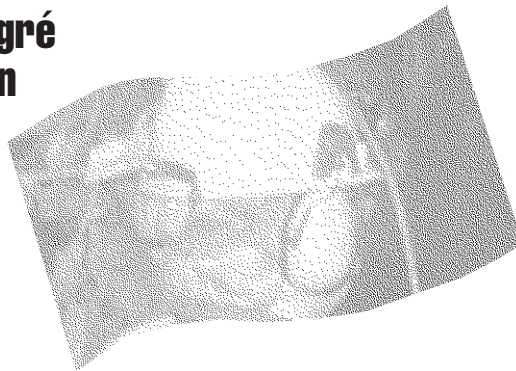


**Développement d'un modèle intégré
informatique pour la planification
de la ventilation
dans les mines souterraines**



**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

Kostas Fytas

Février 2002

R-291

RAPPORT



La recherche, pour mieux comprendre

L'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique voué à l'identification et à l'élimination à la source des dangers professionnels, et à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes. Financé par la CSST, l'Institut réalise et subventionne des recherches qui visent à réduire les coûts humains et financiers occasionnés par les accidents de travail et les maladies professionnelles.

Pour tout connaître de l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par la CSST et l'Institut, en téléphonant au 1-877-221-7046.

Les résultats des travaux de l'Institut sont présentés dans une série de publications, disponibles sur demande à la Direction des communications ou gratuitement sur le site de l'Institut.

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec
2002

IRSST - Direction des communications
505, boul. de Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
février 2002.

Développement d'un modèle intégré informatique pour la planification de la ventilation dans les mines souterraines

Kostas Fytas,
Université Laval, Département de génie des mines, de la métallurgie et des matériaux

ÉTUDES ET
RECHERCHES

RAPPORT

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Internet de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles de l'auteur.

DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE INTÉGRÉ INFORMATIQUE POUR LA PLANIFICATION DE LA VENTILATION DANS LES MINES SOUTERRAINES

Kostas Fytas, ing., Ph.D, Professeur

Département de génie des mines, de la métallurgie et des matériaux

Université Laval



Sommaire

Ce projet de recherche financé par IRSST consistait à élaborer un logiciel moderne qui permettrait de modéliser un réseau de ventilation minière. Le département de mines et métallurgie de l'Université Laval avait déjà mis au point un tel logiciel depuis 1988. Deux versions existaient, l'une en DOS et l'autre en Windows. Bien qu'utile et fiable, le logiciel comportait certaines lacunes qui limitaient son utilisation dans le milieu minier québécois. Ses faiblesses les plus importantes étaient l'absence d'une interface graphique et l'absence de branches avec un ventilateur. Par ailleurs, ce logiciel ne pouvait pas tenir compte de la compressibilité de l'air dans les mines profondes. Ce projet de recherche financé par IRSST a produit une nouvelle version très puissante de Eolaval qui intègre maintenant une interface avec Autocad, une interface graphique pour accompagner la base de données, un algorithme de balancement automatique des débits à travers le réseau, une base de données de courbes de ventilateurs, de nouveaux outils de calcul pour connaître le débit d'air frais nécessaire selon les normes et deux nouvelles options de simulation : la simulation gravitationnelle et la simulation thermodynamique qui tiennent compte de la compressibilité de l'air minier. Par ailleurs, Eolaval peut tenir compte de branches avec un ventilateur (ventilateurs de renfort). La version Bêta de ce logiciel a été distribuée en mai 2000 à plusieurs mines souterraines québécoises qui ont suggéré certaines corrections et ajouts. Suite à ces commentaires et suggestions, la version finale de ce logiciel a été terminée en octobre 2000. La version finale a été distribuée à toutes les mines souterraines québécoises lors d'un colloque organisé par l'Association minière du Québec et l'Université Laval à Val d'Or le 2 février 2001. Le chercheur s'engage à corriger des fautes éventuelles du logiciel dans l'avenir. Les mises à jour du logiciel sont disponibles sur Internet à l'adresse : www.gmn.ulaval.ca/eolaval

TABLE DES MATIÈRES

Sommaire	ii
1. Introduction	1
2. Description du logiciel.....	4
2.1 Programmation	4
2.2 Objectifs de la simulation de la ventilation minière	4
2.3 L'entrée de données	4
2.4 L'interface avec l'utilisateur	6
2.5 La fenêtre graphique	7
2.6 L'entrée de données	7
2.7 Les contrôles de visionnement.....	7
2.8 Création et édition de branches et de nœuds	7
2.9 Préférences.....	8
3. Outils de calculs de Eolaval.....	10
4. Sélection de ventilateurs – Base de données.....	14
5. Auto-balancement des débits.....	15
6. Approches de simulation	16
6.1 Simulation conventionnelle	16
6.2 Simulation gravitationnelle.....	17
6.3 Simulation thermodynamique.....	17
7. Conclusions	18
Références	19
ANNEXE A	21
La méthode de Hardy-Cross pour un fluide incompressible (simulation conventionnelle).....	21
A.1 Rappel théorique	23
ANNEXE B	25
La méthode de Hardy-Cross pour un fluide compressible (simulation gravitationnelle et thermodynamique).....	25
B.1 Relations de base de la thermodynamique.....	27
B.1.1 Première loi de la thermodynamique.....	27

<i>B.1.2 Rappel sur les relations de base de psychrométrie.....</i>	<i>27</i>
<i>Pression de vapeur à la saturation à la température humide</i>	<i>27</i>
<i>Humidité à la saturation</i>	<i>27</i>
<i>Chaleur latente d'évaporation</i>	<i>27</i>
<i>Chaleur sigma</i>	<i>27</i>
<i>Humidité absolue.....</i>	<i>28</i>
<i>Pression de vapeur actuelle</i>	<i>28</i>
<i>Densité apparente de l'air.....</i>	<i>28</i>
<i>Densité actuelle de l'air</i>	<i>28</i>
B.2. Relation de base des flux incompressibles.....	28
<i>Relation entre la pression, la densité et le travail fait contre la friction</i>	<i>30</i>
B.3 La simulation gravitationnelle.....	30
<i>B.3.1 Révision de la méthode conventionnelle.....</i>	<i>30</i>
<i>Lois de Kirchhoff.....</i>	<i>30</i>
<i>B.3.2 Déviation de la loi carrée</i>	<i>30</i>
<i>B.3.3 Méthode de Hardy-Cross pour un fluide incompressible.....</i>	<i>31</i>
<i>B.3.4 Méthode de Hardy-Cross pour un fluide compressible</i>	<i>31</i>
B.4 La simulation thermodynamique	33
<i>B.4.1 Théorie de base de la simulation</i>	<i>33</i>
<i>B.4.2 Équation de l'énergie pour une conduite minière</i>	<i>34</i>
B.4.3 Algorithmes de la simulation	34
<i>Programme principal</i>	<i>34</i>
<i>Résoudre le réseau</i>	<i>34</i>
<i>Calculer la chaleur des branches.....</i>	<i>34</i>
<i>Calculer la chaleur de chaque branche</i>	<i>34</i>
<i>B.4.3.1 Calcul de la chaleur transmise par la roche</i>	<i>35</i>
<i>B.4.3.2 Calcul du flux de chaleur d'une paroi sèche</i>	<i>35</i>
<i>B.4.3.3 Calcul du flux de chaleur d'une paroi humide</i>	<i>37</i>
<i>B.4.3.4 Calcul de l'échange total de chaleur entre l'air et la roche.</i>	<i>38</i>
<i>B.4.3.5 Algorithme de Gibson</i>	<i>39</i>
<i>B.4.3.6 Calcul de la chaleur transmise par les équipements mécaniques</i>	<i>39</i>
<i>Moteurs électriques</i>	<i>40</i>
<i>Moteurs diesels.....</i>	<i>40</i>
<i>B.4.3.7 Calcul de la variation d'énergie potentielle</i>	<i>41</i>
<i>B.4.3.8 Calcul de la variation d'énergie cinétique</i>	<i>41</i>
<i>B.4.3.9 Calcul du travail fourni par le ventilateur.....</i>	<i>42</i>
<i>B.4.4 Calcul des pertes par friction</i>	<i>42</i>
<i>Calcul de la température sèche.....</i>	<i>43</i>
<i>Calcul de la pression barométrique.....</i>	<i>43</i>
<i>Calcul de la température humide.....</i>	<i>43</i>

ANNEXE C	45
Sommaire de la méthodologie de travail avec Eolaval	
<i>Introduction</i>	<i>47</i>
<i>1^{re} étape Schéma sur Autocad</i>	<i>47</i>
<i>2^e étape Importer un fichier DXF.....</i>	<i>47</i>
<i>3^e étape Construction de la base de données</i>	<i>48</i>
<i>4^e étape Simulation.....</i>	<i>48</i>
<i>Simulation conventionnelle</i>	<i>48</i>
<i>Simulation gravitationnelle.....</i>	<i>48</i>
ANNEXE D	49
EOLAVAL, A Mine Ventilation Planning Tool, (un article publié sur Eolaval)	
Introduction	51
Programming.....	51
<i>Graphics interface.....</i>	<i>51</i>
<i>Spreadsheet</i>	<i>52</i>
<i>Simulation.....</i>	<i>52</i>
<i>User Interface.....</i>	<i>53</i>
<i>Graphic view</i>	<i>53</i>
Input	53
View controls	53
Creating and editing objects.....	54
Message window	54
Preferences	55
<i>Spreadsheet view.....</i>	<i>55</i>
Case Study.....	55
CONCLUSIONS.....	58
REFERENCES.....	58
ANNEXE E	61
Simulation d'une mine profonde – étude de cas	
Définition du problème	63

Description du réseau	63
Résultats	64
<i>Simulation conventionnelle</i>	64
<i>Simulation gravitationnelle</i>	65
<i>Simulation thermodynamique</i>	65
<i>Conclusions</i>	67

1. Introduction

La ventilation minière des mines souterraines est d'une importance primordiale pour la santé et la sécurité des ouvriers miniers. Un système de ventilation insuffisant peut provoquer des maladies dites professionnelles (ex. : pneumoconiose, silicose, amiantose, etc.). Ces maladies sont le résultat d'une exposition prolongée des ouvriers à des poussières et à des gaz toxiques (ex. CO, NO) au-delà des concentrations limites selon les normes gouvernementales. Il suffit de mentionner ici le caractère cancérigène (déjà prouvé par des scientifiques) des poussières d'amiante et de la silice. De l'autre côté, des études épidémiologiques récentes (Centre International sur le Cancer: CIRC, et le National Institute for Occupational Safety and Health: NIOSH) suggèrent une relation entre l'exposition professionnelle aux fumées diesel à long terme et une incidence plus élevée de cancers pulmonaires chez les travailleurs exposés.

