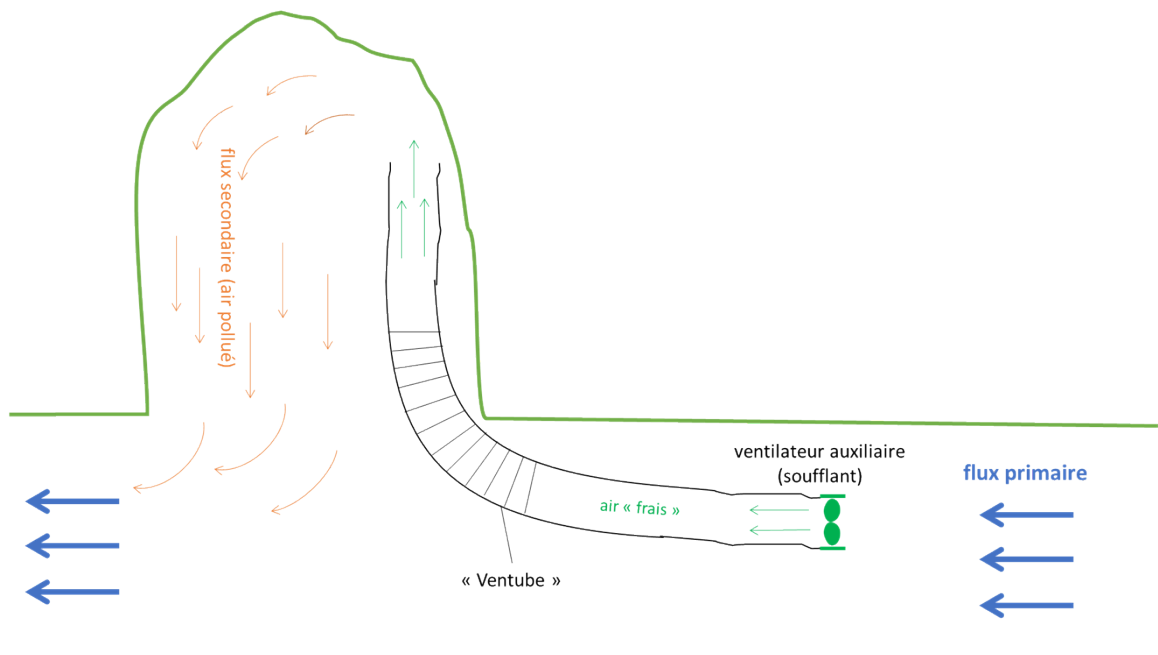


Figure 2. « Mur » de ventilateurs de ventilation primaire [source : carrière SAMIN]

L'aérage secondaire vise en particulier à ventiler les galeries borgnes, les culs de sac, les chantiers en front de taille, pour éviter les zones mortes où les gaz et poussières pourraient persister et présenter localement un risque pour la santé et la sécurité du personnel. Il peut également être utilisé parfois pour équilibrer des débits d'air entre galeries, pour assurer des sens de circulation aéraulique préférentiels.

L'aérage secondaire est assuré par des ventilateurs auxiliaires, qui soufflent de l'air « primaire » vers la zone à ventiler et/ou aspirent l'air pollué.

La Figure 3 expose le principe de l'aérage primaire et de l'aérage secondaire en milieu souterrain.



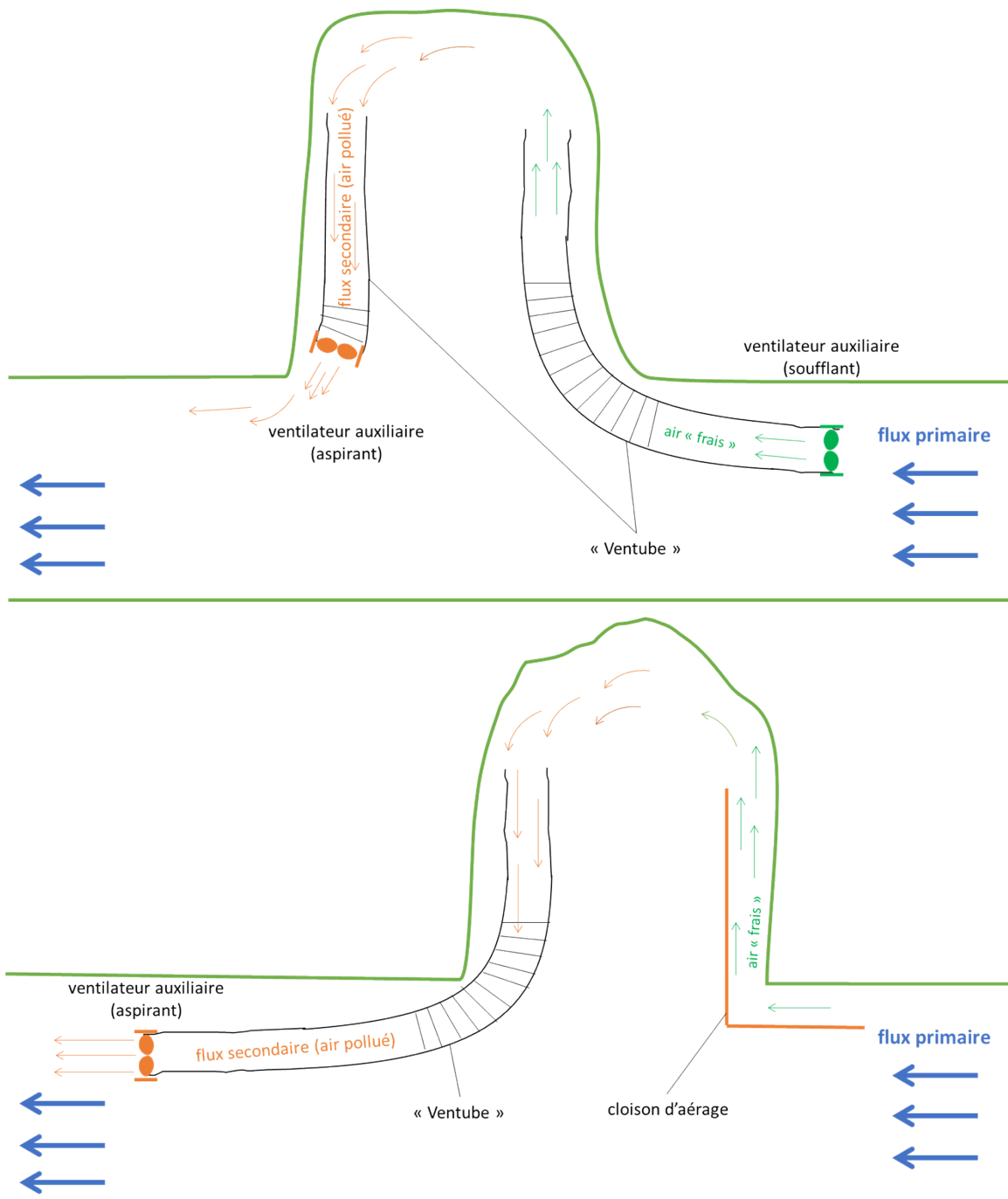


Figure 3. Schémas de principe d'un dispositif d'aérage secondaire, dans un flux d'air primaire : en haut, avec ventilateur auxiliaire soufflant ; au milieu, avec un ventilateur auxiliaire soufflant et un ventilateur auxiliaire aspirant (système « push-pull ») ; en bas, avec ventilateur auxiliaire aspirant et cloison d'aérage

Ventilation naturelle

Il est possible que la ventilation naturelle, dont le moteur est principalement le gradient de pression entre les entrées et les sorties du réseau souterrain (du fait du vent extérieur, des gradients de température entre les entrées, les galeries souterraines, les sorties), suffise à assurer un flux d'air frais permettant d'atteindre les objectifs de ventilation présentés au § 2.4. C'est plutôt dans des carrières souterraines de faible ampleur, peu profondes, que la ventilation naturelle seule peut suffire à satisfaire aux besoins en air frais. Cependant, l'aérage est alors dépendant des conditions météorologiques

extérieures (vitesses de vent et variations de température à proximité des entrées / sorties du réseau) et des gradients de température qui s'établissent au sein du réseau souterrain.

Si l'air tend à se réchauffer lors de son passage dans le réseau souterrain, sa densité en sortie de réseau est inférieure à sa densité en entrée de réseau, l'écoulement est assuré par l'effet de tirage thermique conséquence de cette différence de densité et de la morphologie du réseau.

Les flux aérauliques peuvent s'inverser selon les moments de la journée, les saisons, Ainsi, l'exploitant ne maîtrise pas la circulation de l'air frais dans les galeries, que ce soit le débit ou le sens d'écoulement, contrairement à ce que permet la ventilation mécanique. En cas de feu souterrain, notamment, la ventilation mécanique sera plus efficace pour mieux maîtriser l'écoulement des fumées et donc envisager la mise à l'abri du personnel.

Il convient de noter enfin que les effets de la ventilation mécanique et les effets de la ventilation naturelle peuvent s'opposer, ce qui doit être pris en compte dans le dimensionnement du réseau de ventilation.

3 Les incidents et accidents impliquant une problématique de ventilation

3.1 Recensement

3.1.1 Base ARIA du BARPI

Un seul accident en carrières souterraines concernant une problématique d'aérage ressort de l'interrogation de la base ARIA (en dehors d'incendies dans d'anciennes carrières, notamment utilisées en tant que décharge sauvage) : N° 44514 - 25/10/2013 - France - 95 - Baillet-en-France.

Il s'agit d'un incendie de camions (a priori à partir d'une nappe de gasoil formée à la suite de la collision) dans une galerie souterraine de la carrière de gypse de Baillet-en-France.

La description de l'accident dans la base ARIA est intégralement reprise ci-après.

N° 44514 - 25/10/2013 - FRANCE - 95 - BAILLET-EN-FRANCE

B08.11 - Extraction de pierres ornementales et de construction, de calcaire industriel, de gypse, de craie et d'ardoise

Dans une carrière souterraine de gypse, une collision entre 2 poids lourds provoque un incendie à 3 km de l'entrée d'une galerie située à 110 m de profondeur. Les secours évacuent les 30 employés et transportent à l'hôpital les 2 conducteurs accidentés. Ne parvenant pas à atteindre le foyer, bloqués à 400 m par le front des fumées et gênés par les véhicules laissés dans les galeries lors de l'évacuation, après concertation avec l'exploitant et compte tenu du risque lié à la présence d'explosifs au fond de la carrière, il est décidé de ne pas procéder à l'extinction. Le lendemain matin, les secours et un expert des carrières constatent la fin de l'incendie ; le système de déclenchement des explosifs est neutralisé. L'activité reprend le lundi matin (28/10).

L'incendie s'est déclenché par inflammation d'une nappe de gasoil. D'après l'exploitant, rencontré lors d'une visite en 2023, les fumées auraient remonté le flux d'aérage sur environ 200 m.

D'une manière générale, l'aérage n'est pas dimensionné particulièrement pour les situations d'incendie : les études incendie qui sont réalisées par les sites visent plutôt à anticiper les effets de la ventilation sur la circulation des fumées dans le réseau (telles que des remontées de fumées contre le sens du flux d'air nominal), afin de déterminer des parcours d'évacuation, la localisation des refuges, et les stratégies à mettre en œuvre en cas d'incendie, comme maintenir ou non de la ventilation, voire, si le dispositif le permet, d'en modifier les débits.

Le recensement a été élargi aux mines. Il en ressort, outre des explosions de gaz de mine (coups de grisou) très peu documentées en mines de charbon¹² dans les années 2000, les événements remarquables suivants.

- Un incendie en mine de sel (n°33175, Varangeville, en 2007), avec des fumées émises en surface, liées à deux départs de feux : l'un dans un atelier de réparation accueillant un bulldozer et une cuve de 200 L de fioul, l'autre dans une ancienne déchèterie désaffectée. Il est précisé dans la synthèse de la base ARIA que « des moyens complémentaires de ventilation sont mis en œuvre », pour évacuer les fumées ;
- Une explosion de gaz de mine de charbon en Chine (n°32469, Shaanxi, en 2006), pour laquelle il est précisé qu'une accumulation dangereuse de gaz s'est d'abord produite du fait d'un arrêt de la ventilation induit par une panne d'alimentation électrique, puis s'est enflammée lors du « rétablissement de l'électricité sans que les mesures de sécurité soient prises »¹³.
- Une explosion de gaz de mine de charbon en Chine (n°22934, Dali Bai, en 2002), pour laquelle un ventilateur installé de manière incorrecte, ayant obstrué le circuit d'aérage, aurait été la cause d'un défaut de ventilation rendant possible une explosion de gaz. Nous n'avons pas trouvé d'informations plus détaillées sur la cause de l'accident.

¹² Principalement en Chine et en Ukraine

¹³ L'absence de détection de cette accumulation de gaz, et donc d'évacuation des mineurs au fond, pourrait être due à une pratique officieuse consistant à couvrir les détecteurs de gaz pour ne pas interrompre l'extraction de manière intempestive.

- Un relargage brutal d'une quantité inattendue de dioxyde de carbone dans une mine de potasse en Allemagne (n°44844, Unterbreizbach, en 2013), à la suite d'un tir d'extraction à l'explosif. La libération de CO₂ lors des forations et tirs est courante dans cette zone d'exploitation de la mine, mais l'ampleur du dégagement gazeux est inédite. Trois des sept mineurs présents dans la mine au moment du tir et de l'émission brutale de CO₂ ont été asphyxiés. Ils n'ont pas eu le temps de déclencher leur auto-sauveteur, bien que situés à plusieurs kilomètres du front de taille, et 200 m plus haut. Des sources complémentaires indiquent que les ventilateurs auraient été détruits par le souffle du dégagement de gaz. En conséquence, la présence de mineurs lors des tirs à l'explosif a depuis été interdite par l'autorité minière de Thuringe.

Par ailleurs, une recherche sur les carrières en général permet de faire ressortir des exemples de départs de feux dans ce type d'exploitation (en l'occurrence, à ciel ouvert) :

- feu d'engins diesel : « camion », « tombereau », « chargeur », « pelle hydraulique », sur défaillance mécanique, feu de cabine, ... ;
- feu de transformateur / de coffret électrique ;
- feu d'équipement d'exploitation de type convoyeur à bande / concasseur, sur défaillance de moteur électrique notamment.

3.1.2 Base de données du NIOSH américain recensant les victimes d'accidents en mines et carrières

La base est accessible via le lien [Mine and Mine Worker Charts | NIOSH | CDC](#)¹⁴.

Elle donne accès à des statistiques sur le nombre de victimes (décès ou blessures) d'« accidents désastreux »¹⁵ en mines & carrières (souterraines ou non) sur plusieurs dizaines d'années (dépendant des statistiques demandées) aux Etats-Unis.

En interrogeant la base de manière ciblée sur les carrières souterraines (« *nonmetal mine* ») dans les familles de causes de décès qui pourraient concerner l'aérage (incendie, explosion de gaz/poussières, asphyxie/intoxication), depuis 1839 aux Etats-Unis, il ressort très peu de cas (5 cas), comme l'indique la Figure 4 (lignes encadrées), et aucun accident désastreux depuis 1990.

Les quatre accidents les plus récents se situent dans les années 1960 et 1970. On peut noter le cas d'intoxication par exposition à du sulfure d'hydrogène – relargué d'une poche d'eau accidentellement rencontrée lors de travaux de recherche de minerai dans la mine « Barnett Complex » (Rosiclare, Illinois) en 1971, où l'insuffisance de ventilation est directement en cause (défaillance d'un ventilateur d'aérage secondaire et insuffisance globale du système de ventilation). Dans les recommandations du rapport d'enquête du *Bureau of Mines* ([Barnett Complex Mine H2S Poisoning \(miningquiz.com\)](#))¹⁶, on retrouve notamment une préconisation d'amélioration du système de ventilation.

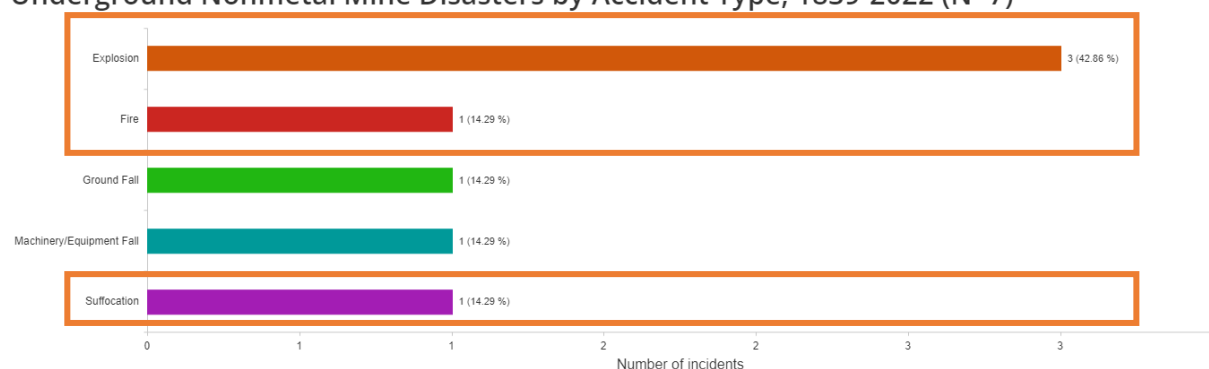
Un incendie d'origine inconnue, en 1968 au fond de la mine de sel de Belle Isle en Louisiane, est également reporté. Une vingtaine d'hommes a été pris au piège des fumées d'incendie, du fait de l'absence de sortie alternative au puits principal concerné par le feu. L'enquête du Bureau des Mines a notamment conclu qu'en attendant le creusement d'un second puits, planifié, qui aurait pu constituer une issue de secours, il aurait fallu qu'un refuge avec une ventilation indépendante et des réserves vitales soit mis en place au fond. D'autre part, le ventilateur principal, soufflant, était installé en souterrain, dans une cloison d'aérage (en bois) : si un passage avait été prévu dans la cloison, les mineurs auraient peut-être pu rejoindre une zone d'air frais en amont du ventilateur avant que la paroi ne finisse par brûler. Par ailleurs, l'arrêt du ventilateur depuis la surface n'était pas prévu, alors qu'il aurait peut-être été pertinent de stopper le soufflage dans ces circonstances.

¹⁴ <https://wwwn.cdc.gov/niosh-mining/MMWC#disasters>

¹⁵ Il est à noter cependant que les cas recensés sont uniquement ceux ayant conduit à plus de 5 victimes.

¹⁶ <https://usminedisasters.miningquiz.com/saxsewell/barnett.htm>

Underground Nonmetal Mine Disasters by Accident Type, 1839-2022 (N=7)



Note: A mining disaster is defined as an incident with 5 or more fatalities. [Sources](#)

Accident types are defined as:

- **Explosion** - includes explosives, blast, powder fumes
- **Fire** - includes smoke
- **Water** - includes flood, dam failure, inundation
- **Ground fall** - includes cave-in, roof fall/bump, fall of rock/face/rib, collapse, slide of bank, snowslide
- **Machinery/Equipment fall** - includes cage fall, fall of skip, mine car fall, hoisting accident, crosshead fall, breaking drawbar
- **Suffocation** - includes gas inhalation

Figure 4. Résultats de l'interrogation de la base de données du NIOSH. Les encadrés orange indiquent les cas en lien potentiel avec l'aérage

3.1.3 Autres sources

Par ailleurs, la base de données du MSHA (Mine Safety and Health Administration, Etats-Unis. <https://www.msha.gov/data-and-reports>) donne accès à des rapports d'accidents ayant entraîné des décès. Entre 1995 et 2022, hors mines de charbon, il est enregistré dans la base un seul accident impliquant l'aérage (19 mai 1999, mine d'or, New Mexico), une intoxication fatale due à l'inhalation de monoxyde de carbone issu de tirs à l'explosif (de la veille) pour creuser un puits.

Aucun incident marquant associé à une problématique de ventilation n'est relevé dans la base d'incidents du site Safequarry.com¹⁷ (Grande Bretagne).

De Souza (2024)¹⁸ soulève dans une communication récente des cas constatés de défaillances matérielles qu'il qualifie d'« atypiques » dans des installations de ventilation en exploitation souterraine :

- rupture d'un ventilateur primaire – Cause profonde : défaut chronique de maintenance (absence de programme de maintenance, pas de maintenance régulière). Le second ventilateur encore opérationnel s'est avéré également en mauvais état (corrosion des pales, moteur non stabilisé, ...). Recommandation : établir un plan de maintenance avec contrôles réguliers ;
- défaillance d'un ventilateur – Cause : le diffuseur prévu par conception n'étant pas installé, le ventilateur tournait à un régime au-delà de sa plage de fonctionnement. Recommandation : respecter les spécifications constructeur au montage ;
- rupture de pales d'un ventilateur – Cause : dépôt de béton projeté, transporté dans le flux d'air maintenu à une vitesse élevée pendant des opérations de projection de béton, sur les pales non protégées du ventilateur en fonctionnement, entraînant un déséquilibre puis la casse. Recommandation : réduire la vitesse d'air lors d'un tel chantier et/ou arrêter et protéger le ventilateur des projections ;
- détachement d'un capuchon de moyeu du rotor d'un ventilateur qui a entraîné la déformation de pales, leur décrochage du moyeu et leur projection – Cause : défaut de contrôle du serrage de la pièce Les boulons desserrés peuvent avoir pour origine : un défaut de serrage au montage, des vibrations, des déformations sous contrainte mécanique continue, une expansion thermique, un choc. Recommandations : contrôler régulièrement les serrages de boulons y

¹⁷ Consulté le 19 décembre 2024

¹⁸ De Souza E., Unusual mine ventilation appliance failures, International Mine Ventilation Congress 2024, 12-16/08/2024, Sydney, Australia.

compris sur des pièces secondaires lors des opérations de contrôle et de maintenance, vérifier l'état de corrosion des boulons voire utiliser des boulons en matériau résistant à la corrosion ;

- déconnexion d'une gaine flexible (« ventube ») du conduit d'aérage rigide, entraînant la perte partielle du flux de ventilation – Cause : oscillations de la gaine flexible, pourtant a priori correctement fixée. Recommandation : bien sécuriser les connexions de gaines flexibles avec les gaines rigides et les ventilateurs ;
- usure des pales d'un ventilateur aspirant, provoquant un excès de vibrations, détecté par les capteurs en place, qui stoppe l'alimentation électrique du ventilateur – Cause : aspiration d'air pollué de poussières abrasives. Recommandation : mettre en place un revêtement adapté sur les pales pour prévenir une usure prématurée.

Le guide de bonnes pratiques de l'Association canadienne Workplace Safety North (Ontario) relève quelques mauvaises pratiques, telles que :

- des raccords entre gaines souples, ou entre gaine et ventilateur de diamètres différents, ou des jonctions de gaines en Y, sans adaptateur approprié ;
- des gaines souples mal tendues, voire pincées (voir Figure 5 gauche), qui induisent des pertes de charge conséquentes ;
- des mises en série de ventilateurs auxiliaires avec des gaines souples qui risquent le déchirement en étant trop proches de l'aspiration du ventilateur et/ou sont mal alignées (Figure 5 droite), ou encore sont trop éloignées (risques de recirculations).

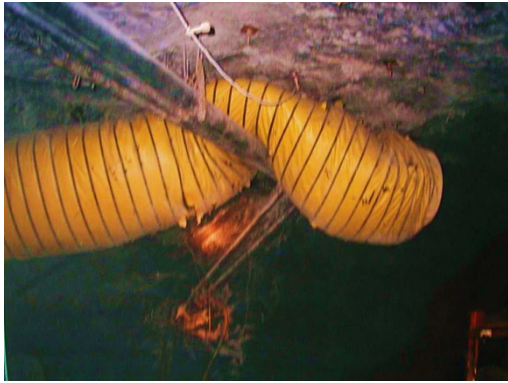


Figure 5. A gauche : gaine de ventilation souple pincée par un passage de câbles ; à droite, ventilateur auxiliaire et gaine souple en série, désaxés et trop proches (source : Auxiliary Ventilation: Good Installation and Maintenance Practices for Miners, Workplace Safety North, 2021)

La consultation de la base de rapports d'enquêtes¹⁹ du régulateur des industries extractives et des sites pétroliers de la Nouvelle-Galles du Sud en Australie (*NSW resources*) fait ressortir un incident particulier, récent, lié à un déficit de ventilation ayant conduit à une accumulation anormale de gaz (méthane et CO₂) dans une galerie de circulation pourtant régulièrement empruntée (2023, mine Narrabri, extraction de charbon). L'insuffisance de ventilation a été identifiée comme provenant de l'ouverture pendant plusieurs heures d'une double cloison d'aérage (barrage d'arrêt) pour passer du matériel, ce qui a réorienté le flux de ventilation selon un trajet inadapté qui ne passait plus par la galerie de circulation, y entraînant une hausse progressive des concentrations en gaz. C'est l'extinction automatique du moteur d'une chargeuse circulant dans cette galerie qui a alerté son conducteur.

Enfin, il est intéressant de signaler le cas d'un feu souterrain de véhicule électrique à batteries dans une mine de nickel en Ontario, le 6 juillet 2020. Du fait d'un court-circuit dans une batterie du véhicule alors que les fusibles de protection de celle-ci avaient été shuntés par erreur, le véhicule d'exploitation a pris feu, générant une chaleur intense et des fumées noires épaisses. Deux opérateurs ont été piégés entre le fond de galerie et le feu sans pouvoir évacuer, mais ont pu donner l'alerte. La proximité d'un réseau d'air comprimé dans la zone où ils étaient coincés leur a permis d'avoir de l'air frais jusqu'à l'extinction du feu par les secours, après plusieurs heures.

¹⁹ <https://www.resources.nsw.gov.au/safety/safety-resources/investigation-reports>

3.1.4 Retours des questionnaires aux inspecteurs « carrières » et des visites

Globalement, peu d'incidents liés à la ventilation ont été remontés via les questionnaires, lors des visites de carrières ou lors d'échanges complémentaires avec des inspecteurs.

- Une situation d'empoussièrément excessif de l'air ambiant est relevée. Elle est liée à un taux d'émission de poussières élevé assorti d'un déficit de ventilation. Afin d'y remédier, l'exploitant a opté pour une solution de suppression des poussières par un système d'aspiration-filtration-dépoussiérage (voir un exemple sur la Figure 6).
- Des événements de pannes électriques sans conséquences (hormis celle de couper la ventilation temporairement et de devoir adapter les travaux d'exploitation en conséquence) ont été signalés.



Figure 6. Exemple d'équipement de dépoussiérage (source : Cogemacoustic)

- Des fuites sur les gaines (coutures défectueuses, déchirements, perforations, ... voir Figure 7) et les raccords peuvent conduire à des pertes de débit qui peuvent s'avérer significatives. Surveiller leur état et les réparer ou les changer permet de maintenir des débits de ventilation adaptés.
- La question de la ventilation naturelle est également ressortie, du fait de la dépendance des écoulements (débit et orientation du flux d'air) aux variations atmosphériques intérieures et extérieures, qui rend difficile de garantir un niveau de ventilation suffisant dans une galerie.



Figure 7. Exemples de gaines de ventilation souples percées (source : Auxiliary Ventilation: Good Installation and Maintenance Practices for Miners, Workplace Safety North, 2021)

3.2 Synthèse du retour d'expérience

Le recensement effectué met en évidence plusieurs cas de défaillances ou d'insuffisances du système de ventilation qui ont contribué à des incidents, voire des accidents, dans les mines et les carrières. Si l'on exclut les mines présentant un risque de présence de grisou, les principales situations problématiques relevées sont :

- les dégagements de gaz toxiques ou asphyxiants²⁰ (gaz de tirs, gaz de combustion des moteurs thermiques, gaz de mine, dioxyde de carbone, etc.) ;
- les émissions de poussières (poussières minérales et/ou particules diesel) ;
- les fumées d'incendie.

Limiter les risques d'exposition à ces émissions normales ou accidentelles est l'objectif premier d'un système de ventilation dans les environnements souterrains. Il ressort qu'il est primordial d'accorder une grande attention à :

- la conception du système de ventilation et son adaptation aux besoins (salubrité, confort de travail) ;
- la tenue à jour du plan de ventilation, au fur et à mesure des avancées des chantiers souterrains ;
- l'entretien des équipements de ventilation (maintenance préventive), et des éléments constitutifs du réseau de ventilation, comme les freins d'aérage, cloisons d'aérage, portes ouvertes ou fermées, ... ;
- la surveillance régulière de l'air ambiant (teneurs en gaz, poussières, oxygène, humidité, température, ...) et des débits dans les galeries ;
- l'application de protocoles de sécurité appropriés (par exemple, l'arrêt des opérations d'exploitation en cas d'identification d'une défaillance de ventilation).

²⁰ par déficit d'air

4 Les évolutions récentes affectant les émissions gazeuses et particulaires

4.1 Emissions liées aux techniques d'exploitation

Les techniques et opérations d'exploitation (foration et tir à l'explosif, havage, marinage, purge, soutènement, boulonnage, concassage, convoyage, transport, remblayage...) n'ont pas ou peu évolué ces dernières décennies dans le domaine de l'exploitation des carrières dans le monde.

Les évolutions portent sur l'amélioration de certains procédés (efficacité, économies d'énergie et d'eau), tels que :

- l'injection d'eau pulvérisée (éventuellement additivée pour réduire la tension superficielle de l'eau et augmenter son pouvoir mouillant) lors des forations²¹, pré-humidification des surfaces en front de taille avant et pendant les tirs par brouillards d'eau, et sur les voies d'accès, pour réduire la mise en suspension des poussières ;
- les dépoussiéreurs, sur les engins d'exploitation et/ou à proximité des activités génératrices de poussières (concasseurs, convoyeurs...). Leur principe est d'aspirer localement les poussières pour les piéger (par filtration, décantation, pulvérisation d'agents tensio-actifs...).

La recommandation AFTES/GT12R9F1⁶ préconise de capoter les convoyeurs de manière à éviter la dispersion des poussières lors du transit des matériaux.

4.2 Emissions liées aux motorisations des machines (en fonctionnement normal ou en situation dégradée)

4.2.1 Emissions en fonctionnement normal

Les seuls moteurs thermiques autorisés dans les carrières françaises (à l'exception des moteurs d'appareils portables dont le réservoir a une capacité au plus égale à 5 L) sont ceux fonctionnant avec des combustibles liquides dont le point d'éclair est supérieur à 55°C avec une teneur en soufre inférieure à 0,3 %, donc typiquement le carburant diesel (« Titre : moteurs thermiques » du RGIE).

Le RGIE impose également que « les fumées doivent, avant leur rejet, être épurées par lavage ou tout autre dispositif d'efficacité au moins équivalente »²².

A l'heure actuelle, les machines d'exploitation en carrières souterraines fonctionnent le plus souvent avec des moteurs thermiques, ou en motorisation électrique filaire.

Les moteurs thermiques ont évolué ces dernières années vers une plus faible consommation de carburant pour une même puissance développée, donc moins de gaz de combustion émis à l'usage, et une amélioration des systèmes d'épuration (catalyse du CO et des NOx, filtration des particules). Les fabricants de machines pour les mines et carrières (par ex. : Caterpillar, Scharf, Sandvik, ...) promeuvent ainsi dans leurs catalogues la mise à disposition d'engins à moteur diesel de plus en plus propres (conformité à la norme européenne de réduction des émissions 'Stage V'²³, utilisation d'une part de biocarburants²⁴).

Les émissions des moteurs thermiques fonctionnant au gazole non routier (à faible teneur en soufre) sont essentiellement :

- du dioxyde de carbone,
- du monoxyde de carbone (en grande partie traité par oxydation catalytique) ;
- des hydrocarbures imbrûlés (en grande partie traités par oxydation catalytique) ;
- des oxydes d'azote (en grande partie traités par réduction catalytique) ;

²¹ La foration à l'eau est une technique très largement adoptée, sinon systématique, en carrières souterraines.

²² sauf pour un moteur de moins de 60 kW lorsqu'il équipe un véhicule n'assurant qu'une fonction de transport autre que de matériaux provenant de l'extraction, et de moins de 30 kW dans les autres cas.

²³ Le niveau V de la norme d'émissions des machines mobiles non routières, adoptée par l'UE en 2016, impose des limites plus contraignantes que les niveaux I à IV sur les émissions de gaz et les émissions de particules.

²⁴ Dont les huiles végétales hydrogénées (HVO)

- du dioxyde de soufre (en quantité très réduite du fait de la basse teneur en soufre du combustible) ;
- des particules fines (en grande partie traitées par filtration) ;
- de l'eau.