Le NIOSH recommandait en 1988 que les émissions diesels soient considérées comme un élément cancérigène potentiel en milieu de travail (1). Le CIRC, pour sa part considérait en 1989 qu'il y avait suffisamment de données pour conclure que les émissions diesels sont un élément cancérigène probable pour l'être humain (2).

La seule façon d'éviter ces risques de maladies professionnelles est de bien diluer ces gaz et poussières en bas des limites réglementées avec un système de ventilation qui est efficace et précis. Afin d'assurer un bon système de ventilation, il faut informatiser le système de ventilation et effectuer des simulations informatiques qui vont nous dicter les débits d'air frais partout dans la mine afin de respecter les normes gouvernementales pour tous les polluants.

La simulation de réseaux de ventilation minière des mines souterraines est une partie importante du processus de planification minière. La simulation de la ventilation minière était une des premières applications d'informatique dans l'industrie minière (dans les années 60). Depuis cette époque, la planification de la ventilation minière assistée par ordinateur est devenue une pratique de routine dans toutes les mines souterraines. Lors de la simulation de la ventilation, plusieurs scénarios alternatifs de ventilation sont examinés afin d'optimiser la ventilation souterraine.

Les objectifs de la simulation de ventilation d'une mine sont : le calcul des quantités d'air requis pour le personnel et l'équipement minier, la répartition des débits sous-terre, le calcul des pertes totales de pression dans le réseau de ventilation, la sélection des ventilateurs nécessaires pour la ventilation, l'évaluation de chemins alternatifs de l'air minier à travers la mine et le dimensionnement économique des monteries de ventilation (Hartman et al., 1997).

L'objectif de ce projet de recherche était de créer un outil informatique (logiciel) de ventilation ayant comme fonction d'épauler l'ingénieur minier (ou le technicien minier) dans son effort de planifier un système de ventilation souterraine qui est sain, sécuritaire et confortable.

Tableau 1. Tableau comparatif des caractéristiques des logiciels de ventilation minière disponibles aujourd'hui

Nom du Logiciel	Compagnie	Coût	Système d'opération	Variation de densité	Compatible avec AutoCAD	Éditeur graphique
VentPC	Mine Ventilation Services, Californie	1000 \$US	Windows	Non	Non	Oui, simplifié
Vendis	Ineris, France	20 000 \$	Unix	Oui	Non	Oui
AutoVent	Noranda	Pas disponible à l'extérieur de Noranda	Windows	Non	Oui	Oui
Canvent	Canmet	2 000 \$	Windows	Non	Non	Oui
Mine fire	Michigan Technological University	Gratuit	Dos	Oui	Non	Non
Cai Mf	University of Kentucky	-	Windows	Oui	Non	Oui
EoLaval	Université Laval	Gratuit	Windows	Oui	Oui	Oui
VUMA	Afrique du Sud, BBM	4, 500\$	Windows	Oui	Oui	Simplifié

Le chercheur (Kostas Fytas) en collaboration avec l'Association minière du Québec avait développé dans le passé une forme initiale d'un tel outil informatique de ventilation minière. Ce logiciel (première version en DOS de Eolaval) était déjà utilisé dans la plupart des mines souterraines québécoises au début des années 90 (Fytas K. et al., 1995 & 1997). On l'utilisait sur une base quotidienne pour la planification de la ventilation souterraine. Toutefois, il manquait plusieurs aspects très importants, comme la représentation graphique du réseau sur l'écran de l'ordinateur, la considération de la variation de la densité de l'air avec la profondeur, et la considération des caractéristiques techniques des ventilateurs (courbes caractéristiques). Surtout les deux premières lacunes rendaient ce modèle très limité compte tenu que les mines québécoises deviennent de plus en plus profondes et compliquées. Donc, le produit final de ce projet de recherche financé par IRSST est un logiciel intégré de ventilation minière qui est capable de répondre aux besoins de toutes les mines modernes du Québec. La nouvelle version très puissante de Eolaval intègre maintenant une interface avec Autocad, une interface graphique pour accompagner la base de données, un algorithme de balancement automatique des débits à travers le réseau, une base de données de courbes de ventilateur, de nouveaux outils de calcul pour connaître le débit d'air frais nécessaire selon les normes et une simulation dite gravitationnelle, ainsi qu'une simulation dite thermodynamique qui tient compte de la compressibilité de l'air minier. Par ailleurs, il peut tenir compte de branches avec un ventilateur (ventilateurs de renfort). Le tableau comparatif 1 contient les logiciels de ventilation minière disponibles sur le marché aujourd'hui.

On peut constater qu'actuellement, à l'exception du logiciel Autovent de Noranda, il n'y a pas de logiciels qui sont compatibles avec les fichiers Autocad que la majorité de mines utilise aujourd'hui pour la planification minière. Par ailleurs, Eolaval et VUMA sont les seuls logiciels de ventilation minière qui considèrent l'effet de la densité de l'air minier. Toutefois,

la différence majeure entre Eolaval et VUMA en ce qui concerne la simulation thermodynamique est que VUMA est basé sur des équations complètement empiriques que les Sud-africains ont développé dans le passé, tandis que Eolaval est basé sur des équations analytiques thermodynamiques. Malheureusement au Québec nous n'avons pas eu de mines profondes jusqu'à récemment pour pouvoir développer des équations empiriques appropriées pour notre gradient géothermique. De l'autre côté, les conditions et les méthodes d'abattage des mines profondes de l'Afrique du Sud sont très différentes de celles du Québec.

Eolaval dans sa dernière version (version 18, novembre 2001) a été validé et vérifié avec des réseaux réels de mines souterraines du Québec. Depuis un an il est utilisé fréquemment par plusieurs mines au Québec (entre autres les mines Kiena, Sigma, Raglan et Niobec) qui ont aussi vérifié la fiabilité de ses résultats.

2. Description du logiciel

2.1 Programmation

La partie principale de la présente version de Eolaval a été écrite en utilisant la librairie de logiciels MFC (Microsoft Foundation Class Library) de Microsoft. La compagnie Microsoft distribue cette librairie et elle constitue le noyau du système d'exploitation Windows. La librairie MFC comprend une multitude d'outils qui permettent au programmeur de créer des logiciels qui ressemblent à une application type Windows. Il s'agit d'une caractéristique qui rend Eolaval convivial et qui diminue le temps d'apprentissage.

L'interface graphique a été développée dans l'environnement OpenGL. Ceci est un environnement de développement des applications graphiques en deux et en trois dimensions qui a été développé par Silicon Graphics (E.U.) et qui fait partie de la plupart de logiciels de dessin assisté par ordinateur (DAO). Il s'agit d'un outil très puissant qui est supporté par tous les fabricants de cartes graphiques. L'interface graphique a été programmée en ClassGL, une librairie de logiciels développée par Solid Graphics qui rend plus facile et plus légère l'utilisation de MFC et la programmation en OpenGL.

Afin de faciliter l'affichage des paramètres de branches et de nœuds durant la simulation de ventilation, un logiciel de chiffrier (spreadsheet) développé par Christ Maunder a été utilisé. Ce chiffrier est programmé en MFC et il est distribué gratuitement sur Internet.

2.2 Objectifs de la simulation de la ventilation minière

Les objectifs de la simulation du réseau de ventilation d'une mine sont les suivants (Hartman et al., 1997) :

- le calcul des quantités totales d'air requis pour le personnel et l'équipement minier afin de satisfaire les normes gouvernementales
- le calcul des quantités d'air requis par endroit de travail pour le personnel et l'équipement minier afin de satisfaire les normes gouvernementales
- la répartition des débits sous-terre
- la localisation de ventilateurs de renfort et de régulateurs sous-terre
- le calcul des pertes totales de pression dans le réseau de ventilation
- la sélection des ventilateurs principaux et de renfort nécessaires pour la ventilation
- l'évaluation de chemins alternatifs de l'air minier à travers la mine
- le dimensionnement économique des monteries de ventilation
- la sélection des ventilateurs et de la tuyauterie nécessaires pour la ventilation auxiliaire et
- l'estimation de la ventilation naturelle.

La nouvelle version de Eolaval aide à répondre à toutes ces questions rapidement et efficacement.

2.3 L'entrée de données

La première étape de la simulation d'un réseau de ventilation est la création d'un modèle en trois dimensions (3D) du réseau qui place toutes les branches et nœuds dans l'espace tridimensionnel. Une *branche* est définie comme toute ouverture minière (ex. une rampe, un puits, une galerie, un travers-banc etc.) qui peut être utilisée pour l'acheminement

Figure 1 Définition de branches et de nœuds

de l'air minier sous-terre. Une branche peut-être constituée d'un ou de plusieurs segments en série. Ces segments doivent par exemple partager les mêmes attributs géométriques ou attributs de ventilation. Un *nœud* est défini comme le point de jonction de deux ou plusieurs branches. La définition des branches et de nœuds dans Eolaval est illustrée sur la Figure 1.