Les taux d'émissions de gaz et particules des moteurs dépendent de l'état des moteurs, donc de la qualité de leur entretien et de leur usure normale, de leurs réglages ainsi que de leur régime de fonctionnement (démarrage à froid, sous-régime ou surrégime...). L'efficacité des dispositifs de dépollution dépend de l'état des équipements de catalyse et de filtration.

Des engins à moteurs électriques filaires sont néanmoins également souvent rencontrés : leurs avantages sont l'absence d'émissions de gaz de combustion à l'utilisation, une réduction de la chaleur produite, et moins de bruit. La principale limite de cette solution est l'accessibilité du réseau électrique.

Du fait de l'enjeu de transition énergétique (décarbonation) qui s'ajoute à l'enjeu des conditions sanitaires de travail, une évolution progressive de la motorisation des machines d'exploitation vers une motorisation électrique à batterie est attendue. La plupart des fabricants d'engins pour l'exploitation souterraine (Aramine, Sandvik, Normet, Scharf, Epiroc, Caterpillar, ...) proposent des motorisations électriques à batteries Li-ion, avec des capacités variables selon les équipements, pouvant atteindre typiquement plusieurs centaines de kWh pour les plus gros engins souterrains. Les conditions sanitaires et de confort de travail sont similaires aux solutions par l'électrification filaire : absence d'émissions de gaz et de particules de combustion, moindre dégagement de chaleur et moindre bruit. En outre, des études comparatives^{25,26} semblent indiquer que le taux de poussières inhalables mises en suspension avec un engin à batteries serait inférieur à celui mesuré avec un engin à moteur à combustion interne, toutes choses égales par ailleurs – cela pourrait s'expliquer par l'action des gaz d'échappement d'un moteur diesel et/ou du ventilateur du carter moteur qui soulèvent les poussières des surfaces des galeries.

Enfin, concernant l'électrification, certaines configurations de carrières et mines de grande ampleur ont permis de développer une solution qui combine l'électrique filaire (via un pantographe) et l'électrique par batteries : le « trolley » (Figure 8), solution adaptée pour équiper plutôt de grandes galeries d'accès.



Figure 8. Exemple de camion minier à batteries, assisté d'un système de type 'trolley' sur un chemin d'accès principal (mine d'extraction de métaux en Suède) [source : Epiroc]

Concernant l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur d'énergie dans le domaine de l'industrie extractive, les premières applications au niveau mondial sont annoncées pour les années à venir²⁷ :

²⁵ Halim, A., Löw, J., Johansson, J. *et al.* Improvement of Working Conditions and Opinions of Mine Workers When Battery Electric Vehicles (BEVs) Are Used Instead of Diesel Machines — Results of Field Trial at the Kittilä Mine, Finland. *Mining, Metallurgy & Exploration* **39**, 203–219 (2022)

²⁶ Acuña-Duhart, E., Le, J., Levesque, M., & Le, P. (2024). New Afton Mine diesel and battery electric load-haul-dump vehicle field test: Heat and dust contribution study. *CIM Journal*, *15*(3), 158–171.

²⁷ Sources Web : [Anglo American unveils a prototype of the world's largest hydrogen-powered mine haul truck - a vital step towards reducing carbon emissions over time | Anglo American](#)
[Fortescue and Liebherr establish partnership for zero emission mining equipment - Liebherr](#)

camions miniers (tombereaux) « zéro émission » équipés de moteurs électriques alimentés par piles à combustible hydrogène ou combinant piles à combustible hydrogène et technologie de batteries au lithium (Figure 9). D'autres projets visent des équipements à énergie combinée hydrogène-diesel²⁸. Ces technologies alternatives ont encore besoin de mûrir, notamment pour coûter moins cher à la fabrication et à l'utilisation, ainsi que pour en maîtriser les risques, en particulier en milieu souterrain.

L'un des intérêts majeurs de la technologie de pile à combustible hydrogène est de ne rejeter à l'atmosphère, lors de son utilisation, que de l'eau et de la chaleur. Si le dégagement de chaleur d'une pile à combustible est très inférieur à celui d'un moteur thermique, en revanche il semble que le dégagement d'eau soit du même ordre de grandeur²⁹. De ce fait, il convient de garder à l'esprit qu'une réduction des débits de ventilation pourrait alors induire une hausse de l'humidité ambiante, pouvant influencer sur le confort des travailleurs voire générer plus fréquemment la formation de brouillards par condensation de l'humidité au contact de milieux plus froids lors de la remontée de l'air humide chaud aux étages supérieurs de l'exploitation souterraine.

Concernant le territoire national, la tendance est de se tourner vers des motorisations diesel moins émettrices et vers des machines électriques (filaires et à batteries), bien adaptées à des carrières souterraines de taille moyenne. Il n'a pas été relevé de projets liés à des motorisations à hydrogène en France, hormis un projet qui a été abandonné pour l'instant. La solution hydrogène est a priori jugée encore trop chère et pas assez mûre.



Figure 9. A gauche : camion prototype, motorisation hybride pile à combustible-batteries [source : Anglo American] ; à droite : tombereau prototype articulé à pile à combustible hydrogène [source : Volvo CE]

4.2.2 Emissions en situation dégradée

Plusieurs situations dégradées susceptibles de conduire à des émissions différentes de celles évoquées dans le précédent chapitre peuvent être identifiées.

Pour les motorisations diesel, les événements suivants sont identifiés :

- un déversement de combustible liquide hors de son réservoir, avec émission éventuelle de vapeurs d'hydrocarbures inflammables – si le liquide est chauffé – et nocives ;
- un incendie de flaque de combustible liquide, avec émission de fumées toxiques (CO, CO₂, NOx, suies, ...) et chaudes.

Il peut être noté que des dispositifs d'extinction automatique sont fréquemment mis en place sur les engins à moteur thermique, et sont requis par l'arrêté du 05/08/1987³⁰ pour les moteurs thermiques de puissance supérieure à 200 kW.

²⁸ Source Web : Hydrogen-powered vehicles: innovations in the future of mining machinery? - Mining Technology (<https://www.mining-technology.com/features/hydrogen-powered-vehicles-innovations-in-the-future-of-mining-machinery/>)

²⁹ "Hydrogen and our energy future", US Department of Energy, 2005 (https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/hydrogenenergyfuture_web.pdf)

³⁰ Arrêté du 05/08/87 relatif aux moyens de lutte contre l'incendie associés à l'utilisation de matériels équipés de moteurs thermiques (MT-1-A, articles 9 et 13)

Par comparaison,

- pour les motorisations électriques à batteries, il peut être identifié la spécificité d'un dégazage de pack batteries lors d'une surchauffe (défaillance interne ou incendie externe) entraînant une décomposition thermique, avec ou sans combustion : au-delà des produits classiques en cas de combustion des matériaux constituant l'équipement (CO, CO₂, NOx, HCl...), il faut signaler³¹ :
 - a. des émissions gazeuses de vapeurs chaudes issues de l'électrolyte (carbonates organiques), d'hydrogène, d'hydrocarbures légers, de composés fluorés (HF notamment), ... ;
 - b. des émissions particulaires (carbonées, métalliques) spécifiques aux matières actives des cellules.
- Ces émissions sont potentiellement inflammables, induisant le risque de formation d'une ATEX locale en galerie, avec risque d'inflammation induisant potentiellement des effets thermiques et des effets de surpression si le confinement est suffisant, et toxiques. En cas d'incendie, des travaux expérimentaux ont montré que le pic de puissance d'un incendie de véhicule (léger) électrique est typiquement comparable à celui d'un véhicule (léger) thermique. Les quantités de fumées émises sont du même ordre de grandeur également. Il est à noter néanmoins que, lors d'un emballement thermique de batterie, une émission intense de fumées peut survenir dès début, alors que l'ord d'un incendie de véhicule classique, l'incendie est susceptible de monter en puissance plus progressivement. Enfin, la durée d'incendie pourrait également être supérieure, du fait de la plus grande difficulté à éteindre un feu de batterie au lithium (Halim, 2024)³². Il faut garder en tête que ces données expérimentales ne sont pas nécessairement représentatives des nouveaux engins miniers électriques à batteries, a priori équipés de batteries de plus grosses capacités ;
- pour les motorisations impliquant de l'hydrogène comme vecteur d'énergie :
 - c. une fuite de gaz sur le circuit d'hydrogène pressurisé (réservoir, tuyauterie, dispositif de décompression...), avec risque de formation d'une ATEX et/ou d'hypoxie ;
 - d. un éclatement du réservoir d'hydrogène, avec risque de formation d'une ATEX et/ou d'hypoxie.

Pour aller plus loin sur les risques associés à ces technologies émergentes, le lecteur pourra consulter le rapport Ineris « Utilisation des sources d'énergie émergentes dans l'exploitation des industries extractives en souterrain »³³.

4.3 Conséquences de ces évolutions sur l'exposition des travailleurs

Les évolutions des techniques d'exploitation identifiées au chapitre 4.1 apportent des améliorations dans la réduction de la mise en suspension des poussières et leur captation. Une réduction des poussières en suspension dans l'air permet de réduire les exigences en matière de ventilation dans le milieu souterrain, sous réserve que les poussières ne soient le facteur dimensionnant.

Les évolutions en cours ou projetées des motorisations (batteries, piles à combustible) équipant les engins d'exploitation en milieu souterrain influent essentiellement sur :

- En fonctionnement normal :
 - e. une moindre quantité de chaleur dégagée ;
 - f. des dégagements gazeux et particulaires très réduits, voire nuls ;
- En situation dégradée :
 - g. des dégagements potentiellement problématiques du point de vue de l'exposition des travailleurs.

Les deux premiers points ci-dessus permettent de réduire a priori les exigences en matière de ventilation des galeries, en fonctionnement normal.

³¹ Ineris, Profil de risque des batteries Li-ion LFP, Rapport Ineris – 213996 – 2761939 – v1.0, 2023

³² Halim A., Managing fire safety of Battery Electric Vehicles (BEVs) in underground mines, 9th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Kiruna Sweden 17-19 September 2024

³³ rapport référencé Ineris - 227350 - 2804855 - v1.0, 2024

En revanche, le dernier point met en avant des risques d'exposition, en situation dégradée, à des vapeurs et particules de nature potentiellement différente de celles rencontrées du fait de l'utilisation de combustibles liquides de type diesel :

- risques de formation de nuages inflammables (dégazage de modules de batteries, fuite sur réservoir et circuit d'hydrogène) ;
- risques d'exposition à des mélanges gazeux différents de ceux produits par un moteur thermique.

4.4 Conséquences de ces évolutions sur les systèmes de ventilation

L'évolution vers des motorisations électriques ou à hydrogène peut avoir des conséquences significatives sur les besoins en ventilation.

En effet, la réduction, voire la suppression, d'émissions gazeuses et particulaires et le plus faible dégagement de chaleur permettent, en principe, une réduction des débits de ventilation exigés pour maintenir des conditions ambiantes acceptables pour l'exploitation souterraine. Cet éventuel gain en matière de ventilation se traduit pour les exploitants par une baisse de consommation énergétique et de coût de fonctionnement³⁴. La conversion totale à l'électrique d'une flotte diesel pourrait réduire significativement les besoins en ventilation dans une exploitation souterraine – jusqu'à près de la moitié, selon certains experts du domaine³⁵. Cela dépend néanmoins, bien entendu, du type d'activité et des modes d'exploitation mis en œuvre.

Par ailleurs, en situation dégradée (dégazage de batterie, fuite de combustible hydrogène, incendie), les émissions gazeuses et particulaires sont différentes des fumées d'incendie classiques, tant sur le plan de la toxicité que de l'inflammabilité des émanations, avec, notamment, un risque de formation et de transport d'atmosphères explosives en galerie. Les études spécifiques visant à établir des plans de secours en situation accidentelle devront prendre en compte ces nouvelles données.

³⁴ La ventilation dans une exploitation souterraine peut représenter 40 à 50 % de sa consommation électrique (De Souza E., Cost saving strategies in mine ventilation, CIM Journal, 9 (2), 2018)

<https://www.airfinders.ca/wp-content/uploads/2015/05/Cost-Saving-Strategies-in-Mine-Ventilation.pdf>

³⁵ "Charged up: Key considerations around electric vehicle use on mine sites", K. Trapani, 2021 (<https://www.stantec.com/en/ideas/topic/covid-19/charged-up-key-considerations-around-electric-vehicle-use-on-mine-sites>)

5 Les évolutions technologiques en lien avec la ventilation

Ce chapitre recense les évolutions technologiques des systèmes de ventilation, les évolutions des bonnes pratiques de ventilation, et des méthodes de dimensionnement des réseaux de ventilation.

5.1 Evolutions technologiques des systèmes de ventilation (équipements, outils de contrôle)

Les améliorations des dispositifs de ventilation sont principalement :

- des gains d'efficacité des équipements, par optimisation des matériels, dans un objectif de limiter les pertes de charge et réduire la consommation énergétique tout en conservant les mêmes débits : modification des profilés de pales de ventilateurs, modification des diffuseurs, ... ;
- des réductions des pertes de charge par amélioration des configurations d'installation des ventilateurs, en amont de ceux-ci, au niveau du collecteur principal (éviter les coudes brusques, etc.) ;
- des ventilateurs plus compacts et plus légers ;
- une plus grande fiabilité matérielle (matériaux de fabrication, évacuation de la chaleur, réduction des vibrations...).

L'innovation récente la plus marquante en ce qui concerne la technologie des équipements de ventilation consiste à développer des ventilateurs dont la performance peut être pilotée automatiquement de manière optimisée en fonction des besoins, en temps réel (concept de « performance à la demande » associé au concept de « ventilation à la demande », voir § 5.3.2.1).

En complément de bancs d'essais permettant de tester et améliorer les équipements de ventilation, les fabricants font appel à des études numériques pouvant être effectuées, via l'utilisation de codes de calcul CFD, pour optimiser l'aérodynamique dans les ventilateurs.

Les configurations géométriques d'installation des ventilateurs sur site peuvent également être optimisées via des outils de calcul de pertes de charge – de l'outil 1D basé sur les bases de données de pertes de charge³⁶ à l'outil de calcul CFD modélisant l'écoulement 3D en amont et/ou en aval du ventilateur.

De Souza (2015)³⁷ illustre de quelques exemples démonstratifs comment des gains d'efficacité peuvent être apportés en modifiant la configuration d'installation d'un ventilateur, par exemple en adoucissant une bifurcation brusque en amont d'un ventilateur ou en modifiant la forme et les dimensions d'un diffuseur en aval d'un ventilateur.

Enfin, ces équipements de ventilation (les ventilateurs, leurs accessoires et l'instrumentation aidant au pilotage de la ventilation – capteurs, ...) nécessitent un niveau de maintenance suffisant pour que la fonction de ventilation soit assurée, afin de protéger les conditions de travail et la santé des travailleurs, et de réduire la fréquence des arrêts d'exploitation imprévus du fait de défaillances de la ventilation. Au-delà des outils informatiques aidant à gérer la maintenance préventive des équipements, des développements récents visent à mettre en œuvre le concept de « maintenance prédictive ». Il s'agit de s'appuyer sur un suivi en temps réel des conditions de fonctionnement des équipements (chaleur, vibrations, humidité, vitesse de rotation, ...), associé à un système logiciel de diagnostic automatique³⁸, pour identifier à partir de signaux faibles, des anomalies indicatrices de potentielles futures défaillances³⁹. Cela permet d'anticiper des actions de maintenance préventive avant que surviennent les défaillances.

³⁶ Par exemple, le Chapitre VI du numéro spécial de la Revue de l'Industrie Minérale, Aérage (2^{ème} partie), Document S.I.M. N2, 1962 ou encore le Mémento des pertes de charge (Idel'cik I. E., Mémento des pertes de charge, Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Eyrolles, 1986).

³⁷ De Souza E., Improving the energy efficiency of mine fan assemblages, Applied Thermal Engineering, Volume 90, 2015, pp. 1092-1097.

³⁸ construit par méthode d'apprentissage automatique (« *machine learning* »)

³⁹ CETU, Fonctionnement en sécurité des équipements de ventilation, Collection *Les documents d'information*, décembre 2024.

5.2 Evolution des bonnes pratiques et normes de dimensionnement de la ventilation

5.2.1 Normes et guides de bonnes pratiques actuels

Un recensement, non exhaustif, des normes et recommandations concernant la ventilation en milieu souterrain, aux niveaux français et international est présenté dans le tableau ci-après.

Catégorie	Organisme	Intitulé / référence	Éléments de contenu
Réglementation	Etat français	Règlement Général des industries extractives (RGIE) (Décret n° 80-331 du 7 mai 1980) Titre : Aérage	Référence réglementaire française relative à la santé et la sécurité des travailleurs pour les industries extractives En complément du Code du Travail
Guide / recommandations	Association Française des tunnels et de l'Espace Souterrain (AFTES)	<i>Ventilation mécanique des Ouvrages Souterrains en cours de construction et de réhabilitation – GT27R1F2</i> mise à jour 2023 des recommandations <i>Ventilation des Ouvrages Souterrains en cours de construction – GT27R1F1</i> , de 2003	Document dédié à la ventilation dans les chantiers de construction/réhabilitation d'ouvrages souterrains (tunnels). Limites de vitesse d'air
Guide / recommandations		La sécurité de la circulation des personnels et matériels pendant l'exécution des travaux en souterrain – GT12R1F1, date inconnue	
Guide / recommandations		La lutte contre les nuisances dans les chantiers souterrains – GT12R9F1, 2005	
Guide / recommandations	CARSAT Rhône-Alpes & CETU	Bonnes pratiques pour la sécurité et la protection de la santé lors de travaux en souterrain, 2013	Plus spécifique aux chantiers de construction d'ouvrages souterrains (tunnels, parkings etc.) Vitesse minimale en galerie = 0,3 m/s
Norme	SIA (Société suisse des Ingénieurs et des Architectes)	Ventilation des chantiers souterrains, SIA 196, 1998	Document destiné aux chantiers de construction d'ouvrages souterrains (tunnels) – Rôle de la ventilation / Principes / Calculs / Matériel / Mise en œuvre
Guide / recommandations	Department of Energy; Mines, Industry regulation and Safety, Western Australia	Guide sur la qualité de l'air et la ventilation en milieu souterrain (Guidance about underground air quality and ventilation (dmp.wa.gov.au))	
Guide / recommandations		Code of Practice – Ventilation in Underground Mines and Tunnels, 2014	

Guide / recommandations		Code of Practice – Fire or Explosion in Underground Mines and Tunnels, 2014	
Guide		Underground ventilation management audit – guide (2020)	Ce document est un guide d'inspection des équipements et procédures de ventilation 1 Ventilation personnel – <i>Personnel en charge de la ventilation</i> 2 Air measuring equipment – <i>Équipements de mesure dans l'air</i> 3 Air measurement – <i>Mesures dans l'air</i> 4 Ventilation record keeping – <i>Conservation des données de ventilation</i> 5 Ventilation plans – <i>Plans de ventilation</i> 6 Fans – <i>Ventilateurs</i> 7 Ventilation control devices – <i>Instruments de contrôle de la ventilation</i> 8 Ventilation system operation – <i>Fonctionnement du système de ventilation</i> 9 Contamination control – <i>Contrôle de la pollution</i> 10 Diesel equipment – <i>Équipements à moteurs diesel</i> 11 Disused areas – <i>Zones désaffectées</i>
Guide / recommandations	MinEx Health & Safety Council, Nouvelle Zélande	Guidelines for the ventilation of underground mines and tunnels, 2010	Chapitre sur la modélisation de la ventilation : → Modélisation à reprendre si des modifications importantes de la ventilation sont envisagées → un plan du réseau de ventilation doit être tenu à jour
Guide / recommandations	NSW Resources Regulator, Nouvelle-Zélande	Technical Reference Guide – Ventilation Control Plan, 2021	Guide d'élaboration d'un plan de contrôle de la ventilation pour les mines souterraines, complément au Code du Travail (Clause 62 de la loi WHS)

			(MPS)). Il précise les attendus d'un tel plan : - Mise à jour dès qu'il y a des modifications du système de ventilation - Identification des dangers : émissions gazeuses, chaleur, humidité - Caractérisation de la résistance du réseau souterrain - Gestion des poussières : des vitesses d'air inférieures à 7 m/s sont recommandées⁴⁰ - ...
Guide / recommandations	National Institute for Occupational Safety & Health (NIOSH, États-Unis)	Using mine planning and other techniques to improve ventilation in large-opening mines, Grau III & Krog, 2008 (https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/umpao.pdf)	L'article fait état de techniques efficaces pour améliorer la ventilation en réseaux souterrains de grande envergure
Guide / recommandations	Workplace Safety North, Ontario	Auxiliary Ventilation: Good Installation and Maintenance Practices for Miners, 2021	Lignes directrices sur la ventilation auxiliaire dans les mines : • Pourquoi la ventilation est importante - les effets sur la santé • Les raisons des problèmes de ventilation dans les mines • Législation pertinente en Ontario, Canada - Règlement 854 sur les mines • Le bon et le mauvais dans l'installation des conduites de ventilation auxiliaires, les problèmes et les solutions

Tableau 2. Normes, recommandations et guides de bonnes pratiques sur la thématique de la ventilation en milieu souterrain

5.2.2 Synthèse et évolution des recommandations et bonnes pratiques

Ci-après, sont listées des recommandations qui sont retrouvées classiquement dans ces documents :

- L'air frais aspiré à l'extérieur par le circuit primaire pour alimenter le réseau souterrain doit être puisé dans une zone où l'air n'est pas pollué (en particulier loin de l'extraction d'air pollué) ;
- les ventilateurs doivent être adaptés aux débits requis en fonction de la résistance aéraulique du réseau ;
- les méthodes d'exploitation doivent être prises en compte dans le dimensionnement de la ventilation ;
- un débit d'air minimal doit être assuré par kW de puissance moteur diesel en fonctionnement dans le milieu souterrain. Les réglementations nationales et régionales imposent généralement un débit d'air par kW de puissance moteur, par exemple :
0,068 m³ / s / kW selon l'AFTES, 0,05 à 0,06 m³ / s / kW en Australie, 0,06 m³ / s / kW en Ontario (Canada), 0,047 à 0,092 m³ / s / kW dans d'autres provinces du Canada...
- la formation des poussières lors des opérations d'exploitation doit être limitée par des mesures d'atténuation (brouillards d'eau, pré-humidification des surfaces, ...) ;
- la vitesse d'air doit être limitée pour minimiser la mise en suspension de poussières (< 6-7 m/s, parfois moins – AFTES : 2,5 à 3,5 m/s) ;

⁴⁰ Plusieurs autres sources recommandent de ne pas dépasser 6 m/s pour éviter une mise en suspension excessive de poussières par l'écoulement d'air.

- les opérateurs d'engins doivent être protégés par des cabines pressurisées, avec circulation d'air traité (filtré) ;
- la maintenance des équipements des circuits de ventilation secondaires doit être réalisée de manière régulière et adaptée ;
- la maintenance des appareils de mesure (détecteurs gaz, anémomètres) qui participent à la chaîne de contrôle/pilotage du système de ventilation doit être réalisée de manière régulière et adaptée ;
- L'exploitant doit disposer à tout moment d'un plan de ventilation du milieu souterrain le plus à jour possible.

Au regard des progrès des moteurs diesel sur le plan des émissions de particules et de gaz, et des conversions en cours et à venir vers d'autres types de motorisations, électriques notamment, et compte tenu des futures capacités de simulation et de pilotage fin de la ventilation, il est possible que ce type de prescription soit remplacé par des études démonstratives au cas par cas, pour des exploitations souterraines de grande envergure.

Il peut être noté que le MSHA américain a opté pour une certification des modèles de moteurs, associant un débit de ventilation spécifique minimal pour chacun. Halim (2017)⁴¹ en donne quelques exemples, partiellement repris à titre illustratif dans le tableau ci-dessous.

Fabricant du moteur	Modèle	Exigence de ventilation pour diluer les gaz (m ³ / s / kW)
Caterpillar	3054 DIT	0,052
Cummins	QSX15	0,025
Volvo	TAD1340VE	0,028

A noter, quelques évolutions des prescriptions pour la ventilation, dans les recommandations de l'AFTES entre 2003 et 2023, reprises dans le tableau ci-après.

Recommandations AFTES 2003⁸	Recommandations AFTES 2023⁹
0,05 m ³ / s / CV ⁴² (soit ≈ 0,07 m ³ / s / kW) pour les moteurs thermiques	0,05 m ³ / s / CV x Coefficient de foisonnement [entre 0 et 2] ⁴³
0,3 m ³ / s / m ² de section, pour les poussières, gaz (de tirs et de terrain)	0,5 m ³ / s / m ² de section
Vitesse de retour d'air en galerie entre 0,5 m/s et 1,5 m/s	0,5 à 2,5 m/s

5.3 Evolution des outils de dimensionnement

Cette section relate les évolutions identifiées concernant les outils et méthodes de dimensionnement d'un système de ventilation pour une exploitation souterraine. La première partie dresse un inventaire, probablement non exhaustif, des outils existants dédiés à la modélisation des écoulements d'air dans un réseau souterrain. La seconde partie décrit les évolutions en cours sur ce sujet, au regard notamment des progrès de modélisation.

5.3.1 Outils existants

Afin d'aider au dimensionnement des installations de ventilation/aérage, il existe des outils de modélisation de réseau aéraulique complexe (cf. Figure 10) permettant de simuler les vitesses et débits volumiques d'air dans les galeries, avec, le plus couramment, une approche de résolution monodimensionnelle des équations dans chaque branche du réseau.

Les outils de simulation permettent de modéliser des réseaux entiers avec plusieurs entrées et sorties d'air et :

- d'y simuler l'équilibre des flux d'air (débit et vitesse), voire la dispersion des gaz ;

⁴¹ Halim A., "Ventilation requirements for diesel equipment in underground mines – Are we using the correct values ?", 16th North American Mine Ventilation Symposium, Golden, Colorado, Etats-Unis, 2017.

⁴² 1 CV ≈ 0,736 kW

⁴³ Le foisonnement est la capacité d'un sol ou de gravats à augmenter de volume lors du déplacement du matériau. Le coefficient de foisonnement est le ratio entre le volume final et le volume initial.

- de déterminer la position et le type de ventilateur à mettre en place à partir des données constructeur et des caractéristiques du circuit souterrain ;
- d'ajuster les débits et vitesses d'air dans les galeries en réglant les ventilateurs de manière adéquate ;
- d'anticiper les évolutions des teneurs en gaz et particules en exploitation ;
- de simuler les situations de dérives critiques comme celle d'un incendie dans une galerie, pour identifier le comportement du réseau aéraulique, anticiper les actions pertinentes à mettre en œuvre (ex : arrêt, réduction, maintien ou augmentation de la ventilation primaire ?) et identifier les chemins d'évacuation et les points de refuge pour le personnel.

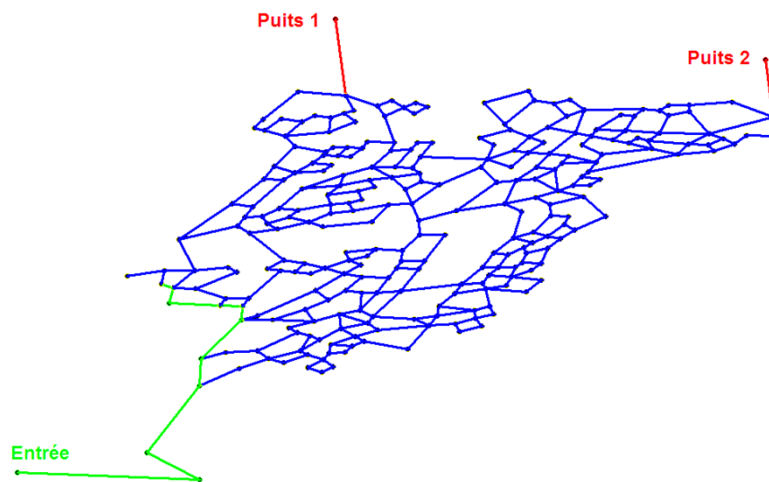


Figure 10. Exemple d'une maquette numérique du réseau tridimensionnel d'une exploitation souterraine (source : Ineris)

Les outils d'équilibrage de réseau aéraulique monodimensionnels les plus classiques peuvent par exemple être fondés sur les lois de Kirchhoff, en raisonnant par analogie avec les réseaux électriques, en appliquant la loi des mailles pour les pertes de charge et la loi des nœuds pour les débits. La théorie des réseaux maillés permet alors de déterminer les inconnues et de choisir des équations indépendantes parmi toutes celles représentatives de l'équilibre du réseau. Une méthode courante utilisée pour résoudre ces équations est la méthode numérique de relaxation dite « de Hardy Cross⁴⁴ ». Les pertes de charge régulières par frottement dans les galeries et les pertes de charge singulières (changements de direction ou de section droite, etc.) sont prises en compte. Il convient de noter que les pertes de charge singulières associés à une singularité dans le réseau peuvent être différentes selon le sens de l'écoulement à cet endroit.

Il existe des outils commerciaux (Morar et al, 2017⁴⁵ ; Bui, Życzkowski & Łuczak, 2022), mais aussi des outils « maison » mis en œuvre par les bureaux d'études qui les ont développés, par exemple NewVendis, de l'Ineris ou la suite Aéro®, de Sub'Roca. Un inventaire de ces outils, probablement non exhaustif, est présenté dans le Tableau 3. Ces outils diffèrent les uns des autres, notamment, par leurs interfaces utilisateurs / leur ergonomie, et par les modules spécifiques associés (simulation d'incendie, simulation d'une dispersion de gaz, chaleur, ...).

Précisons que :

- certains outils recensés sont des outils « historiques », qui ne sont probablement plus distribués, voire ne sont plus utilisés ;
- d'autres logiciels de simulation aéraulique plus génériques, non spécifiquement dédiés à la ventilation en réseau de galeries, existent, tels que FlowNex ou CADvent ; ceux-là n'ont pas été repris dans l'inventaire.

⁴⁴ Cross H., Analysis of flow in networks of conduits or conductors, Eng. Exp. Station, Bull. N°286, 1936

⁴⁵ Morar M., D. Radu, D. Cioclea, I. Gherghe, Use of IT equipment and specialized programs for solving ventilation networks, Quality Access to Success, n°18, 2017.

Outil	Développeur / distributeur	Problématique(s) traitée(s) (Aéraulique / Dispersion ? Incendie ?*)	Commentaire
Mines et carrières souterraines			
<i>VentSim Design</i>	Howden	Aéraulique, dispersion, incendie	Logiciel commercial Usage répandu dans le domaine des mines et carrières <i>Danko et al., 2017</i> ⁴⁶
<i>VNet</i> <i>Ventilation Network Simulator</i> <i>MineFire</i> <i>ClimSim</i> <i>DuctSim</i>	SRK Consulting	Aéraulique, dispersion Aéraulique, dispersion, incendie Aéraulique Aéraulique	Logiciel commercial Adapté de l'outil VNetPC Basé sur l'outil VNet. Prédit les flux de chaleur et de contaminants Prédit les conditions climatiques dans un milieu souterrain Prédit les écoulements en réseau de conduits de ventilation
<i>VUMA-network</i> "Ventilation of Underground Mine Atmospheres"	BBE Group (Bluhm Burton Engineering)	Aéraulique, dispersion, incendie	Logiciel commercial <i>Marx et al., 2001</i> ⁴⁷ ; <i>Marx & von Glehn, 2004</i> ⁴⁸
<i>VentGraph</i>	IMG PAN (Strata Mechanics Research Institute - Polish Academy of Science)	Aéraulique, dispersion, incendie	Mode de distribution du logiciel : inconnu Utilisé par les postes de secours des mines en République Tchèque, Slovaquie et Pologne <i>Dziurzyński et al, 2013</i> ⁴⁹
<i>FlowNet</i>	XGraphic	Aéraulique	Mode de distribution du logiciel : inconnu <i>Imgrund et al., 2019</i> ⁵⁰
<i>3D CANVENT</i>	CANMET Mining and Mineral	Aéraulique	<i>Li, Kocsis & Hardcastle, 2009</i> ⁵¹ ; <i>Morar et al. 2017</i> ⁵²

⁴⁶ Danko G.; D. Bahrami, C. Stewart, Computational energy dynamics solver for mine ventilation simulations. 16th North American Mine Ventilation Symposium, Colorado School of Mines, 2017

⁴⁷ Marx W., F. von Glehn, S. Bluhm, M. Biffi, VUMA – a mine ventilation and cooling network simulation tool, 7th International Mine Ventilation Congress, Poland, 2001.