Dans l'ancienne version de Eolaval, l'utilisateur devait entrer manuellement tous les paramètres pour chaque branche du réseau de ventilation. Compte tenu qu'aucune interface graphique n'était utilisée, il n'y avait pas de paramètres pour les nœuds. Ce processus d'entrée de données manuel était très fastidieux. Dans la nouvelle version, l'utilisateur doit placer les données géométriques des branches et les nœuds du réseau dans l'environnement graphique. Cela peut être effectué soit directement dans Eolaval ou en utilisant un autre logiciel de DAO (ex. Autocad) et ensuite en important ces données à Eolaval, en utilisant un fichier DXF.

En ce qui concerne les paramètres de ventilation des branches et des nœuds, l'utilisateur doit entrer les données suivantes pour chaque branche et chaque nœud :

- surface de la branche
- périmètre de la branche
- facteur de friction K
- facteur de forme
- longueur de la branche
- résistance (elle peut-être aussi calculée par le logiciel).

L'utilisateur doit aussi spécifier le type de la branche. Les options disponibles sont :

- une branche de débit variable

- une branche de débit fixe
- une branche avec un ventilateur de renfort.

L'utilisation de branches avec un ventilateur de renfort est une nouvelle caractéristique pour Eolaval. Chaque fois qu'une branche de ventilateur de renfort est choisie l'utilisateur doit

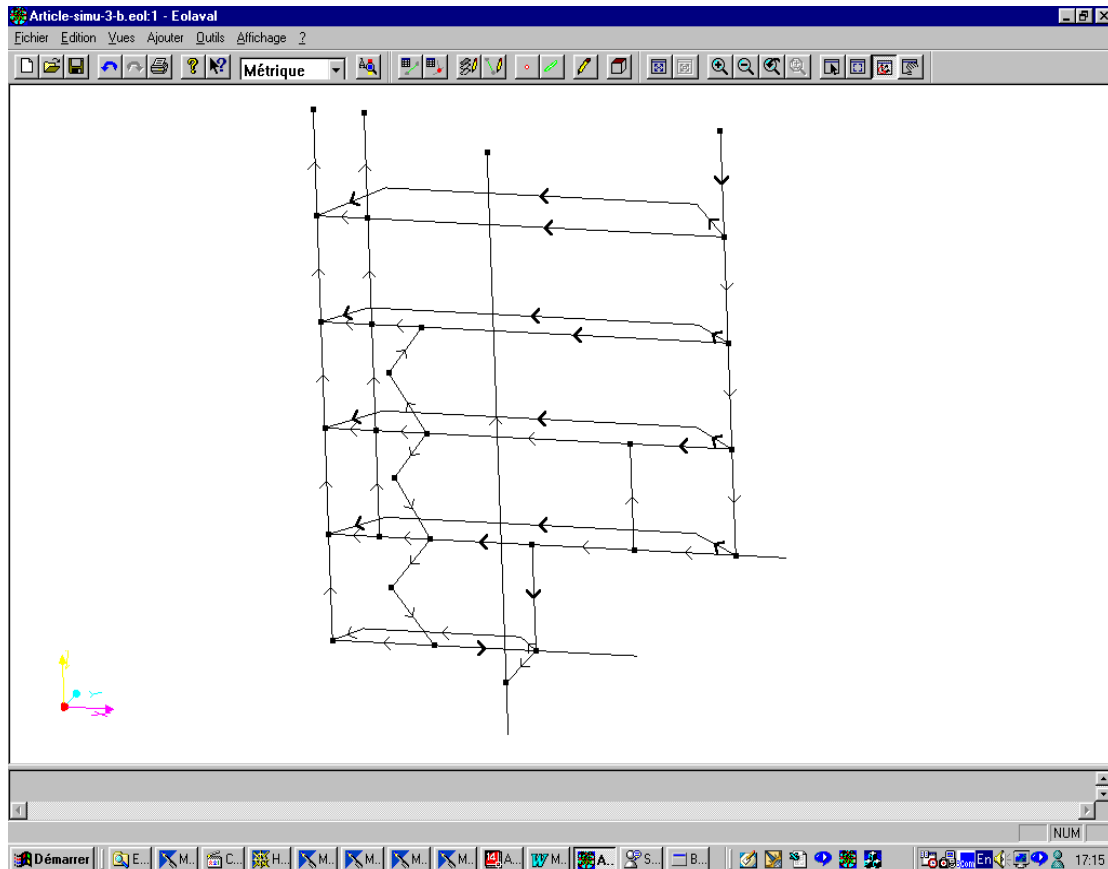


Figure 2. Fenêtre de visionnement du réseau de ventilation en 3-D

spécifier le modèle du ventilateur dans une base de données des ventilateurs qui est intégrée dans Eolaval. Cette banque de données contient les courbes caractéristiques des ventilateurs qui sont le plus souvent utilisés au Québec (Alphair et Woods).

Une fois que toutes les données géométriques et les données de ventilation sont entrées l'utilisateur peut continuer avec la simulation du réseau de ventilation. L'utilisateur a le choix parmi les trois types suivants de simulation :

- simulation conventionnelle
- simulation gravimétrique
- simulation thermodynamique.

2.4 L'interface avec l'utilisateur

L'interface avec l'utilisateur d'un logiciel est l'aspect le plus important durant le développement d'un logiciel. Plusieurs logiciels sophistiqués sont sous-utilisés à cause de leur interface inappropriée avec l'utilisateur. Une bonne interface avec l'utilisateur doit être conviviale, facile à apprendre et intuitive.

L'interface avec l'utilisateur de la nouvelle version de Eolaval offre la plupart des fonctions et des caractéristiques standards de Windows. Il est possible d'ajouter, déplacer et effacer les barres d'outils. Il y a des outils de suggestion, des barres d'état d'avancement, des barres d'aide et une rubrique d'aide (en html) très sophistiquée qui inclut une courte session d'apprentissage (tutorial) du logiciel (annexe C). Il y a aussi un système d'actions faire/défaire (do/undo) illimitées.

L'interface avec l'utilisateur de Eolaval est constituée de deux fenêtres principales de visionnement. La première est utilisée pour visualiser le réseau de ventilation en trois dimensions (Figure 2). La deuxième fenêtre affiche le réseau en forme de chiffrier électronique (Figure 3). En utilisant cette fenêtre, l'utilisateur peut éditer son réseau en ajoutant ou en effaçant des branches ou des nœuds. À travers cette fenêtre, l'utilisateur peut aussi faire balancer les débits de son réseau et effectuer les simulations.

2.5 La fenêtre graphique

La fenêtre de visionnement graphique de Eolaval est une interface simple de DAO. Elle permet à l'utilisateur de récupérer les données graphiques à partir d'un logiciel DAO (ex. Autocad), de manipuler et d'éditer graphiquement les branches et les nœuds du réseau de ventilation et de visionner les résultats de la simulation.

2.6 L'entrée de données

La version actuelle de Eolaval peut utiliser comme fichier d'entrée de données soit un fichier DXF (Drawing Exchange Format), ou bien l'utilisateur peut bâtir son réseau de ventilation à partir de zéro. Les fonctions suivantes de dessin sont supportées :

- de points
- de poly-lignes en 2D et 3D
- de lignes
- de poly-surfaces
- de boucles en 3D
- de couches.

2.7 Les contrôles de visionnement

Eolaval offre plusieurs options de navigation graphique à l'intérieur d'un réseau de ventilation. Il permet à l'utilisateur de trouver facilement la meilleure vue en 3D lors de la visualisation de son réseau (Figure 2). Les outils de visionnement disponibles sont :

- l'agrandissement dynamique
- l'agrandissement de la fenêtre
- la vue panoramique
- la rotation
- le changement du centre de rotation.

Il est possible de nommer et de sauvegarder des vues spéciales ou de retourner aux vues antérieures. Eolaval utilise le système de couches d'informations comme Autocad. Il permet à l'utilisateur de regrouper des objets et de modifier les propriétés des objets en modifiant les propriétés des couches.

2.8 Création et édition de branches et de nœuds

L'utilisateur peut créer une nouvelle branche ou un nouveau nœud. Il peut entrer les coordonnées spécifiques manuellement ou bien le logiciel peut les déterminer

automatiquement en cliquant sur de points spécifiques de l'écran graphique. Une branche ou un nœud peut être effacé en tout temps et le logiciel offre aussi des outils pour éditer ses propriétés (ex. l'élévation) et des outils de dessin comme :

- un système d'axes qui montre l'orientation de la vue
- fenêtre de messages qui affiche tous les messages reliés à l'écran graphique (elle donne des instructions sur la commande actuelle et elle affiche les messages d'erreur)
- affichage des coordonnées de la position actuelle du curseur dans la fenêtre de messages
- outil d'accrochage autour des objets (snap).

2.9 Préférences

La version actuelle de Eolaval permet à l'utilisateur de modifier la façon que les données d'entrée et de sortie sont présentées afin de répondre à ses besoins spécifiques. À titre d'exemple, l'utilisateur peut décider de la forme des informations qu'il veut faire afficher sur l'écran en modifiant les paramètres des préférences (Figure 4).