⁴⁸ Marx, W., F. von Glehn, VUMA-network: a simulation tool for mine ventilation and cooling networks, 2004. <https://www.vuma3d.com/wp-content/uploads/2021/04/VUMA-network- A-simulation-tool-for-mine-ventilation-and-cooling-networks.pdf>

⁴⁹ Dziurzyński W., Pałka T., Krawczyk J., Ventgraph for Windows—Ventilation Engineer's Program System for Analyzing the Ventilation Network under Normal and Emergency Conditions — Simulation of Transient Flow of Air and Fire Gases — Manuals, *Transaction of Strata Mechanics Research Institute*, Poland, 2013

⁵⁰ Imgrund T., A. Bischoff, S. Spürk, Comparison of mine ventilation software tools for underground coal mines in harsh conditions, 17th North American mine Ventilation Symposium, 2019

⁵¹ Li G., C. Kocsis, S. Hardcastle, 3D-CANVENT: an integrated computer package for simulating the underground mine ventilation systems, 18th international symposium on mine planning and equipment selection & 11th international symposium on environmental issues and waste management in energy and mineral production, Canada, 2009

⁵² Morar M., Ciolea D., Vasilescu G., Ianc N., Ciora C., Prospective solving of a ventilation network using 3d Canvent software, 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 2017

	Sciences Laboratories		
Aéro	Sub'Roca	Aéraulique, dispersion	Outil interne à la société, non distribué
NewVENDIS	Ineris	Aéraulique, dispersion	Outil interne à la société, non distribué
ICAMPS MineVent	Ohio Automation	Aéraulique, dispersion	Logiciel commercial
ICAMPS MineFire		Aéraulique, Incendie	Logiciel commercial Spécifique pour les effets d'un incendie, basé sur le code MFIRE (voir ci-dessous)
MFIRE (4.0)	US Bureau of Mines / NIOSH Mining	Aéraulique, dispersion, incendie	Logiciel Open Source www.cdc.gov/niosh/mining/works/cover-sheet1816.html V4.0 de décembre 2020
MIVENA	Université de Kyushu	Aéraulique	Logiciel distribué gratuitement v6.2 de 2001 : https://reps.mine.kyushu-u.ac.jp/mivena/mivena62c.zip <i>Sasaki & Dindiwe, 2002</i> ⁵³
VenPri / VenSec	AiteminLE / Fondation Barredo	Aéraulique, dispersion, incendie	Mode de distribution du logiciel : inconnu (en espagnol)
Tunnels			
CAMATT	CETU (Centre d'Etudes des Tunnels)	Aéraulique, dispersion, incendie	Ventilation en tunnels : dimensionnement et stratégie de désenfumage Modélisation du trafic routier Reconnu réglementairement en France pour cet usage <i>CETU, 2011</i> ⁵⁴
SES (Subway Environment Simulation) – STESS (Subway Thermal Environment Simulation Software)	US Department of Transportation, Federal Transit Administration / Never Gray	Aéraulique, dispersion	Ventilation en tunnels

Tableau 3. Inventaire des logiciels de modélisation de réseaux de ventilation en mines et carrières.
*« Aéraulique » : écoulement d'air dans le réseau, « dispersion » : transport et diffusion de gaz, de fumées ou de poussières dans le réseau, « incendie » : modules permettant de prendre en compte les effets d'un incendie

Pour des problématiques plus spécifiques, ou plus locales, d'optimisation des configurations de ventilation en galeries souterraines, apparaissent depuis plusieurs années des travaux scientifiques et techniques exploitant la simulation 3D. Cette approche permet de simuler l'écoulement en galerie et la dispersion des gaz et poussières – émissions diffuses, émissions au front de taille, fumées d'incendie, ... – en utilisant des codes de calcul CFD (Computational Fluid Dynamics) (Hasheminasab et al.,

⁵³ Sasaki K., C. Dindiwe, An integrated mine ventilation simulator MIVENA Ver. 6 with applications, 9th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, Canada, 2002

⁵⁴ CETU, Camatt 2.20: Users' Guide, 2011

2019⁵⁵ ; Gendrue et al., 2023⁵⁶). De telles approches permettent d'affiner la simulation de la dynamique tridimensionnelle des fluides dans des configurations complexes. Plusieurs auteurs (Xu et al., 2017⁵⁷, Brodny & Tutak, 2021⁵⁸, Yi et al. (2022)⁵⁹) proposent des tours d'horizons des cas d'application de codes de calcul CFD dans le domaine de la ventilation en milieux souterrains miniers, traitant de problématiques de ventilation en front de taille (gaz et poussières), de dispersion de gaz et poussières en galeries, d'optimisation de position de bouches d'aérage ou de ventilateurs et mode de fonctionnement (soufflant ou aspirant), ou encore de propagation de fumées d'incendies et de chaleur dans le réseau de galeries. La Figure 11 montre deux applications très différentes d'une approche de modélisation 3D de type CFD, pour évaluer et optimiser la ventilation dans des réseaux souterrains.

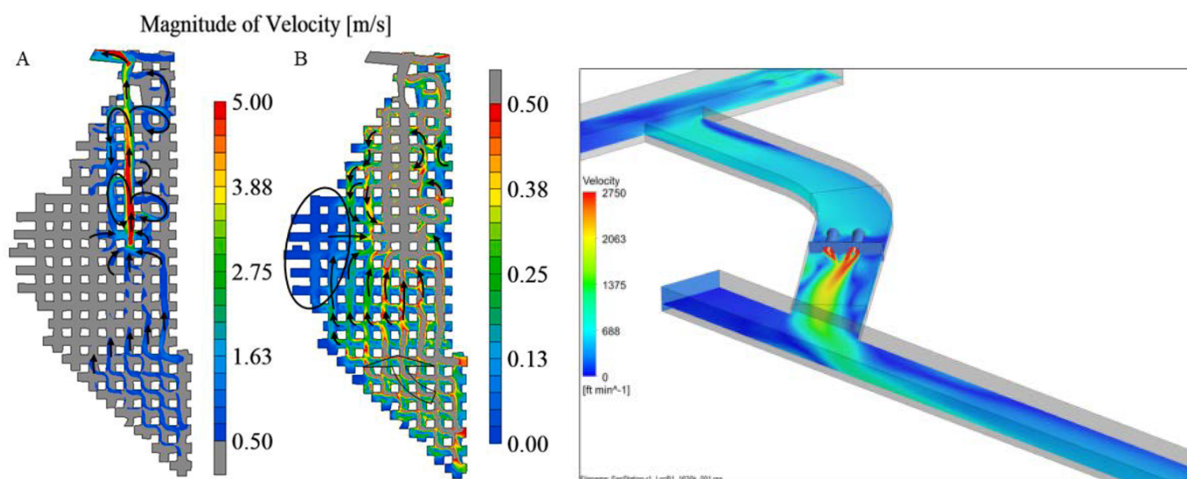


Figure 11. Exemples d'utilisation de la CFD : à gauche, effet de l'ajout de ventilateurs auxiliaires dans une portion d'exploitation par chambres et piliers [source : Gendrue et al, 2023⁵⁶] ; à droite, optimisation du positionnement d'accélérateurs dans une jonction entre deux galeries de réseau souterrain [source : De Souza et al, 2020⁶⁰]

La simulation d'un réseau complet de carrière souterraine trouve ses limites dans la difficulté à affiner la géométrie des galeries, notamment la rugosité de surface (Yi et al., 2022⁵⁹).

5.3.2 Evolutions des méthodes de dimensionnement et de gestion des systèmes de ventilation en milieu souterrain

5.3.2.1 Une tendance : la ventilation à la demande, voire... intelligente !

L'un des sujets prégnants, qui ressort dans la littérature scientifique, est l'optimisation de la ventilation en milieu souterrain par le développement d'outils numériques de contrôle des systèmes de ventilation.

Le concept de ventilation à la demande (« Ventilation on Demand ») est ainsi développé (Halim, Bolsöy & Klemo, 2020⁶¹ ; Acuña et al., 2016⁶²). Il s'agit de mettre en place un système d'optimisation dynamique de la ventilation, permettant de réguler les débits de ventilation en fonction de l'occupation ou non des

⁵⁵ Hasheminasab, F., Bagherpour, R., Aminossadati, S.M., Numerical simulation of methane distribution in development zones of underground coal mines equipped with auxiliary ventilation. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 89, 2019

⁵⁶ Gendrue N., S. Liu, S. Bhattacharyya, R. Clister, An investigation of airflow distributions with booster fan for a large opening mine through field study and CFD modelling, *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 132, 2023

⁵⁷ Xu, G., Luxbacher, K. D., Ragab, S., Xu, J., & Ding, X., Computational fluid dynamics applied to mining engineering: a review. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 31(4), 2016

⁵⁸ Brodny J., M. Tutak, Applying computational fluid dynamics in research on ventilation safety during underground hard coal mining: A systematic literature review, *Process Safety and Environmental Protection*, 151, 2021

⁵⁹ Yi, H., Kim M., Lee D., Park J., Applications of Computational Fluid Dynamics for Mine Ventilation in Mineral Development, *Energies*, 15, 2022

⁶⁰ D Souza E. K. Penner, Underground booster fan placement strategies, *CIM Journal*, 11(4), 266–273.

⁶¹ Halim A., Bolsöy T., Klemo S., An overview of the Nordic mine ventilation system, *CIM Journal*, 11:2.

⁶² Acuña E., Alvarez R., Hurtado J. P., Updated Ventilation On Demand review: implementation and savings achieved, *1st International Conference of Underground Mining*, Chile, 2016

zones d'un milieu souterrain et des valeurs mesurées localement : « ventiler ce qu'il faut seulement quand il faut... ». Dans un tel système, les ventilateurs secondaires peuvent être pilotables automatiquement, de même que les freins aérauliques (portes, barrages...). Ainsi, par exemple, la mine d'or de Fosterville (Australie) est équipée d'un système de ventilation à la demande entièrement automatisé, basé sur des applications logicielles et des équipements pilotés contrôlant les ventilateurs secondaires pour adapter les flux d'air en fonction des positions des équipements d'exploitation et des mesures de terrain (vitesse d'air, concentration de gaz et de poussière, température, humidité). Halim et al. (2020)⁶¹ donnent l'exemple d'une mine nordique type (de Suède ou de Finlande), où le système de ventilation s'appuie sur :

- un ventilateur primaire soufflant en tête de puits d'admission, à vitesse réglable ;
- un autre ventilateur primaire aspirant l'air de la mine via un puits d'échappement, à vitesse réglable ;
- une série de ventilateurs secondaires soufflant de l'air d'admission au front de chaque chantier, à une vitesse contrôlée selon l'activité au niveau de leur chantier (détection de présence d'engins) et les réponses des capteurs de gaz : par exemple, éteint lorsqu'aucun engin n'est présent, à vitesse réduite de moitié si un appareil de forage (électrique) entre dans la zone, à pleine vitesse si une chargeuse (LHD) à moteur diesel entre dans la zone.

Dans cette configuration, les ventilateurs primaires ajustent leur vitesse de rotation en fonction des besoins en air d'admission des ventilateurs secondaires, identifiés par une mesure de pression différentielle entre le puits et le chantier le plus éloigné.

La ventilation à la demande implique que certaines zones non ventilées – ou plus faiblement ventilées – par forçage mécanique soient soumises à un effet de ventilation naturelle qu'il convient de savoir prendre en compte (variations saisonnières, effets des variations de densité de l'air...).

Comme illustré sur la Figure 12, il y a plusieurs niveaux d'automatisation de la ventilation à la demande, certaines opérations pouvant rester pilotées manuellement dans les premiers niveaux.

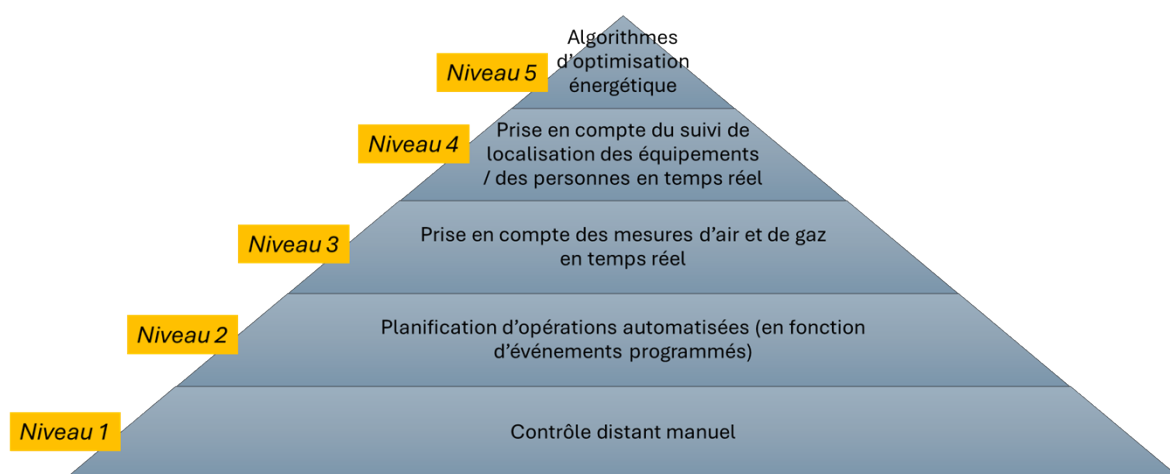


Figure 12. Niveaux de ventilation à la demande (d'après Jackson et al., 2024⁶³)

Des réflexions sont développées sur des architectures de ventilation « intelligentes » qui s'adaptent en temps réel, automatiquement, sur la base d'un apprentissage machine et à partir de données collectées par un réseau de capteurs adapté (Huang et al, 2022⁶⁴). Semin & Kormshchikov (2024)⁶⁵ proposent ainsi une revue de l'intégration de méthodes du domaine de l'intelligence artificielle (apprentissage profond par réseaux neuronaux, algorithme génétique...) dans la supervision et le contrôle de la ventilation dans les mines. Ces méthodes visent à aider à :

⁶³ Jackson C. J. Norris, F. Michelin, Casae study – ventilation on demand at Fosterville Mine, *International Mine Ventilation Congress*, Australia, 2024.

⁶⁴ Huang X., Yunlong L., Research and design of intelligent mine ventilation construction architecture, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 17, 2022.

⁶⁵ Semin M., Kormshchikov D., Application of artificial intelligence in mine ventilation: a brief review, *Front. Artif. Intell.*, 7, 2024.

- contrôler un système de ventilation, à partir d'un nombre limité de mesures manuelles ou automatisées dans les branches du réseau souterrain ;
- identifier les anomalies de ventilation, modifications liées à l'évolution géotechnique des galeries,
- évaluer les résistances de branches pour caractériser le réseau.

Les techniques associées à l'intelligence artificielle peuvent faciliter l'analyse d'un réseau aéraulique pour optimiser le système de ventilation et sa gestion quotidienne. Par exemple, des techniques d'apprentissage machine permettent de faciliter la réalisation de graphes de type Q-H (Q est le débit d'air, H est la charge du circuit, voir Figure 13) représentant différemment les caractéristiques d'un réseau souterrain complexe (Jia et al., 2020⁶⁶).

Il convient néanmoins de signaler que ce principe d'adaptation dynamique de la ventilation en fonction de l'activité d'exploitation dans le milieu souterrain peut se heurter à des difficultés en cas de situation complexe, comme un incident majeur d'exploitation pour lequel la réaction du système peut être trop lente voire inadéquate, par exemple en cas de rejet gazeux accidentel ou en cas d'incendie (Dicks & Clausen, 2017⁶⁷).

Ces approches avancées de contrôle (partiellement) automatisé peuvent s'appuyer en outre sur des simulations en temps réel des flux d'air via un jumeau numérique du réseau souterrain.

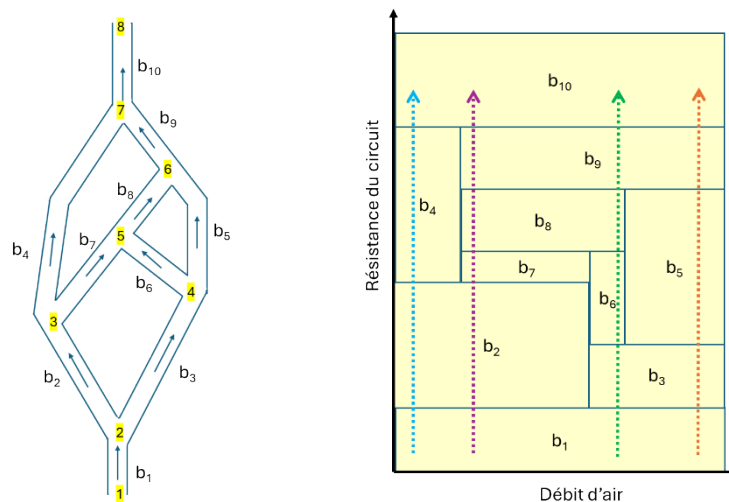


Figure 13. Représentation d'un réseau aéraulique souterrain : à gauche, graphe du réseau de ventilation ; à droite, représentation sous forme d'un graphe Q-H (d'après Jia et al., 2020⁶⁶). Les rectangles correspondent à des tronçons de galeries, dont la largeur et la longueur représentent le débit de ventilation et la charge de chaque tronçon. Les lignes pointillées indiquent les quatre chemins indépendants

Ces évolutions sont avant tout à destination des exploitations souterraines dont les dimensions et la complexité sont croissantes et justifient de développer des méthodes avancées.