Bases de données											
Fichier Edition Vues Outils Affichage ?											
Noeuds											
No. de Noeud	Br. Entrantes	Br. Sortantes	Bilan m³/s	X	Y	Z	Temp. Sèche °C	Temp. Humide °C	Pression Pa		
e3-n1	e3-b1	e3-b5	0.0000	150.0000	0.0000	-100.0000	15.0000	15.0000	101.3000		
e4-n2	m4	e4-b2,e4-b1	-0.0000	200.0000	0.0000	-150.0000	15.0000	15.0000	101.3000		
e5-n3	e5-b2	e5-b3,m5	-0.0000	0.0000	0.0000	-200.0000	15.0000	15.0000	101.3000		
Surface	m3,p2	m1	0.0000	200.0000	0.0000	50.0000	15.0000	15.0000	101.3000		
e2-n1	e2-b1	R1,e2-b4	0.0000	49.6109	0.0000	-50.0000	15.0000	15.0000	101.3000		
e3-n2	m3	e3-b2,m4,e3-b1	0.0000	200.0000	0.0000	-100.0000	15.0000	15.0000	101.3000		
e4-n3	e4-b2,m5,e4-b3	m6	-0.0000	0.0000	0.0000	-150.0000	15.0000	15.0000	101.3000		
e1-n1	e1-b1	e1-b3	0.0000	25.0000	0.0000	0.0000	15.0000	15.0000	101.3000		
e2-n2	m2	e2-b2,m3,e2-b1	0.0000	200.0000	0.0000	-50.0000	15.0000	15.0000	101.3000		
e3-n3	e3-b2,m6,e3-b3	m7	0.0000	0.0000	0.0000	-100.0000	15.0000	15.0000	101.3000		
e4-n4	e4-b4	e4-b3	-0.0000	25.0000	0.0000	-150.0000	15.0000	15.0000	101.3000		
r1	R1	R2	0.0000	32.4439	0.0000	-72.5243	15.0000	15.0000	101.3000		
e1-n2	m1	e1-b2,m2,e1-b1	0.0000	200.0000	0.0000	0.0000	15.0000	15.0000	101.3000		
e2-n3	e2-b2,m7,e2-b3	m8	0.0000	0.0000	0.0000	-50.0000	15.0000	15.0000	101.3000		
e2-n4	e2-b4	e2-b3	0.0000	25.0000	0.0000	-100.0000	15.0000	15.0000	101.3000		

Branches												
No. de branche	Entrée	Sortie	Surface m²	Périmètre m	Facteur K kg/m³	Facteur de forme	Longueur m	Résistance sec²Pa/m⁶	Débit m³	Débit fixe Index	Ventilateur	Description
R1	e2-n1	r1	16.0000	16.0000	0.0160	1.1300	28.3000	0.0020	25.5911	Non		Rampe 1
R2	r1	e3-n5	16.0000	16.0000	0.0160	1.1300	32.6000	0.0023	25.5911	Non		Rampe 2
R3	e3-n5	r2	16.0000	16.0000	0.0160	1.1300	27.1000	0.0019	39.9303	Non		Rampe 3
R4	r2	e4-n5	16.0000	16.0000	0.0160	1.1300	32.7000	0.0023	39.9303	Non		Rampe 4
p1	e5-n2	p1	16.0000	16.0000	0.0160	1.1300	50.0000	0.0035	111.7844	Non		ravers banc puit
R5	e4-n5	r3	16.0000	16.0000	0.0160	1.1300	31.0000	0.0022	39.9225	Non		Rampe 5
m10	e4-n6	e5-n2	12.2500	14.1400	0.0180	1.1300	50.0000	0.0078	40.0165	Non		rie entre niv5 et
R6	r3	e5-n1	16.0000	16.0000	0.0160	1.1300	33.0000	0.0023	39.9225	Non		Rampe 6
p2	p1	Surface	38.5000	22.0000	0.0350	1.0000	250.0000	0.0034	111.7844	Non		Puits
m1	Surface	e1-n2	15.9000	14.1400	0.0120	1.0000	50.0000	0.0021	230.0000	Oui		Monterie entré
m2	e1-n2	e2-n2	15.9000	14.1400	0.0120	1.0000	50.0000	0.0021	121.7401	Non		monterie
m3	e2-n2	e3-n2	15.9000	14.1400	0.0120	1.0000	50.0000	0.0021	67.2411	Non		monterie
e5-b1	e5-n1	e5-n2	16.0000	16.0000	0.0160	1.1300	50.0000	0.0035	41.1582	Non		Niv.5,branche 1
e4-b1	e4-n2	e4-n1	16.0000	16.0000	0.0160	1.1300	50.0000	0.0035	26.3895	Non		Niv4, branche 1
e4	e2-n2	e4-n2	15.9000	14.1400	0.0120	1.0000	50.0000	0.0021	42.7271	Non		monterie

Figure 3. La fenêtre de visionnement des données de ventilation en forme de chiffrier

Préférences Eolaval	
Affichage Simulation Noeuds Branches Graphique	
Branches	
<input type="checkbox"/>	Nom
<input type="checkbox"/>	Description
<input type="checkbox"/>	Débit
<input type="checkbox"/>	Résistance
<input checked="" type="checkbox"/>	Direction
<input type="checkbox"/>	Type
<input type="checkbox"/>	Facteur K
Noeuds	
<input type="checkbox"/>	Nom
<input type="checkbox"/>	Bilan
<input type="checkbox"/>	Pression
<input type="checkbox"/>	Elévation
<input type="checkbox"/>	Température humide
<input type="checkbox"/>	Température sèche
OK Annuler Appliquer Aide	

Figure 4. Les préférences de l'affichage des paramètres

3. Outils de calculs de Eolaval

Le logiciel Eolaval comprend sept outils de calcul pour aider l'utilisateur dans la planification de son réseau de ventilation. Ces outils de calcul sont les suivants :

Chauffage : Cet outil permet le calcul des coûts liés au chauffage de l'air en hiver par l'électricité ou le gaz naturel (Figure 5).

Densité : Le changement du poids volumique de l'air influence les variables de pression et de puissance mécanique du ventilateur. À l'aide de cet outil, il est donc possible de connaître le point opérationnel du ventilateur pour la densité réelle (Figure 6).

DIMECO : Cet outil de calcul donne le coût annuel actualisé (électricité + construction) de la construction d'une monterie simple ou double selon la longueur de la monterie, la durée de vie de la mine, le taux d'intérêt, le facteur de friction K, le débit d'air, les heures d'opération par année et le coût d'électricité (Figure 7).

PVN : La pression de ventilation naturelle est causée par le changement de température et de poids volumique de l'air lors de son passage dans la mine. La colonne d'air la plus lourde (la plus froide) a tendance à tomber et à déplacer l'air chaud, plus léger. La direction d'écoulement dans la mine se fera donc de la colonne la plus pesante vers la colonne la plus légère (Figure 8).

Ventaux : La boîte de dialogue de l'outil de la ventilation auxiliaire détermine la pression minimum d'un ventilateur auxiliaire. Donc, utile pour la ventilation de tout ce qui n'est pas touché par le courant d'air principal (Figure 9).

Données

Le Premier Mois: [dropdown] Débit d'air: [input] m³/s

Le Dernier Mois: [dropdown] Valeur de l'efficacité: [input] <0..1>

Température de l'air chauffée: [input] °C

Prix

Électricité: [input] ¢/kW

Gaz: [input] ¢/m³

Calcul

Mois	Temp.moy.(°C)	Nombre de jours	Puissance (kW)	Éner.mensu.(kWh)
Juillet	[input]	[input]	[input]	[input]
Août	[input]	[input]	[input]	[input]
Septembre	[input]	[input]	[input]	[input]
Octobre	[input]	[input]	[input]	[input]
Novembre	[input]	[input]	[input]	[input]
Décembre	[input]	[input]	[input]	[input]
Janvier	[input]	[input]	[input]	[input]
Février	[input]	[input]	[input]	[input]
Mars	[input]	[input]	[input]	[input]
Avril	[input]	[input]	[input]	[input]
Mai	[input]	[input]	[input]	[input]
Juin	[input]	[input]	[input]	[input]

Énergie totale: [input] kWh

Électricité: Coût total [input] \$

Gaz: Volume total [input] m³ Coût total [input] \$

Buttons: Calcul, Importer, Imprimer, Fermer

Figure 5. Boîte d'outils qui calcule les coûts liés au chauffage de l'air en hiver

DENSITÉ

CALCUL DE LA CORRECTION DU POINT OPÉRATIONNEL DU VENTILATEUR POUR LA DENSITÉ RÉELLE.

Correction pour la densité

Température Sèche °C

Température Humide °C

Pression Barométrique Pa

Pertes Totales dans la Mine Pa

Débit Requis m³/s

Puissance du Ventilateur kW

Vitesse de Rotation RPM

Résultats

Pression du ventilateur Pa

Débit fourni m³/s

Puissance mécanique requise kW

Densité de l'air humide kg/m³

Figure 6. Boîte d'outils du calcul de l'effet de la densité sur le point opérationnel du ventilateur.

Dimension économique des monteries

Dimensions Économiques de Cheminées

Longueur de la cheminée m

Durée de vie de la mine année

Taux d'intérêt entre 0 et 100

Facteur K de la cheminée Kg/m³

Débit d'air m³/s

Heures d'opération/année heures/année

Coût d'électricité c/KWH

Base de données:

C:\Mes Documents\yyvdmc.mdb

	Type	Longueur	Largeur diamètre	Surface	Coût/m ³	Coût total/année	Coût total/ann pour 2
1	Convention	5.00	6.00	30.00	5.42	4664.83	9261.32
2	Convention	5.00	8.00	40.00	4.75	5427.65	10821.23
3	Convention	6.00	6.00	36.00	6.77	6961.96	13880.78
4	Convention	6.00	8.00	48.00	4.38	5997.47	11973.72
5	Convention	8.00	8.00	64.00	2.53	4615.95	9221.67
6	Convention	8.00	10.00	80.00	2.08	4741.32	9476.74
7	ALIMAK	8.00	8.00	64.00	5.27	9609.42	19208.60

Figure 7. Boîte d'outils du dimensionnement économique des monteries.