5.3.2.2 Couplage des approches CFD et réseau aéraulique 1D

Deux approches de modélisation ont été décrites précédemment :

- l'approche monodimensionnelle d'un réseau souterrain (potentiellement tridimensionnel) représenté par un réseau de branches 1D et de ventilateurs, en équilibre aéraulique ;
- l'approche de modélisation des écoulements fluides (air, gaz, poussières) à l'intérieur des galeries via un code de calcul CFD.

Cette dernière approche est nettement plus lourde à mettre en œuvre que l'approche 1D. Ainsi, simuler un réseau souterrain dans son intégralité requerrait un effort de modélisation du réseau très important

⁶⁶ Jia J., B. Li, D. Ke, Y. Wu, D. Zhao, M. Wang, Optimization of mine ventilation network feature graph, *PLoS ONE*, 2020

⁶⁷ Dicks F., E. Clausen, Ventilation on demand, *Mining Report 153*, n°4, 2017 ([Ventilation on Demand - MINING REPORT](#))

et des ressources de calcul élevées, pour un résultat qui pourrait s'avérer incertain malgré tout, au regard de la difficulté à décrire de manière suffisamment détaillée certaines spécificités du réseau.

Une approche mixte couplant un modèle de réseau 1D avec une modélisation 3D de certaines zones singulières du réseau permet de bénéficier à la fois de la rapidité de calcul de l'approche 1D et de la précision apportée par l'approche CFD de simulation des mouvements fluides dans les zones singulières.

Une illustration d'une telle approche mixte est présentée sur la Figure 14. Le couplage peut être plus ou moins automatisé et plus ou moins dynamique : l'interaction peut être unidirectionnelle (un modèle alimente l'autre sans rétroaction) ou bidirectionnelle (les modèles s'alimentent mutuellement), l'alimentation d'un modèle par l'autre modèle étant gérée par un superviseur assurant les transmissions d'informations entre modèles selon un schéma itératif. Un exemple d'interaction bidirectionnelle entre un modèle 1D et un modèle 3D, appelé « co-simulation », est décrit par Rueda (2017)⁶⁸ : le modèle 1D est lancé, ses résultats transmis au modèle 3D modélisant une partie spécifique du réseau (par exemple, une chambre). Les résultats du calcul 3D une fois terminé sont renvoyés au modèle 1D comme conditions aux limites de la partie spécifique du réseau, qui est relancé avec ces données. La procédure est réitérée jusqu'à convergence des résultats.

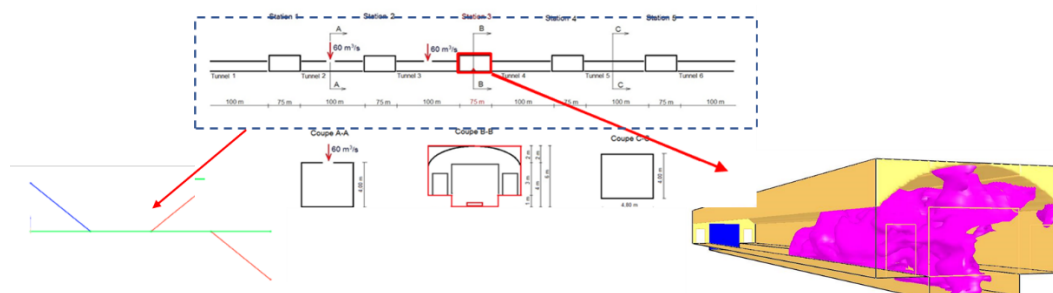


Figure 14. Illustration d'un couplage entre un modèle 1D d'un réseau souterrain simple (segments colorés sur l'image de gauche) et un modèle CFD de l'intérieur d'un tronçon de tunnel (nuage rose sur l'image de droite) pour simuler la dispersion de gaz dans un réseau souterrain (schématisé sur l'image du milieu) (source : Ineris)

5.3.2.3 Simulation rapide des situations d'urgence (incendies, émission massive de gaz)

On trouve dans la littérature des travaux sur la simulation prédictive des conséquences d'un incendie dans le réseau souterrain. En effet, il peut s'avérer très utile de disposer d'un « jumeau numérique » de l'exploitation souterraine capable de simuler rapidement, en cas d'incendie – ou encore en cas d'émission massive de gaz –, la dispersion des fumées dans les galeries, afin d'identifier la stratégie à adopter pour protéger les personnes, en modifiant les paramètres du système de ventilation (modification de la vitesse des ventilateurs, voire inversion des flux de ventilation⁶⁹, ouvertures/fermetures de portes et barrages...) sur la base des éléments d'analyse fournis par la simulation numérique. Hong et al. (2022)⁷⁰ démontre l'intérêt d'utiliser des méthodes d'apprentissage pour développer un modèle capable de prédire très rapidement le devenir des fumées d'incendie en réseau souterrain – en ayant préalablement entraîné le modèle apprenti sur un millier de cas d'incendie simulés dans différentes conditions par un code de calcul CFD (FDS⁷¹).

5.3.2.4 Vers une meilleure description du réseau souterrain

Bien dimensionner un système de ventilation passe nécessairement par une bonne connaissance du réseau à ventiler. Dans les carrières souterraines, les galeries ont chacune leurs particularités géométriques, du fait de l'exploitation qui en a été faite, des spécificités géologiques locales, Ainsi, les sections irrégulières, les aspérités de surface et les obturations partielles (remblais, éboulis...)

⁶⁸ Rueda N., Co-simulation: 1D to 3D coupling in an underground mine ventilation simulated model, 16th North American Mine Ventilation Symposium, Colorado, Etats-Unis, 2017

⁶⁹ Voir McPherson M.J., Subsurface Ventilation Engineering, 2008 (chapitre 21.3.4.2)

⁷⁰ Hong Y., J. Kang, C. Fu, Rapid prediction of mine tunnel fire smoke movement with machine learning and supercomputing techniques, *Fire Safety Journal*, 127, 2022.

⁷¹ *Fire Dynamics Simulator*, développé et distribué par le NIST (National Institute of Standards and Technology)

modifient la résistance de chaque galerie⁷² donc le point de fonctionnement du ventilateur, sa vitesse de rotation et en conséquence, la puissance nécessaire au ventilateur pour atteindre l'objectif de débit d'air visé.

Les technologies récentes d'imagerie telles que les scanners 3D peuvent apporter des informations nombreuses et assez précises sur les caractéristiques géométriques des tronçons d'un réseau souterrain, en un temps réduit (voir un exemple sur la Figure 15), permettant d'évaluer les résistances des tronçons, mais aussi de construire une maquette numérique du réseau.

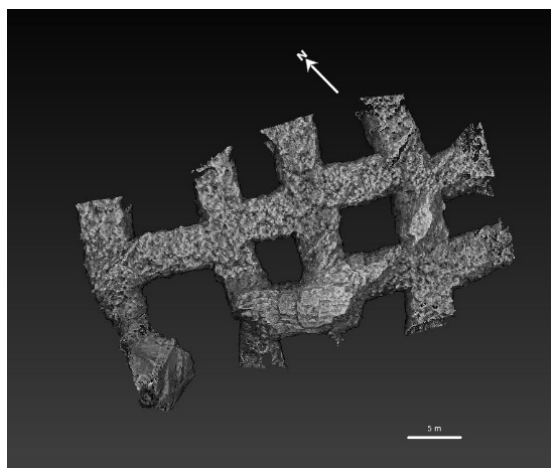


Figure 15. Exemple de scan 3D d'une zone de carrière exploitée par chambres et piliers (source : Ineris)

Une telle maquette numérique peut alors être exploitée dans un outil de simulation CFD pour simuler les écoulements aérauliques en 3D dans le réseau souterrain. Les étapes de traitement, de l'acquisition des données géométriques par scanning jusqu'à la simulation aéraulique, est illustrée sur la figure suivante.

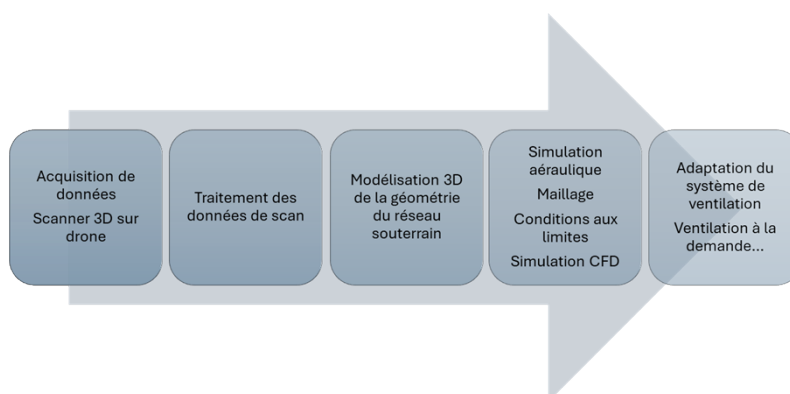


Figure 16. Etapes pour l'exploitation de données géométriques obtenues par scan 3D dans des outils de simulation CFD pour l'optimisation d'un système de ventilation (d'après Trybala, 2024⁷³)

⁷² La résistance d'un tronçon de galerie s'écrit : $R = \lambda \frac{\rho}{8g} \frac{BL}{S^3} 10^3$ où λ est le coefficient de frottement caractéristique du tronçon de galerie, ρ la masse volumique de l'air, g l'accélération de la pesanteur, B le périmètre de la section droite du tronçon, L la longueur du tronçon et S sa section droite.

⁷³ Trybala P., S. Rigon, F. Remondino, A. Banasiewicz, A. Wróblewski, A. Macek, P. Kujawa, K. Romańczukiewicz, C. Redondo, F. Espada, Optimizing Mining Ventilation Using 3D Technologies, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLVIII-2-2024 – ISPRS TC II Mid-term Symposium "The Role of Photogrammetry for a Sustainable World", Nevada, Etats-Unis, 2024.

6 Conclusions

Ce rapport dresse un état des lieux et une veille technique relatifs à la ventilation dans les carrières souterraines en exploitation. Il explore l'état actuel et les évolutions récentes de la ventilation dans les carrières souterraines. La problématique de ventilation des carrières étant similaire à celle des mines, de nombreux éléments sont issus de documents techniques et publications scientifiques portant sur la problématique de la ventilation pour les mines souterraines.

Le document examine les techniques de ventilation existantes, les incidents passés liés à des problèmes d'aérage, les évolutions technologiques (en particulier en ce qui concerne la motorisation des engins d'exploitation) affectant les émissions gazeuses et particulaires. Sont également abordés les progrès technologiques des systèmes de ventilation réalisés notamment grâce au progrès des outils de modélisation et de simulation. Un certain nombre de bonnes pratiques associées à la ventilation des milieux souterrains, en lien avec les réglementations et les recommandations existantes (dont le Règlement Général des Industries Extractives et le Code du Travail en France, et les réglementations d'autres pays du monde – en particulier Australie, Nouvelle-Zélande, Canada, pays nordiques européens). Enfin, un état de l'art des outils de modélisation des écoulements fluides dans les milieux souterrains et les évolutions en cours des approches de simulation et d'optimisation en matière de ventilation est effectué.

Les principes de base et les bonnes pratiques de ventilation dans une exploitation souterraine sont repris synthétiquement ci-après :

- Principes de ventilation
 - L'objectif de la ventilation est d'assurer un air respirable et des conditions climatiques suffisamment confortables pour les travailleurs. La ventilation participe également, dans un certain nombre de cas, à la protection du personnel en situation dégradée (évacuation, mise à l'abri, en cas de libération accidentelle de gaz ou d'incendie, par exemple).
 - L'apport primaire d'air frais est généralement assuré par des ventilateurs (par soufflage ou, le plus souvent dans les carrières souterraines, par aspiration, ou encore par une combinaison des deux).
 - La ventilation secondaire (par des ventilateurs auxiliaires et des gaines de ventilation) est utilisée pour amener l'air primaire vers des zones spécifiques qui ne sont pas balayées par le flux primaire, comme les fronts de taille. De même que différentes configurations existent (soufflage, aspiration, "push-pull").
 - Des "freins aérauliques" (barrages, remblais, rideaux) sont utilisés pour canaliser les flux d'air vers les zones prioritaires.
 - La ventilation naturelle, basée sur les différences de pression dues au vent et aux gradients de température entre l'extérieur et l'intérieur, et entre les niveaux d'une carrière souterraine, joue un rôle parfois non négligeable dans les mécanismes de ventilation du milieu souterrain, ses effets pouvant s'opposer aux effets de la ventilation mécanique. Elle peut suffire pour les carrières de faible ampleur, mais est dépendante des conditions extérieures, donc changeante et complexe à anticiper.
 - L'air frais doit être puisé dans une zone non polluée, éloignée notamment du puits de sortie d'air du réseau souterrain.
 - Le dimensionnement de la ventilation doit tenir compte des méthodes d'exploitation.
- Emissions des moteurs, poussières
 - Il convient d'assurer un débit d'air frais minimal pour diluer les gaz émis par les moteurs diesel.

- Il existe des prescriptions de débit d'air par kW de puissance moteur diesel en fonctionnement dans le milieu souterrain.
 - Ce genre de prescription pourrait évoluer vers des études au cas par cas avec les moteurs moins émissifs et l'électrification.
 - Il est préconisé de limiter la formation des poussières par des mesures d'atténuation (eau, dépoussiéreurs, capotage).
 - Il est également préconisé de limiter la vitesse d'air pour limiter la remise en suspension des poussières.
 - Il peut être envisagé de protéger les opérateurs par des cabines pressurisées avec air traité.
- Recommandations générales relative à la ventilation
 - L'exploitant doit disposer d'un plan de ventilation à jour, dans la mesure du possible ;
 - Il est fondamental d'assurer une maintenance régulière des équipements de ventilation (primaire et secondaire) et des appareils de mesure permettant d'assurer la surveillance du milieu souterrain ;

Compte tenu des enjeux de changement climatique et de transition énergétique, optimiser la ventilation des réseaux souterrains est un enjeu important, les opérations de ventilation pouvant représenter jusqu'à près de la moitié de la consommation énergétique d'une exploitation souterraine. Les travaux scientifiques récents portent ainsi le plus souvent sur les sujets d'amélioration des rendements des ventilateurs, d'optimisation, par un contrôle affiné des flux dans le réseau et l'automatisation des systèmes, des apports d'air nécessaires dans les galeries, en fonction des opérations qui y sont menées. La tendance à l'optimisation fine de la ventilation par automatisation plus ou moins avancée de la régulation des systèmes de ventilation (« ventilation à la demande », « ventilation intelligente ») conduit à s'appuyer sur un réseau de mesures en temps réel, suffisamment maillé et bien maintenu.

Concernant l'évolution des émissions souterraines (poussières, gaz, humidité, chaleur), la tendance est à la réduction des émissions particulières des moteurs, par une amélioration des moteurs diesel d'une part, et par la conversion des motorisations diesel vers des motorisations électriques (filaires ou à batteries), voire des technologies à hydrogène – avec des premières tentatives dans certains grands pays miniers, et des perspectives dans un futur plus lointain en ce qui concerne la France, au regard de la maturité insuffisante des technologies hydrogène. La réduction des émissions et de la chaleur avec l'électrification/hydrogène par rapport au diesel pourrait permettre de réduire les débits de ventilation et les coûts énergétiques. Néanmoins, en situation dégradée (batterie, hydrogène, incendie), les émissions peuvent être différentes – tant pour la toxicité que pour l'inflammabilité – de celles d'un incendie d'engin à motorisation diesel, nécessitant d'adapter notamment les plans de secours.