PVN X


CALCUL DE LA PRESSION DE VENTILATION NATURELLE

Choix de la méthode de calcul:

Différence de poids volumique des deux colonnes: Méthode empirique:

Différence de poids volumique des deux colonnes:

Profondeur du Fond m



	Temp. Sèche	Temp. Humide	Pres. Baro.
Colonne descendante #1	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
#2	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Colonne ascendante #3	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
#4	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

°C °C KPa

Méthode empirique:

Différence de température: °C

Différence d'élévation: m

Pression de ventilation naturelle: Pa

Pression de ventilation Pa

Figure 8. Boîte d'outils qui calcule la pression de ventilation naturelle.

Ventilation auxiliaire X

DÉTERMINATION DE LA PRESSION MINIMALE D'UN VENTILATEUR AUXILIAIRE

Important

Cette partie du logiciel a été élaborée à partir des abaques de la tuyauterie ABC. Pour cela, on distinguera

Le type souple (i.e. système soufflant)	Code: MineVent
Le type souple renforcé (i.e. système aspirant-soufflant)	Code: MineDuct
Le type métallique (i.e. système aspirant soufflant)	Code: RigiDuct

Données:

Type de Tuyauterie ▼

Débit requis dans le chantier m³/s

Longueur totale de la tuyauterie m

Longueur de chaque morceau m

Nombre de coudes à 90°

Diamètre des Tubes po

Il est conseillé de choisir un ventilateur de pression minimum: Pa

Figure 9. Boîte d'outils qui détermine la pression minimale d'un ventilateur auxiliaire

Pertes dans le puits : Cet outil est utile pour connaître entre autre le facteur K du puits de la mine. Même si les puits ont des dimensions supérieures aux galeries, ils ont une résistance à l'écoulement très élevée. Le boisage, les échelles et paliers ou encore les unités mobiles comme les cages ou les skips expliquent cette valeur élevée de la résistance (Figure 10). Eolaval utilise les formules analytiques de calcul de la résistance des puits développés par McPherson (1993).

Figure 10. Boîte d'outils qui évalue les pertes dans un puits.

Outil de calcul des exigences en air frais : Une des étapes la plus importante lors de la planification de la ventilation minière est l'estimation des besoins en air frais sous-terre par endroit de travail et pour la totalité de la mine. La nouvelle version de Eolaval contient un outil de calcul du volume d'air frais requis pour la totalité de la mine et pour chaque endroit de travail sous terre afin de satisfaire les normes. La méthodologie de calcul suivie est celle définie par l'Association des mines de métaux du Québec Inc. Les deux boîtes de dialogue de cet outil de calcul sont illustrées sur la Figure 11 et 12.

Volume total d'air frais requis sous terre

Données générales:

Nombre de tonnes par jour tonnes/jour

Nombre de travailleurs par quart

Surface totale des endroits de travail m²

Volume total d'entrepôts et de garages m³

Nombre de concasseurs

Nombre de trémies de chargement

Quantité totale de HP pour l'équipement diesel homologué

Quantité totale de HP pour l'équipement diesel non homologué

Volume total d'air frais requis sous terre

m³/s

OK Annuler

Figure 11. Estimation des besoins en air frais pour toute la mine

Exigence d'air frais pour chaque endroit de travail sous terre

Données générales:

Nombre de travailleur à l'endroit de travail

Données pour l'équipement diesel fonctionnant simultanément dans un endroit de travail:

	Puissance (Si non homologué)		Débit homologué		Homologation
Equipement 1	<input type="text" value="0"/>	HP	<input type="text" value="0"/>	m ³	<input checked="" type="radio"/> CANMET <input type="radio"/> MSHA
Equipement 2	<input type="text" value="0"/>	HP	<input type="text" value="0"/>	m ³	<input checked="" type="radio"/> CANMET <input type="radio"/> MSHA
Equipement 3	<input type="text" value="0"/>	HP	<input type="text" value="0"/>	m ³	<input checked="" type="radio"/> CANMET <input type="radio"/> MSHA
Equipement 4	<input type="text" value="0"/>	HP	<input type="text" value="0"/>	m ³	<input checked="" type="radio"/> CANMET <input type="radio"/> MSHA
Equipement 5	<input type="text" value="0"/>	HP	<input type="text" value="0"/>	m ³	<input checked="" type="radio"/> CANMET <input type="radio"/> MSHA

Exigence d'air frais

m³/s

OK Annuler

Figure 12. Estimation des besoins en air frais par endroit de travail sous terre.

4. Sélection de ventilateurs – Base de données

La nouvelle version de Eolaval contient une base intégrée de données de courbes de ventilateurs afin d'assister l'utilisateur dans la sélection des ventilateurs de la mine. Donc, il est maintenant possible à l'intérieur de Eolaval d'aller sélectionner un ventilateur selon les besoins signalés par les résultats de la simulation. Dans la fonction Ventilateur, on retrouve une base de données de courbes des principaux ventilateurs utilisés dans l'industrie minière au Québec (Alphair et Woods). Il est toutefois possible d'ajouter de nouvelles courbes de ventilateurs selon le cas. Par ailleurs, l'utilisateur a la possibilité d'introduire un ventilateur de renfort dans une branche (*branche de ventilateur de renfort*). Naturellement, l'utilisateur peut choisir le modèle et les courbes du ventilateur de renfort et répéter la simulation afin d'évaluer l'effet de ce ventilateur sur la répartition des débits.

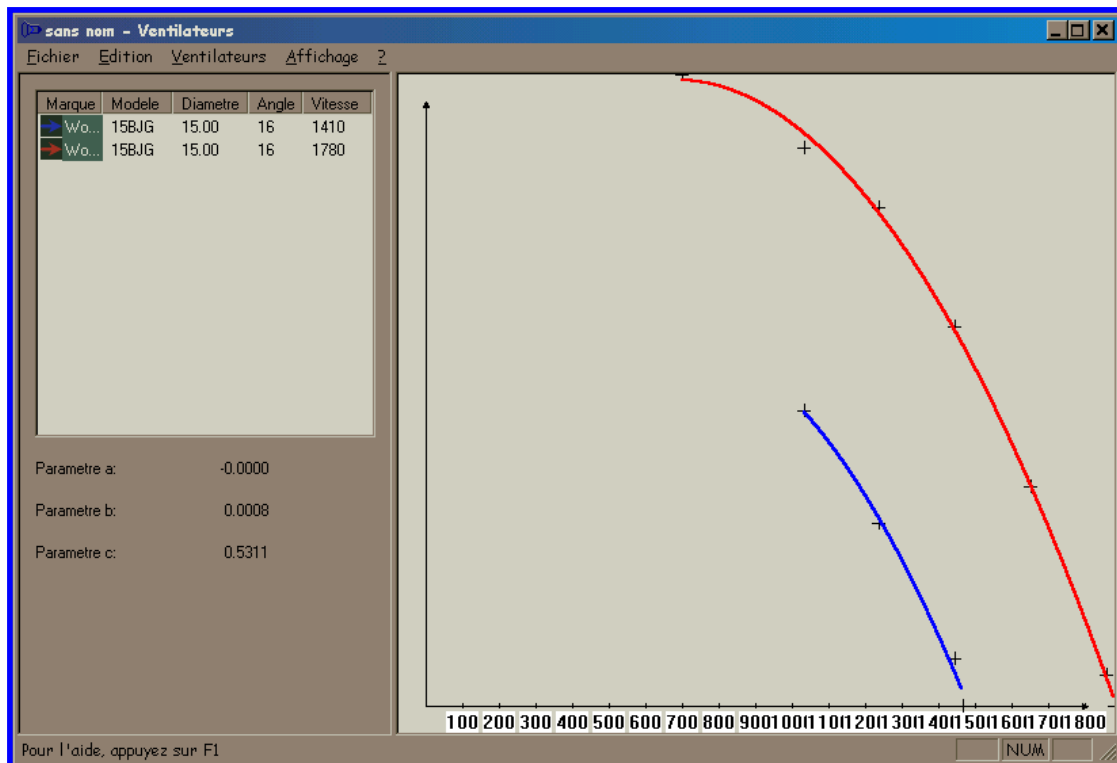


Figure 13. Sélection des courbes de ventilateurs dans Eolaval

5. Auto-balancement des débits

Une des caractéristiques importantes de la nouvelle version de Eolaval est sa capacité de balancer automatiquement les débits dans le réseau chaque fois que l'utilisateur fait des changements à celui-ci (ex. ajouter ou effacer des branches ou des nœuds). Dans l'ancienne version de Eolaval, il fallait balancer manuellement les débits après chaque modification du réseau, une opération très fastidieuse.

6. Approches de simulation

6.1 Simulation conventionnelle

La simulation conventionnelle considère l'air comme un fluide incompressible. La simulation conventionnelle utilise la méthode de résolution par itérations de Hardy-Cross (Annexe A). La simulation conventionnelle est une bonne approximation des conditions d'un réseau de ventilation d'une mine peu profonde (jusqu'à 500m de profondeur). Selon la littérature internationale, au-delà de 500m, la compression adiabatique de l'air minier fait en sorte que l'hypothèse de l'incompressibilité de l'air minier conduit à des erreurs importantes. À ces profondeurs, il faut tenir compte de la variabilité de la densité de l'air minier en utilisant l'approche gravitationnelle ou l'approche thermodynamique. La figure 14 montre un exemple de la fenêtre des résultats de la simulation.