En particulier, en cas d'incendie d'engins à batteries, les émissions de gaz et de particules pourraient ne pas présenter de différences fondamentales par rapport à celles d'un incendie d'engin à motorisation diesel. Cependant, des spécificités telles qu'un développement de chaleur plus intense, des fortes émissions de fumées dès le départ et une durée d'incendie plus grande du fait des difficultés à éteindre un tel incendie. Par ailleurs, un risque nouveau lié au dégazage de batteries en cas de défaillance de modules mérite une attention particulière dans le dimensionnement de la ventilation d'urgence et/ou la gestion de la protection et l'évacuation du personnel d'exploitation.

L'évolution des technologies de ventilateurs porte sur leur compacité et leur légèreté, l'amélioration de leur efficacité ainsi que de leur fiabilité, et leur pilotabilité pour répondre au concept de "ventilation/performance à la demande". Le concept de « maintenance prédictive » est en développement, il s'appuie sur le mesurage et l'interprétation de signaux faibles précurseurs de défaillances potentielles à venir.

Enfin, le rapport présente un inventaire d'outils de modélisation de réseaux aérauliques souterrains, qui peuvent se fonder sur les lois de Kirchhoff selon une approche monodimensionnelle (théorie des réseaux maillés et résolution numérique, par exemple par la méthode de Hardy Cross). Ces outils simulent typiquement la distribution des flux d'air dans le réseau souterrain, la dispersion des gaz et des fumées d'incendie, pour le plus avancés. L'emploi d'outils plus complexes de type CFD s'avérant souvent encore trop coûteux pour simuler des exploitations souterraines complètes, ces codes de calcul sont utilisés pour simuler certaines zones singulières nécessitant de disposer d'une compréhension tridimensionnelle des écoulements à l'intérieur de ces zones. Le couplage entre approche 1D et approche 3D/CFD peut apporter des solutions combinées pertinentes.

7 Annexes

Liste des annexes :

- Annexe 1 : rapports des quatre visites de l'année 2023 (sites anonymisés)

Ineris-227351-2818032-v0.3

Compte-rendu de réunion externe

Visite carrière A – 05/07/2023

Exploitation, aérage, risque incendie et REX

L'extraction de gypse est assurée par une technique de « foration minage » : foration des trous de minage (par foreuse électrique à fil) puis chargement des explosifs nitrate-fuel avec détonateur électrique.

Les tirs sont effectués le soir et les gaz de tirs sont ventilés pendant la nuit.

L'aérage est assuré par des extracteurs (70 à 90 kW) avec un puits d'aérage par quartier (dépression dans les galeries). Le débit total de ventilation est de l'ordre de 150 m³/s. Si besoin, une ventilation secondaire est assurée par soufflage d'air frais vers les zones non balayées par l'aérage primaire.

Le dimensionnement de l'aérage est simplement basé sur les émissions d'oxydes d'azote et d'oxydes de carbone, pour assurer une dilution suffisante permettant de respecter les valeurs limites (et un taux d'oxygène suffisant également).

Des mesures mensuelles de vitesses d'air sont réalisées à un certain nombre de points de référence.

Le taux de NO₂ est « largement abaissé depuis 3-4 ans », selon l'exploitant – probablement du fait de l'amélioration des moteurs et des dispositifs de traitement à l'échappement.

Une étude Incendie a été réalisée voici 2-3 ans, par un cabinet d'études externe, pour l'exploitant, dont l'objectif n'a pas été précisé lors de la visite mais visait a priori à définir les chemins d'évacuation et les positions d'éventuels refuges en fonction de la circulation des fumées en cas d'incendie (l'Ineris a également réalisé, dans les 20 dernières années, des études incendie pour ce site et des sites voisins du même exploitant).

Vis-à-vis du risque incendie (selon *Arrêté du 05/08/87 relatif aux moyens de lutte contre l'incendie associés à l'utilisation de matériels équipés de moteurs thermiques*), les mesures suivantes – notamment – sont prises :

- usage d'huiles hydrauliques difficilement inflammables (HFDU) ;
- détection et extinction automatique sur les moteurs de puissance supérieure à 200 kW (à poudre, « quantité surdimensionnée » selon l'exploitant, risques inhalation - Un dispositif d'extinction par brouillard d'eau a été « récemment reconnu équivalent »).

Un retour d'expérience a été évoqué, impliquant 2 véhicules, avec inflammation d'une nappe de gasoil. Les fumées ont remonté le flux d'aérage sur environ 200 m.

L'aérage n'est pas dimensionné particulièrement pour les situations d'incendie, les études incendie visant plutôt à conclure sur l'effet de la ventilation sur la circulation des fumées, les parcours d'évacuation, le maintien ou non de la ventilation, etc.

Nouvelles technologies de motorisation (électrique, hydrogène...)

La plupart des machines fonctionnent au diesel. L'intérêt de machines électriques est de réduire le débit d'aérage nécessaire.

L'exploitant nous a fait part de son questionnement sur les nouvelles technologies et leurs utilisations dans les carrières souterraines :

- quelles sont les obligations réglementaires, est-ce que cela apporte de nouvelles contraintes réglementaires dans l'exploitation de la carrière, quelles normes seraient à respecter pour être conforme ?
- l'évaluation des risques de ces nouvelles technologies et comment les traiter.

Un niveau de risque acceptable est défini aujourd'hui dans l'exploitation des carrières. La question est donc de savoir où l'exploitant se situerait, par rapport à la situation actuelle, d'un point de vue risque avec ces nouvelles technologies : quid de la cinétique d'un feu de véhicule à batteries par rapport à un véhicule thermique ? quid des moyens d'extinction ? quid des risques associés à la station de recharge en souterrain ? ...

Le site avait fait l'objet d'une étude pour l'exploitation d'engin à base d'hydrogène. Cependant, aujourd'hui, l'hydrogène est trop cher, donc cela n'est pas rentable pour eux d'exploiter des engins utilisant cette technologie. L'exploitant a une démarche en cours pour utiliser des engins avec batteries, A ce stade des évolutions technologiques, les batteries ne sont néanmoins pas une solution pour les machines « à taux d'engagement fort » ; selon l'exploitant, l'électrification par câble reste donc la meilleure option dans ces cas.

Au vu des échanges avec l'exploitant (points abordés ci-avant) et suite au retour des inspecteurs du Groupe de Travail Carrières de juin, il apparaît que l'utilisation de l'hydrogène dans les carrières souterraines n'est pas mature et n'est, à ce jour, pas en phase de réflexion par les exploitants.

Selon nos interlocuteurs, les besoins en analyse de risque et réglementaire se situent ainsi plus dans l'exploitation d'engins avec batteries.

Visite des sites B, C et D – 28/09, 10/10 et 11/10 2023

1. Visite du site B

Cette exploitation souterraine est soumise au régime légal des mines. Elle est exploitée par la technique des chambres (montantes) et piliers¹, du fait de la forte pente du gisement. Sont extraites des roches (calcaire bitumineux) qui sont distillées sur place pour en extraire une huile naturellement riche en soufre, à usage de préparation pharmaceutique/cosmétique. Environ 5 mois de l'année sont consacrés à l'extraction du minerai (1 500 T/an), le reste du temps étant consacré à la distillation. La concession est autorisée jusqu'en 2043.



Figure 1. Gauche : voie ferrée (entrée et sortie principale de la mine) ; centre : chemin piéton dans l'exploitation ; droite : chute du minerai par gravité

¹ par abattage à l'explosif.

1.1. Aérage

L'aérage est assuré par un ventilateur aspirant (Berry 700 HDMS 22 kW) au sommet d'un puits. Le chemin de circulation de l'air est forcé par des barrages de ventilation (Figure 2).

Aux fronts de taille, une ventilation secondaire² est assurée par un ventilateur via des gaines de ventilation souples (type « Ventube »).

Les entrées d'air se font via les accès de circulation du réseau souterrain.

La ventilation a été dimensionnée par un cabinet d'études externe, qui vient vérifier annuellement les débits de ventilation dans les galeries. Elle est dimensionnée pour évacuer les résidus de tirs³, les gaz des moteurs diesel, maîtriser la teneur en oxygène et limiter les teneurs en gaz naturellement émis dans la mine (H_2S , SO_2)

Incidents en lien avec l'aérage

- Pas de départ de feu connu.
- Pas d'incident signalé.



Figure 2. Barrage de ventilation

1.2. Utilisation de technologies émergentes

La locomotive tractant les wagonnets est alimentée par des batteries de traction au plomb. La recharge de la locomotive se fait à l'extérieur de l'exploitation souterraine. La chargeuse et la mini-pelle sont à moteur diesel. Pour remplacer la chargeuse en fin de parcours, l'exploitant s'interroge quant à investir dans une nouvelle chargeuse à batterie proposée par un fabricant français.



Figure 3. Chargeuse à moteur thermique

² Pour mémoire, l'aérage secondaire est un aérage qui vient en complément de l'aérage principal, sur des portions de longueur limitée et dans certaines situations particulières, pour envoyer l'air vicié vers le circuit d'air principal. L'aérage principal assure quant à lui un courant d'air permanent dans le réseau souterrain, avec des entrées d'air frais et des sorties d'air vicié bien séparées pour éviter le retour d'air vicié dans le réseau.

³ Les tirs ont lieu le vendredi pour permettre l'extraction des gaz de tirs durant le week-end.

2. Visite du site C

La carrière est la seule carrière souterraine de l'exploitant. Elle permet notamment la fabrication de poussière de calcaire ($d_{50} \approx 10 \mu\text{m}$). Ce calcaire à très basse teneur en fer est utilisé dans l'industrie du verre blanc d'emballage (bouteille, flacon) ainsi que pour le verre des vitres dans le secteur du bâtiment.

Le site dispose de deux arrêtés d'exploitation, un dédié à l'usine de traitement du calcaire et un arrêté relatif à l'exploitation de la carrière. Cela correspond à deux zones distinctes.

Le site emploie environ 10 personnes dont 6 travaillent en production. L'arrêté préfectoral est délivré jusqu'en 2025 et autorise la production de 200 000 tonnes par an (cette année, environ 100 000 T produites et 30 000-40 000 T de remblais accueillies).

Le calcaire verrier nécessite une très basse teneur en fer, qualité très rare sur le territoire métropolitain, afin d'avoir un verre extra-clair.

La carrière est exploitée par chambres et piliers sur un seul niveau. Les galeries font au maximum 15 m de hauteur et 10 m de largeur, avec des piliers de dimensions 15 m x 40 m ou 40 m x 40 m. L'exploitation se fait par progression horizontale de 4 m par tir (sur 7 m de hauteur) puis par approfondissement vertical de 3 m puis encore 3 m.

2.1. Aérage

Le système d'aérage mécanique est assez récent, il a été dimensionné par un cabinet d'études externe.

Le besoin en ventilation a été estimé à 60 m³/s pour la configuration actuelle.

Le site dispose de deux murs d'aération, en extraction, présentés sur les photos ci-après (Figure 4).

Sur chaque mur, trois ventilateurs fonctionnent en simultané, le 4^{ème} restant au repos (secours, maintenance). Une rotation des ventilateurs actifs est organisée. Les ventilateurs ont une puissance de 11 kW correspondant à un débit maximal de 25 m³/s chacun. La capacité maximale de ventilation est donc de 200 m³/s.

Le chemin de circulation de l'air est forcé par des barrages de ventilation (Figure 5). Certains barrages sont de type « porte de quai », pour permettre le passage d'engins.

Il n'y a généralement pas besoin d'aérage secondaire sauf parfois en fond de chantier (ventilateur soufflant sur remorque, 5,5 kW, 10 m³/s).

La ventilation naturelle permet déjà de fonctionner à minima, pour du chargement simple sans stationnement du personnel. Il n'y a pas de problème d'humidité, ni de décomposition de matières organiques (H₂S, CH₄...) à gérer par l'aérage.

En cas d'incendie, il est prévu une baisse du débit d'aérage.

Historiquement, la ventilation du site a d'abord été assurée complètement en aérage secondaire par des ventilateurs soufflants en front de taille. Puis un aérage primaire a été mis en œuvre avec un unique ventilateur central soufflant (132 kW, 25 m³/s). Le passage à 4 ventilateurs (soufflants) a permis d'augmenter les débits de ventilation tout en abaissant la consommation.

Incidents en lien avec l'aérage :

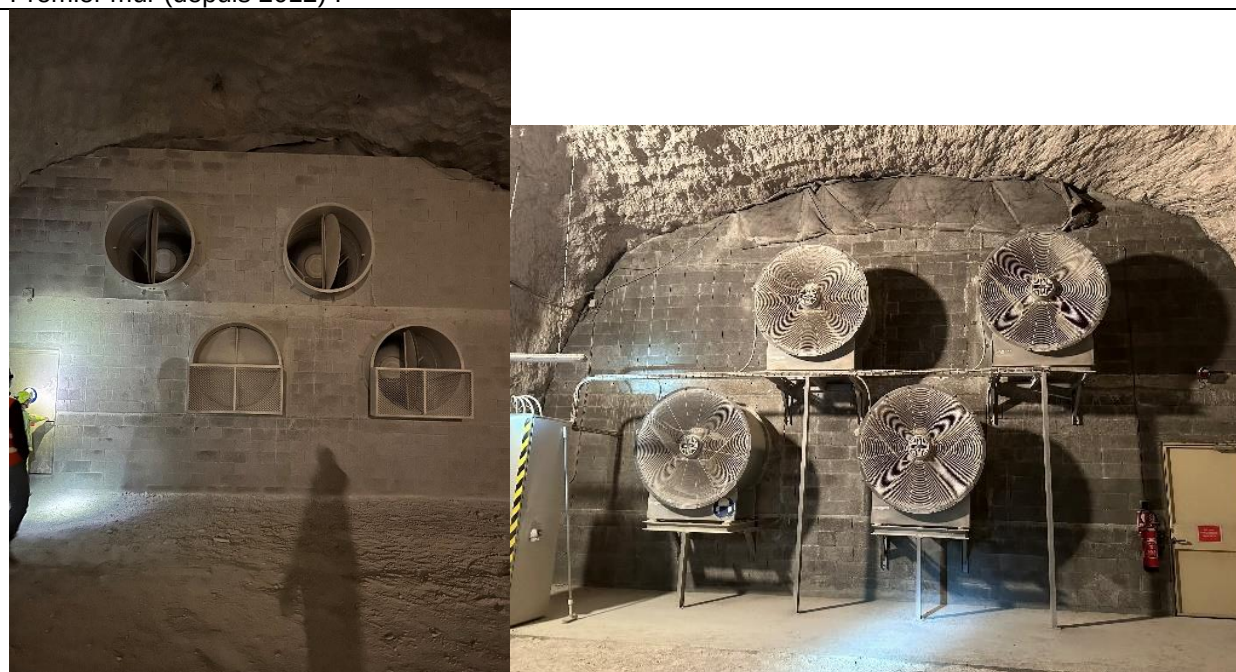
- Aucun départ de feu connu de notre interlocuteur,
- Une situation post-tir ayant nécessité de ventiler plus longtemps que le temps standard (qui est d'une nuit) avant de reprendre l'activité, du fait de la persistance de gaz de tir lourds (mélange de CO, SO₂, NOx) piégés dans une zone en contrebas.

2.2. Utilisation de technologies émergentes

Les équipements (pelles, purge à la fraise ou à la dent, chargeuse, foreuse) disposent de moteurs diesel. Le site n'a aucun projet d'utiliser des engins utilisant des technologies émergentes (batteries ou hydrogène).

L'exploitant s'interroge néanmoins sur la possibilité réglementaire d'utiliser des batteries au lithium en carrière souterraine.

Premier mur (depuis 2012) :



Deuxième mur (depuis 2019) :



Figure 4. Vues des murs de ventilation pour l'aérage primaire du site C



Figure 5. Quelques barrages de ventilation sur le site C

3. Visite du site D

Cette carrière souterraine est une carrière de pierre à ciment naturel prompt. Le gisement de ce massif calcaire est unique en Europe, exploité par deux carrières du groupe.

L'exploitation de la couche inclinée de calcaire (pendage d'environ 40°) est assurée selon la méthode des chambres et piliers, par abattage à l'explosif. La progression est d'environ 2 à 3 m par tir. Les galeries font une section de 4 m x 4 m. Du fait de cette section réduite, les machines d'exploitation sont construites sur mesure.

La carrière était partiellement en arrêt d'exploitation le jour de la visite, pour une raison de maintenance, notamment des chantiers de renforcement du soutènement (grillages + boulons, Figure 6 gauche). L'empoussièrément y était assez fort du fait de l'arrêt des ventilateurs secondaires.



Figure 6. Grillage et boulonnage au toit d'une galerie

3.2. Aérage

Les tirs d'abattage sont effectués en milieu de journée, avec un aérage (primaire) jusqu'au lendemain matin.

Le schéma des galeries est complexe. L'aérage primaire est assuré par un ventilateur central en aspiration (160 kW, au débit de 60 m³/s), situé dans la galerie principale. Un puits d'entrée d'air frais est situé dans une prairie sur la pente de la montagne au-dessus de la carrière. L'autre entrée d'air frais est la voie de roulage des locotracteurs.

Des ventilateurs secondaires soufflants sont en service au niveau des chantiers.

La vitesse visée dans les galeries pour réduire l'empoussièrement atmosphérique est de 0,3 m/s au front. Cette valeur est vérifiée par un bureau d'études tous les trois mois. Le débit du circuit primaire est vérifié tous les mois.

Les études d'aérage sont réalisées par le bureau d'études externe.

L'aérage secondaire est constitué de ventilateurs soufflant vers le front via des gaines souples, spiralées au niveau des changements de direction (pour éviter les écrasements donc limiter les pertes de charges), selon un parcours évitant la reprise d'air vicié par le ventilateur situ suffisamment en amont dans le flux d'air primaire (Figure 7).

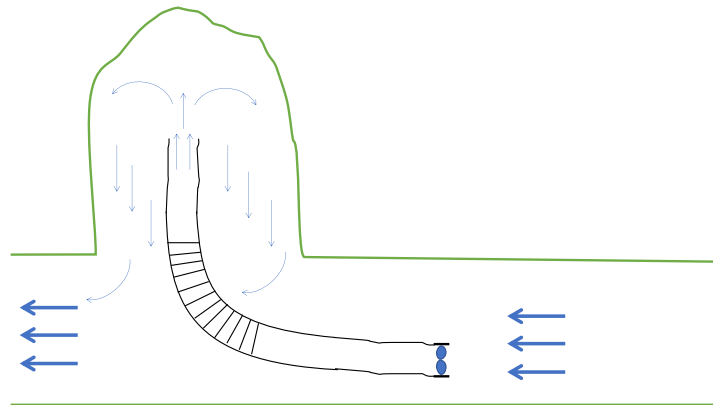


Figure 7. Schéma-type d'un système d'aérage secondaire

Incidents en lien avec l'aérage :

- Pas de départ de feu connu. Un dispositif d'extinction automatique est en cours de mise en place sur tous les engins à moteur thermique.
- Un excès de poussières local au niveau du poste « chargeuse + bande transporteuse » est en cours de traitement par un dispositif encore à optimiser, composé d'un ventilateur poussant vers un dépoussiéreur (Figure 8 droite).



Figure 8. (Gauche) bande transporteuse ; (droite) dépoussiéreur

3.3. Utilisation de technologies émergentes

Les machines sont à moteur thermique ou en électrique filaire. Quelques équipements sont à air comprimé (dont un ventilateur), mais le circuit d'air comprimé est limité en longueur.

Compte tenu de la taille du réseau souterrain, l'utilisation de machines électriques à batteries est à l'étude pour éviter d'avoir à prolonger toujours le réseau électrique. Les technologies à hydrogène ne sont pas envisagées.

Visite des sites B, C et D – 28/09, 10/10 et 11/10 2023

1. Visite du site B

Cette exploitation souterraine est soumise au régime légal des mines. Elle est exploitée par la technique des chambres (montantes) et piliers¹, du fait de la forte pente du gisement. Sont extraites des roches (calcaire bitumineux) qui sont distillées sur place pour en extraire une huile naturellement riche en soufre, à usage de préparation pharmaceutique/cosmétique. Environ 5 mois de l'année sont consacrés à l'extraction du minerai (1 500 T/an), le reste du temps étant consacré à la distillation. La concession est autorisée jusqu'en 2043.



Figure 1. Gauche : voie ferrée (entrée et sortie principale de la mine) ; centre : chemin piéton dans l'exploitation ; droite : chute du minerai par gravité

¹ par abattage à l'explosif.

1.1. Aérage

L'aérage est assuré par un ventilateur aspirant (Berry 700 HDMS 22 kW) au sommet d'un puits. Le chemin de circulation de l'air est forcé par des barrages de ventilation (Figure 2).

Aux fronts de taille, une ventilation secondaire² est assurée par un ventilateur via des gaines de ventilation souples (type « Ventube »).

Les entrées d'air se font via les accès de circulation du réseau souterrain.

La ventilation a été dimensionnée par un cabinet d'études externe, qui vient vérifier annuellement les débits de ventilation dans les galeries. Elle est dimensionnée pour évacuer les résidus de tirs³, les gaz des moteurs diesel, maîtriser la teneur en oxygène et limiter les teneurs en gaz naturellement émis dans la mine (H_2S , SO_2)

Incidents en lien avec l'aérage

- Pas de départ de feu connu.
- Pas d'incident signalé.



Figure 2. Barrage de ventilation

1.2. Utilisation de technologies émergentes

La locomotive tractant les wagonnets est alimentée par des batteries de traction au plomb. La recharge de la locomotive se fait à l'extérieur de l'exploitation souterraine. La chargeuse et la mini-pelle sont à moteur diesel. Pour remplacer la chargeuse en fin de parcours, l'exploitant s'interroge quant à investir dans une nouvelle chargeuse à batterie proposée par un fabricant français.



Figure 3. Chargeuse à moteur thermique

² Pour mémoire, l'aérage secondaire est un aérage qui vient en complément de l'aérage principal, sur des portions de longueur limitée et dans certaines situations particulières, pour envoyer l'air vicié vers le circuit d'air principal. L'aérage principal assure quant à lui un courant d'air permanent dans le réseau souterrain, avec des entrées d'air frais et des sorties d'air vicié bien séparées pour éviter le retour d'air vicié dans le réseau.

³ Les tirs ont lieu le vendredi pour permettre l'extraction des gaz de tirs durant le week-end.

2. Visite du site C

La carrière est la seule carrière souterraine de l'exploitant. Elle permet notamment la fabrication de poussière de calcaire ($d_{50} \approx 10 \mu\text{m}$). Ce calcaire à très basse teneur en fer est utilisé dans l'industrie du verre blanc d'emballage (bouteille, flacon) ainsi que pour le verre des vitres dans le secteur du bâtiment.

Le site dispose de deux arrêts d'exploitation, un dédié à l'usine de traitement du calcaire et un arrêté relatif à l'exploitation de la carrière. Cela correspond à deux zones distinctes.

Le site emploie environ 10 personnes dont 6 travaillent en production. L'arrêté préfectoral est délivré jusqu'en 2025 et autorise la production de 200 000 tonnes par an (cette année, environ 100 000 T produites et 30 000-40 000 T de remblais accueillies).

Le calcaire verrier nécessite une très basse teneur en fer, qualité très rare sur le territoire métropolitain, afin d'avoir un verre extra-clair.

La carrière est exploitée par chambres et piliers sur un seul niveau. Les galeries font au maximum 15 m de hauteur et 10 m de largeur, avec des piliers de dimensions 15 m x 40 m ou 40 m x 40 m. L'exploitation se fait par progression horizontale de 4 m par tir (sur 7 m de hauteur) puis par approfondissement vertical de 3 m puis encore 3 m.

2.1. Aérage

Le système d'aérage mécanique est assez récent, il a été dimensionné par un cabinet d'études externe.

Le besoin en ventilation a été estimé à 60 m³/s pour la configuration actuelle.

Le site dispose de deux murs d'aération, en extraction, présentés sur les photos ci-après (Figure 4).

Sur chaque mur, trois ventilateurs fonctionnent en simultané, le 4^{ème} restant au repos (secours, maintenance). Une rotation des ventilateurs actifs est organisée. Les ventilateurs ont une puissance de 11 kW correspondant à un débit maximal de 25 m³/s chacun. La capacité maximale de ventilation est donc de 200 m³/s.

Le chemin de circulation de l'air est forcé par des barrages de ventilation (Figure 5). Certains barrages sont de type « porte de quai », pour permettre le passage d'engins.

Il n'y a généralement pas besoin d'aérage secondaire sauf parfois en fond de chantier (ventilateur soufflant sur remorque, 5,5 kW, 10 m³/s).

La ventilation naturelle permet déjà de fonctionner à minima, pour du chargement simple sans stationnement du personnel. Il n'y a pas de problème d'humidité, ni de décomposition de matières organiques (H₂S, CH₄...) à gérer par l'aérage.

En cas d'incendie, il est prévu une baisse du débit d'aérage.

Historiquement, la ventilation du site a d'abord été assurée complètement en aérage secondaire par des ventilateurs soufflants en front de taille. Puis un aérage primaire a été mis en œuvre avec un unique ventilateur central soufflant (132 kW, 25 m³/s). Le passage à 4 ventilateurs (soufflants) a permis d'augmenter les débits de ventilation tout en abaissant la consommation.

Incidents en lien avec l'aérage :

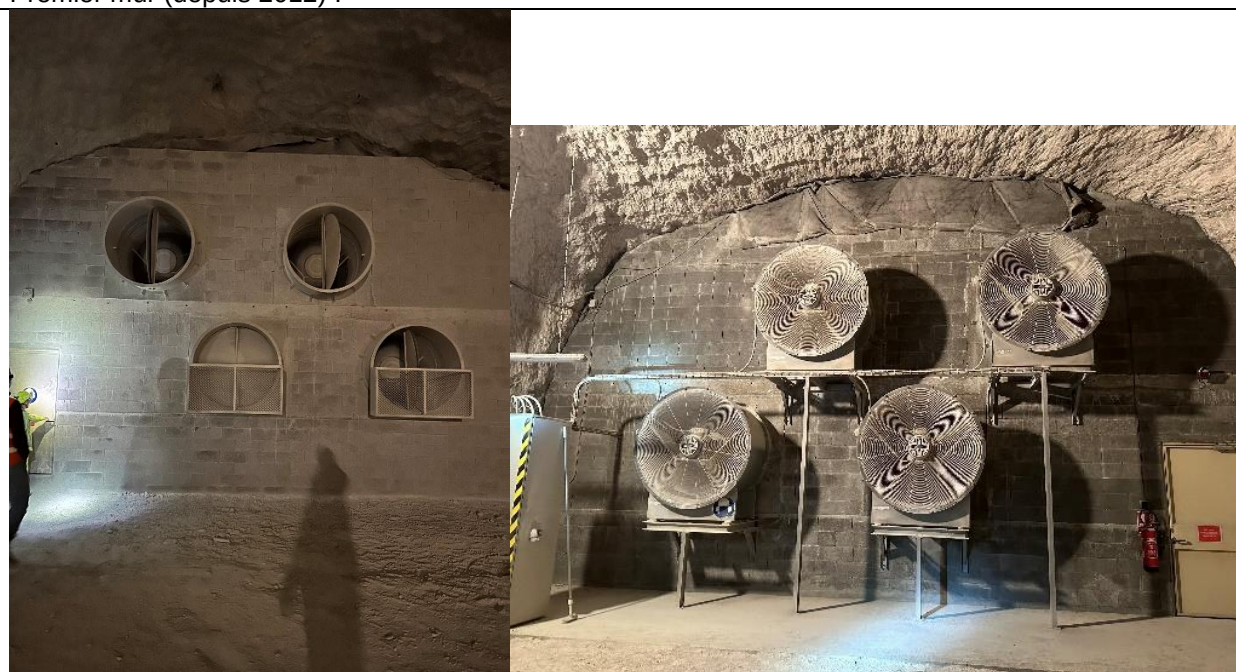
- Aucun départ de feu connu de notre interlocuteur,
- Une situation post-tir ayant nécessité de ventiler plus longtemps que le temps standard (qui est d'une nuit) avant de reprendre l'activité, du fait de la persistance de gaz de tir lourds (mélange de CO, SO₂, NOx) piégés dans une zone en contrebas.

2.2. Utilisation de technologies émergentes

Les équipements (pelles, purge à la fraise ou à la dent, chargeuse, foreuse) disposent de moteurs diesel. Le site n'a aucun projet d'utiliser des engins utilisant des technologies émergentes (batteries ou hydrogène).

L'exploitant s'interroge néanmoins sur la possibilité réglementaire d'utiliser des batteries au lithium en carrière souterraine.

Premier mur (depuis 2012) :



Deuxième mur (depuis 2019) :



Figure 4. Vues des murs de ventilation pour l'aérage primaire du site C



Figure 5. Quelques barrages de ventilation sur le site C

3. Visite du site D

Cette carrière souterraine est une carrière de pierre à ciment naturel prompt. Le gisement de ce massif calcaire est unique en Europe, exploité par deux carrières du groupe.

L'exploitation de la couche inclinée de calcaire (pendage d'environ 40°) est assurée selon la méthode des chambres et piliers, par abattage à l'explosif. La progression est d'environ 2 à 3 m par tir. Les galeries font une section de 4 m x 4 m. Du fait de cette section réduite, les machines d'exploitation sont construites sur mesure.

La carrière était partiellement en arrêt d'exploitation le jour de la visite, pour une raison de maintenance, notamment des chantiers de renforcement du soutènement (grillages + boulons, Figure 6 gauche). L'empoussièrément y était assez fort du fait de l'arrêt des ventilateurs secondaires.



Figure 6. Grillage et boulonnage au toit d'une galerie

3.2. Aérage

Les tirs d'abattage sont effectués en milieu de journée, avec un aérage (primaire) jusqu'au lendemain matin.

Le schéma des galeries est complexe. L'aérage primaire est assuré par un ventilateur central en aspiration (160 kW, au débit de 60 m³/s), situé dans la galerie principale. Un puits d'entrée d'air frais est situé dans une prairie sur la pente de la montagne au-dessus de la carrière. L'autre entrée d'air frais est la voie de roulage des locotracteurs.

Des ventilateurs secondaires soufflants sont en service au niveau des chantiers.

La vitesse visée dans les galeries pour réduire l'empoussièrement atmosphérique est de 0,3 m/s au front. Cette valeur est vérifiée par un bureau d'études tous les trois mois. Le débit du circuit primaire est vérifié tous les mois.

Les études d'aérage sont réalisées par le bureau d'études externe.

L'aérage secondaire est constitué de ventilateurs soufflant vers le front via des gaines souples, spiralées au niveau des changements de direction (pour éviter les écrasements donc limiter les pertes de charges), selon un parcours évitant la reprise d'air vicié par le ventilateur situ suffisamment en amont dans le flux d'air primaire (Figure 7).

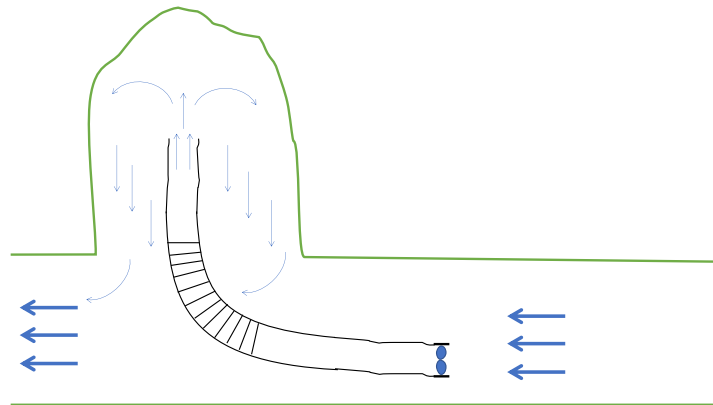


Figure 7. Schéma-type d'un système d'aérage secondaire

Incidents en lien avec l'aérage :

- Pas de départ de feu connu. Un dispositif d'extinction automatique est en cours de mise en place sur tous les engins à moteur thermique.
- Un excès de poussières local au niveau du poste « chargeuse + bande transporteuse » est en cours de traitement par un dispositif encore à optimiser, composé d'un ventilateur poussant vers un dépoussiéreur (Figure 8 droite).



Figure 8. (Gauche) bande transporteuse ; (droite) dépoussiéreur

3.3. Utilisation de technologies émergentes

Les machines sont à moteur thermique ou en électrique filaire. Quelques équipements sont à air comprimé (dont un ventilateur), mais le circuit d'air comprimé est limité en longueur.

Compte tenu de la taille du réseau souterrain, l'utilisation de machines électriques à batteries est à l'étude pour éviter d'avoir à prolonger toujours le réseau électrique. Les technologies à hydrogène ne sont pas envisagées.