No de Branche	Résistance	Débit	Perte/Branche	H (Ven/Reg)
e1-b1	1.37e-002	6.13e-002	5.13e-005	
e2-b2	1.17e-002	-7.14e+000	5.96e-001	
e3-b3	1.95e-003	-6.37e+000	7.92e-002	
e4-b4	1.95e-003	-2.79e+001	1.52e+000	
m6	3.91e-003	-7.74e+001	2.34e+001	
e2-b1	1.18e-002	2.34e+001	6.45e+000	
e3-b2	1.20e-002	-5.10e+000	3.11e-001	
e4-b3	1.95e-003	-2.79e+001	1.52e+000	
m5	3.91e-003	-7.15e+001	2.00e+001	
e3-b1	3.91e-003	6.33e+000	1.56e-001	
e4-b2	1.19e-002	-2.21e+001	5.80e+000	
e5-b3	3.91e-003	-1.35e+001	7.14e-001	
m4	3.91e-003	-6.77e+001	1.79e+001	
e4-b1	3.91e-003	4.56e+001	8.12e+000	
e5-b2	6.39e-003	5.80e+001	2.15e+001	
m3	3.91e-003	-7.91e+001	2.44e+001	
e5-b1	3.91e-003	-7.29e+001	2.08e+001	
m2	3.91e-003	-1.10e+002	4.70e+001	
m1	3.91e-003	1.10e+002	4.73e+001	
R6	2.58e-003	-5.94e+001	9.09e+000	
m10	3.91e-003	8.91e+001	3.10e+001	
p2	1.95e-002	2.20e+002	9.45e+002	1318.18 Ventilateur
R5	2.42e-003	-5.94e+001	8.54e+000	
p1	3.91e-003	2.20e+002	1.89e+002	
R4	2.55e-003	-7.50e+001	1.44e+001	
R3	2.12e-003	-7.50e+001	1.19e+001	
R2	2.55e-003	-6.23e+001	9.88e+000	
R1	2.21e-003	-6.23e+001	8.58e+000	

Figure 14. Résultats de la simulation

6.2 Simulation gravitationnelle

L'approche gravitationnelle quant à elle considère l'air comme un fluide compressible et utilise donc des bilans de masse dans ses calculs. De cette manière, on prend en considération les propriétés physiques de l'air qui peuvent changer tout au long de son parcours dans la mine. Étant donné que le débit massique (M) correspond à :

$$M = Q \times \rho$$

Ensuite, il est facile de faire des bilans de débit massique autour de chaque nœud. L'algorithme complet de la simulation gravitationnelle peut se trouver à l'annexe B. La caractéristique principale de l'approche gravitationnelle est le besoin de mesurer les températures sèches et humides sur tous les nœuds du réseau. Ceci est possible seulement lors de la planification de ventilation d'une mine en opération. Dans le cas de la planification d'une nouvelle mine, l'approche thermodynamique est plus appropriée car elle peut estimer ces paramètres.

6.3 Simulation thermodynamique

La simulation thermodynamique permet d'estimer les conditions de l'air (températures sèches et humides) aux nœuds du réseau de ventilation à partir de formules thermodynamiques. Le logiciel utilise comme données d'entrée : les caractéristiques physiques des branches, les conditions de l'air aux endroits stratégiques de la mine, le gradient géothermique de la roche, la puissance et l'emplacement des moteurs dans la mine. Cette méthodologie est appropriée lors de la planification d'une nouvelle mine.

La première étape est le calcul des variations de chaleur pour chaque branche selon l'approche de McPherson (1993). Ce calcul de variation nous permet de prédire la température prévue à l'extrémité opposée de la branche. De plus, cette étape nous permet de calculer une densité de l'air moyenne de la branche plus précise que la moyenne des densités de ses deux extrémités. Ensuite, Eolaval utilise l'algorithme de l'approche gravitationnelle pour effectuer la simulation du réseau. Plus précisément, Eolaval tient compte des éléments suivants lors de ses calculs :

- la chaleur transmise par la roche,
- la chaleur transmise par les moteurs,
- l'humidité,
- l'énergie transmise à l'air,
- la variation d'énergie cinétique,
- la variation d'énergie potentielle,
- les pertes par frictions,
- l'enthalpie au bout de l'incrément,
- la température sèche au bout de l'incrément,
- la pression au bout de l'incrément,
- la température humide au bout de l'incrément,
- la condensation de l'eau sur les parois rocheuses.

Les paramètres thermodynamiques que Eolaval utilise pour chaque branche sont :

- La puissance totale de l'équipement électrique (KW),
- la puissance totale de l'équipement diesel dans la branche (KW)

- le taux d'utilisation de cet équipement
- le pourcentage de sa surface mouillée,
- la quantité de vapeur d'eau émise par les moteurs diesel,
- le temps écoulé depuis l'ouverture du chantier (car la roche se refroidit avec le temps)
- la conductivité thermique de la roche,
- le gradient géothermique,
- la densité de la roche,
- la chaleur spécifique de la roche,
- la température de la roche à cette profondeur.

L'algorithme complet de la simulation thermodynamique se trouve à l'annexe B.

7. Conclusions

Ce projet de recherche financé par IRSST a produit une nouvelle version très puissante de Eolaval qui intègre maintenant une interface avec Autocad, une interface graphique pour accompagner la base de données, un algorithme de balancement automatique des débits à travers le réseau, une base de données de courbes de ventilateurs, de nouveaux outils de calcul pour connaître le débit d'air frais nécessaire selon les normes. Par ailleurs, la nouvelle version de Eolaval comprend deux nouvelles options lors de la simulation d'un réseau : la simulation gravitationnelle ainsi que la simulation thermodynamique. Ces deux nouvelles options tiennent compte de la compressibilité de l'air minier. La nouvelle version de Eolaval peut tenir compte de branches avec un ventilateur (ventilateurs de renfort). En bref, le produit final de ce projet de recherche financé par IRSST est un logiciel intégré de ventilation minière qui est capable de répondre aux besoins de toutes les mines modernes du Québec. Eolaval possède actuellement toutes les caractéristiques pratiques nécessaires pour effectuer la planification de la ventilation minière d'une mine moderne.

La version Bêta de ce logiciel a été distribuée en mai 2000 à plusieurs mines souterraines québécoises qui ont suggéré certaines corrections et ajouts. Suite à ces commentaires et suggestions, la version finale de ce logiciel a été terminée en octobre 2000. Ce produit final a été distribué à toutes les mines souterraines québécoises lors d'un colloque organisé par l'Association minière du Québec et l'Université Laval à Val d'Or le 2 février 2001. Le logiciel Eolaval dans sa dernière version (version 18, novembre 2001) a été validé et vérifié avec des réseaux réels des mines souterraines du Québec. Depuis un an il est utilisé fréquemment par plusieurs mines au Québec (entre autres les mines Kiena, SigmaRaglan et Niobec) qui ont aussi vérifié la fiabilité de ses résultats.

Références

1. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Diesel and Gasoline Engine Exhausts and some Nitroarenes, Centre International de Recherche sur le Cancer, Lyon, France, vol. 46, 1989.
2. Carcinogenic Effects of Exposure to Diesel Exhaust, National Institute for Occupational Safety and Health, Current Intelligence Bulletin 50, Department of Health and Human Services, Publication 88-116, 1988.
3. Hartman, H., Mutmansky, Ramani, R. and Jan & Wang Y., Mine Ventilation and Air Conditioning, Second Edition, 1997, Wiley- Interscience, p.725.
4. McPherson, Malcolm, Subsurface Ventilation and Environmental Engineering, First Edition , 1993, Chapman & Hall.
5. Lunder, P.,L., Autovent- Autocad based ventilation modelling software, CAMI'95, 3rd Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry, Montréal, Québec, pp.706-712.
6. Garant Jean, Comparaison des méthodes thermodynamiques et conventionnelles d'analyse de réseaux de ventilation, M.Sc., 1988, dirigé par Kostas Fytas.
7. Fytas, K. & Thibault, P., Eolaval - An integrated Mine Ventilation Design Software, , Proceedings of CAMI'95 - Third Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry, Montreal, Quebec, Octobre 22-25, Université McGill, 1995, pp. 689-698.
8. Fytas, K. & Thibault, A Mine Ventilation Design Software for Underground Mines, Proceedings of the First International Conference of Information Technologies in the Minerals Industry via the Internet, National Technical University of Athens, Greece, December 1-9, 1997, CD-Rom.
9. Eolaval, a mine ventilation planning tool, K. Fytas, S. Perreault & B. Daigle, Proceedings of the 9th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection (MPES), organized by the National Technical University of Athens, Greece, 6-9 November 2000, Balkema Publishers, pp 51-56.

ANNEXE A

La méthode de Hardy-Cross pour un fluide incompressible (simulation conventionnelle)

A.1 Rappel théorique

Tout comme les circuits électriques, la distribution de l'air dans un réseau de ventilation minière se comporte selon ses lois. Cependant, que ce soit en séparation naturelle ou en séparation contrôlée (débit fixe, régulateurs), le réseau de ventilation n'est jamais seulement en série ou seulement en parallèle. Ce sont plutôt des réseaux maillés, tel qu'à la figure A.1. La théorie des réseaux maillés est basée sur les deux lois fondamentales gouvernant le comportement des circuits électriques, développées par le physicien allemand G.R. Kirchhoff. Selon la première loi (loi des nœuds), la somme algébrique des débits dans les branches aboutissant à un nœud est nulle. Bref, tout ce qui passe par un nœud doit en sortir.

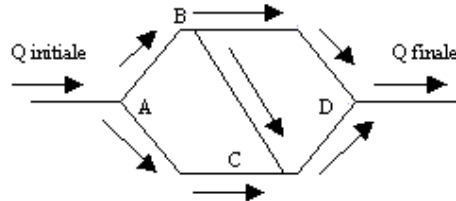


Figure A.1, Réseau maillé.

Selon la seconde loi (loi des mailles), le long d'un contour fermé (une boucle), la somme algébrique des différences de pression (ΔH) entre les extrémités de chacune des branches de la maille est nulle.

En ce qui concerne le calcul de la direction et du débit de l'air dans un réseau maillé, ceux-ci se font à l'aide de la méthode de Hardy Cross. C'est un cas particulier de la méthode de relaxation. En suivant les deux lois de Kirchhoff, on distribue l'air dans le réseau de ventilation pour que le système soit équilibré. De plus, on détermine une procédure de rotation dans les boucles de la maille (ex. direction horaire). Le nombre de boucles nécessaires correspond à l'équation suivante :

$$b - j + 1$$

où

b : représente le nombre de branches dans le réseau

j : représente le nombre de jonctions entre les branches dans le réseau

Ensuite, on doit calculer la résistance de chaque branche selon les paramètres pré-établies.

Selon Hartman (1997), la résistance R d'une galerie ou d'une branche correspond à :

$$R = KPL/A^3$$

Où

K : facteur de friction (kg/m^3) de la conduite ($f_p/8$) où f : coefficient de friction

ρ : densité de l'air (kg/m^3)

P : périmètre de la conduite (m)

L : longueur de la conduite (m)

A : section de la conduite (m^2)

À l'aide de ces valeurs, on détermine les équations des boucles avec les équations suivantes :

$$\sum R|Q|Q \text{ et } 2\sum R|Q|$$

Cependant, étant donné que le réseau de ventilation minière est un réseau maillé avec des séparations contrôlées (régulateurs), des ventilateurs et de la pression de ventilation naturelle, on doit apporter certaines modifications à nos équations. Premièrement, lors des itérations successives, il faut ignorer les branches de la boucle qui ont des débits fixes (régulateurs). En second lieu, les sources d'énergie (ventilateurs, pression de ventilation naturelle) ont une valeur négative si la direction du débit occasionné va avec l'orientation du débit choisie dans la maille et positive si le débit occasionné va contre l'orientation du débit choisie dans la

maille. Les équations seront donc les suivantes :

$$\sum R|Q|Q \pm h_n \pm h_f \text{ et } 2(\sum R|Q| \pm (b + (2 * c * Q)))$$

et on calcule la correction à apporter aux débits des branches de la boucle avec :

$$\Delta = -\sum R|Q|Q \pm h_n \pm h_f / (2\sum R|Q| \pm (b + (2 * c * Q)))$$

où

R : résistance de la conduite (Ns^2/m^8)

Q : débit dans la conduite (m^3/s)

h_n : pression de ventilation naturelle (Pa)

h_f : pression du ventilateur (Pa) où $h_f = a + bQ + cQ^2$

a, b, c : ce sont les paramètres de l'équation caractéristique du ventilateur concerné

Cette correction peut être soit positive, soit négative par rapport à l'orientation choisie dans la maille. Si l'orientation du débit de la branche est dans le même sens que la boucle (horaire), la correction sera alors positive. Sinon, elle sera négative.

Finalement, si on a des débits fixes (régulateurs) dans le réseau, on calcule la perte de charge (H_r) occasionnée par le régulateur à l'aide de la deuxième loi de Kirchhoff. En outre, il est possible de déterminer l'ouverture du régulateur à l'aide de la formule d'approximation suivante :

$$Ar = 1.19/\sqrt{R}$$

Où

Ar : ouverture du régulateur (m^2)

R : résistance artificielle (Ns^2/m^8) où $R = H_r/Q^2$

ANNEXE B

La méthode de Hardy-Cross pour un fluide compressible (simulation gravitationnelle et thermodynamique)

B.1 Relations de base de la thermodynamique

Cette partie n'est qu'un rappel des relations thermodynamiques fondamentales que nous allons utiliser dans ce texte.

B.1.1 Première loi de la thermodynamique

$$\frac{u_1^2 - u_2^2}{2} + (Z_1 - Z_2)g + W_{12} = \int_1^2 v \cdot dP + F_{12} = h_2 - h_1 - q_{12} \quad \text{J/kg} \quad (0-1)$$

Où :

u_1, u_2 sont les vitesses du fluide en 1 et 2	m/s
Z_1, Z_2 sont les élévations en 1 et 2	m
g est la constante gravitationnelle	m/s ²
W_{12} est le travail fait de 1 à 2	J/kg
v est le volume spécifique	m ³ /kg
P est la pression barométrique	Pa
h_1, h_2 sont les enthalpies du fluide en 1 et 2	J/kg
q_{12} est la variation d'énergie thermique de 1 à 2	J/kg

B.1.2 Rappel sur les relations de base de psychrométrie

Cette section est une liste des principales relations psychrométriques utilisées dans le développement des méthodes gravitationnelles et thermodynamiques.

Pression de vapeur à la saturation à la température humide

$$e_{sh} = 610.6 e^{(17.27t_h / (237.3 + t_h))} \quad \text{Pa} \quad (0-2)$$

Où :

e_{sh} est la pression de vapeur à la saturation à la température humide	Pa
t_h est la température humide	°C

Humidité à la saturation

$$X_s = 0.622 (e_{sh} / (P - e_{sh})) \quad \text{kg/kg air sec} \quad (0-3)$$

Où :

X_s est l'humidité à la saturation	kg/kg air sec
--------------------------------------	---------------

Chaleur latente d'évaporation

$$L_h = (2502.5 - 2.386t_h)1000 \quad \text{J/kg} \quad (0-4)$$

Où :

L_h est la chaleur latente d'évaporation	J/kg
--	------

Chaleur sigma

$$S = L_h X_s + 1005 t_h \quad \text{J/kg air sec} \quad (0-5)$$

Où :
S est la chaleur sigma J/kg air sec

Humidité absolue

$$X = (S - 1005t_h) / (L_h + 1884(t_s - t_h)) \quad \text{kg/kg air sec} \quad (0-6)$$

Où :
X est l'humidité absolue kg/kg air sec
 t_s est la température sèche °C

Pression de vapeur actuelle

$$e = PX / (0.622 + X) \quad \text{Pa} \quad (0-7)$$

Où :
 e est la pression de vapeur actuelle Pa

Densité apparente de l'air

$$\rho(\text{apparent}) = (P - e) / (287.04(t_h + 273.15)) \quad \text{kg air sec} / \text{m}^3 \quad (0-8)$$

Où :
 $\rho(\text{apparent})$ est la densité apparente de l'air kg air sec / m³

Densité actuelle de l'air

$$\rho(\text{actuelle}) = (P - 0.378e) / (287.04(t_h + 273.15)) \quad \text{kg air humide} / \text{m}^3 \quad (0-9)$$

Où :
 $\rho(\text{actuelle})$ est la densité actuelle de l'air kg air humide / m³

B.2. Relation de base des flux incompressibles.

L'ingénieur français en hydraulique Chésy-Darcy développa la relation suivante pour trouver la perte de pression dans une conduite en fonction de la vitesse du fluide.

$$p = (fL \text{ per } \rho u^2) / (2gd) \quad \text{Pa} \quad (1-1)$$

Où :
p est la perte de charge Pa
f est le coefficient de friction
L est la longueur de la conduite m
per est le périmètre de la conduite m
 ρ est la densité de l'air kg/m³
u est la vitesse de l'air m/s²
d est le diamètre hydraulique de la conduite m

Atkinson reformula la relation en utilisant certaines simplifications.

$$k = f\rho / 2 \quad (1-2)$$

Où :

k est le facteur de friction de Atkinson kg/m^3

L'équation 1-1 peut donc s'écrire sous la forme :

$$p = (k L \text{ per } u^2) / A \quad \text{Pa} \quad (1-3)$$

ou sous la forme :

$$p = (k L \text{ per } Q^2) / A^3 \quad \text{Pa} \quad (1-4)$$

en utilisant la relation $Q = uA$.

En englobant toutes les variables caractérisant notre branche, dans une seule variable R :

$$R = kL \frac{\text{per}}{A^3} \quad (\text{N s}^2) / \text{m}^8 \quad (1-5)$$

En substituant 1-5 dans 1-4 nous avons la perte de friction exprimée sous une forme toute simple, nommée la loi carrée :

$$p = RQ^2 \quad \text{Pa} \quad (1-6)$$

La simplicité de cette forme en fait certainement l'expression de la pression la plus utilisée dans les mines. En fait, la perte de pression d'un conduit minier dépend de 3 facteurs : la géométrie du conduit, la densité de l'air et le volume d'air passant. On peut donc écrire une version de la loi carrée qui montre chacun de ces facteurs :

$$p = R_t \rho Q^2 \quad \text{Pa} \quad (1-7)$$

Où :

R_t est le facteur turbulent rationnel. On le définit ainsi :

$$R_t = fL \text{ per} / 2 A^3 \quad \text{m}^{-4} \quad (1-8)$$

Selon Macpherson, l'utilisation de R_t et du facteur f est une bien meilleure façon de procéder que d'utiliser R et k qui sont définis en fonction de la densité de l'air. Par contre, comme bien d'autres archaïsmes (tel le système impérial), ils sont ancrés dans les traditions minières et ils sont fortement utilisés dans les mines. C'est pour cette raison, que nous avons continué à les utiliser dans notre logiciel. Comme la plupart du temps le facteur k est mesuré à des conditions d'air standard, la relation entre $k_{1,2}$ et f se calcule très facilement :

$$k_{1,2} = 0.6f \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-9)$$

Relation entre la pression, la densité et le travail fait contre la friction

$$p = \rho F \quad \text{Pa} \quad (1-10)$$

Où :

p est la pression

Pa

ρ est la densité de l'air

F est le travail fait contre la friction

B.3 La simulation gravitationnelle

B.3.1 Révision de la méthode conventionnelle

Lois de Kirchhoff

La première des lois de Kirchhoff s'énonce ainsi :

La somme des masses qui passent par une jonction est égale à la somme des masses qui sortent.

Mathématiquement, elle s'écrit :

$$\Sigma M = 0 \quad \text{kg/s} \quad (2-1)$$

La seconde loi de Kirchhoff concerne les variations de pression.

La somme algébrique de toutes les pertes de pression autour d'une maille fermée dans un réseau égale 0.

Sous forme mathématique on a :

$$\Sigma(p - p_f) - PVN = 0 \quad \text{Pa} \quad (2-2)$$

Où :

p est la chute de pression dans une branche

Pa

p_f est la pression fournie par un ventilateur

Pa

PVN est la pression de ventilation naturelle pour cette branche. Pa

B.3.2 Déviation de la loi carrée

Selon McPherson, la loi carrée, tiré de l'équation de Chésy-Darcy n'est pas valide dans certaines conditions. En effet, les équations 1-6 et 1-7 s'appliquent seulement pour des conditions de pleine turbulence. Lorsque le régime tombe en phase transitoire ou laminaire, le facteur de friction f_n n'est plus constant et devient une fonction du nombre de Reynolds.

Il est possible d'utiliser une autre forme de l'expression de la perte de pression dans une conduite, qui tient compte du changement de régime :

$$p = RQ^n \quad \text{Pa} \quad (2-3)$$

$$p = R_t \rho Q^n \quad \text{Pa} \quad (2-4)$$

Où :

n est une valeur entre 1.8 et 2.05

La valeur de n peut être évaluée à 2 pour les conduites situées sur le réseau principal de la mine. Par contre, pour les conduites en dehors de ce réseau cette valeur a tendance à diminuer.

B.3.3 Méthode de Hardy-Cross pour un fluide incompressible

Il est possible de résoudre un réseau simple par des méthodes analytiques. Par contre, ceci peut devenir rapidement complexe. Un réseau de m mailles crée un système de m équations d'ordre m-1. On voit vite qu'il devient impossible de résoudre un réseau le moins complexe. En 1936, Hardy Cross développa une méthode itérative pour résoudre les réseaux de ventilation plus compliqués.

B.3.4 Méthode de Hardy-Cross pour un fluide compressible

Il est possible d'adapter la méthode itérative de Hardy-Cross pour un fluide incompressible (Annexe A) afin de traiter l'écoulement d'un fluide compressible. Pour ce faire, nous allons utiliser les flux de masses et non les flux de volume.

La relation entre le débit massique et le débit volumique s'écrit :

$$M = \rho Q \quad \text{kg} \quad (2-5)$$

Où :

M est le débit massique

Nous devons reformuler la relation rationnelle de la chute de pression en fonction du débit massique.

$$\begin{aligned} p &= R_t \rho (M / \rho)^n & \text{Pa} \\ p &= R_t \rho^{1-n} M^n & \text{Pa} \end{aligned} \quad (2-6)$$

Si M est la valeur du débit massique recherché,
M_a est l'approximation de ce flux massique et
ΔM la différence entre M et M_a, nous pouvons écrire :

$$M = M_a + \Delta M \quad \text{kg} \quad (2-7)$$

En substituant 2-6 dans 2-7, nous obtenons :

$$p = R_t \rho^{1-n} (M_a + \Delta M)^n \quad \text{Pa} \quad (2-8)$$

Nous utilisons la loi de la série du binôme pour développer l'équation 2-9, nous obtenons :

$$p = R_t \rho^{1-n} M_a^n (1 + \Delta M / M_a)^n \quad \text{Pa} \quad (2-9)$$

En développant :

$$p = R_t \rho^{1-n} M_a^n (1 + n \Delta M / M_a + n(n-1) (n \Delta M / M_a)^2 + \dots)$$

Si on néglige les termes d'un ordre de plus de 2, l'équation devient :

$$p = R_t \rho^{1-n} M_a^n (1 + n \Delta M / M_a) \quad \text{Pa} \quad (2-10)$$

alors :

$$\Delta p = p - p_a = R_t \rho^{1-n} M_a^n n \Delta M / M_a \quad \text{Pa} \quad (2-11)$$

et

$$\Delta M = \Delta p / (R_t \rho^{1-n} M_a^{n-1} n) \quad \text{Kg} \quad (2-12)$$

Δp peut être aussi développé comme :

$$\Delta p = p - p_a = R_t \rho^{1-n} M^n - R_t \rho^{1-n} M_a^n \quad \text{Pa} \quad (2-13)$$

En substituant 2-13 dans 2-12

$$\Delta M = (R_t \rho^{1-n} M^n - R_t \rho^{1-n} M_a^n) / (R_t \rho^{1-n} M_a^{n-1} n) \quad \text{Kg} \quad (2-14)$$

Ceci s'applique pour une seule branche. On peut généraliser à une série de branches qui forment une maille fermée. D'après la deuxième loi de Kirchhoff, la somme des pertes de charge doit donner 0.

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta p &= \Sigma (R_t \rho^{1-n} M^n - R_t \rho^{1-n} M_a^n) \quad \text{Pa} \\ \Sigma \Delta p &= \Sigma R_t \rho^{1-n} M^n - \Sigma R_t \rho^{1-n} M_a^n \quad \text{Pa} \end{aligned} \quad (2-15)$$

$$\Delta M_m = (\Sigma R_t \rho^{1-n} M^n - \Sigma R_t \rho^{1-n} M_a^n) / \Sigma n R_t \rho^{1-n} M_a^{n-1} \quad \text{kg} \quad (2-16)$$

On peut réduire l'équation à :

$$\Delta M_m = - \Sigma R_t \rho^{1-n} M_a^n / \Sigma n R_t \rho^{1-n} M_a^{n-1} \quad \text{kg} \quad (2-17)$$

puisque selon la deuxième loi de Kirchhoff, le terme $\Sigma R_t \rho^{1-n} M^n$ doit nous donner 0.

Il faut tenir compte des pressions qui permettent de pousser l'air à travers la maille. C'est pour cela que nous soustrayons la pression fournie par un ventilateur (p_f) et la pression de ventilation naturelle (PVN) :

$$\Delta M_m = -\Sigma(R_t \rho^{1-n} M_a |M_a^{n-1}| - p_f - PVN) / \Sigma n R_t \rho^{1-n} |M_a^{n-1}| \quad \text{kg} \quad (2-18)$$

Cette expression s'écrit aussi par rapport au débit volumique. Nous savons que $M = \rho Q$, donc :

$$\Delta M_m = -\Sigma(R_t \rho Q_a |Q_a^{n-1}| - p_f - PVN) / \Sigma n R_t |Q_a^{n-1}| \quad \text{kg} \quad (2-19)$$

La densité ρ se calcule en utilisant la moyenne de la densité de l'air aux nœuds situés aux extrémités de la branche. La densité de l'air à un nœud est calculée en utilisant les équations de psychrométrie de la section 0. On se sert de la densité apparente de l'air, on ne tient pas compte de l'humidité dans l'air. En effet, il existe certains phénomènes qui peuvent ajouter de l'eau à l'air dans une branche et la masse d'air humide entrant dans une branche peut être différente de celle qui en sort.

Avant d'utiliser la méthode itérative, nous devons faire balancer le système selon le débit massique. Pour ce faire, nous modifions les débits volumiques pour que la première loi de Kirchhoff soit respectée.

On utilise la même méthode que pour la simulation conventionnelle pour faire converger le système. Le débit volumique Q de la branche est modifié par :

$$\Delta Q = \frac{\Delta M}{\rho}$$

Généralement, après une simulation gravitationnelle l'expression $\Sigma Q = 0$ pour un nœud n'est plus vraie. La densité dans chaque branche étant différente, il n'y a plus de correspondance entre $\Sigma Q = 0$ et $\Sigma M = 0$.

B.4 La simulation thermodynamique

B.4.1 Théorie de base de la simulation

La simulation thermodynamique permet de prévoir les conditions de l'air aux nœuds du réseau de ventilation. Contrairement à la simulation gravitationnelle, ce type de simulation ne nécessite pas d'entrants pour chaque nœud, parce que ceux-ci peuvent être calculés. Nous utilisons comme entrants : les caractéristiques physiques des branches, la condition de l'air aux endroits stratégiques de la mine, les qualités géothermiques de la roche, la puissance et l'emplacement des moteurs dans la mine.

La première étape est le calcul des variations de chaleur pour une branche. Ce calcul de variation nous permet de prédire la température prévue à l'extrémité opposée de la branche. De plus, cette étape nous permet de calculer une densité de l'air moyenne de la branche plus précise que la moyenne de la densité au nœud de départ et de fin.

Nous utilisons l'algorithme de l'approche gravitationnelle pour faire la simulation du réseau.

B.4.2 Équation de l'énergie pour une conduite minière

La première loi de la thermodynamique s'écrit

$$-\int dKE - \int dPE + W_f = \int v \cdot dP + F_{12} = h_2 - h_1 - q_{12} \quad (3-9)$$

Où :

dKE est la variation de l'énergie cinétique	J/kg air sec
dPE est la variation de l'énergie potentielle	J/kg air sec
W_f est le travail fait par le ventilateur	J/kg air sec
P est la pression barométrique	Pa
v est le volume spécifique	m ³ /kg
F_{12} est la variation de l'énergie mécanique transformée en chaleur par la friction	J/kg air sec
q_{12} est la variation de la chaleur dans la conduite	J/kg air sec
h_1, h_2 sont les valeurs d'enthalpie au début et à la fin de la conduite	J/kg air sec

Cette équation est très importante. Il est nécessaire de trouver la valeur de tous les termes pour pouvoir calculer les conditions thermodynamiques aux extrémités de la branche.

B.4.3 Algorithmes de la simulation

Programme principal

Validation des données
Résoudre le réseau
Affichage des résultats

Résoudre le réseau

Initialisation
Simulation gravitationnelle
Tant que l'erreur maximale > erreur souhaitée :
 Calculer la chaleur des branches
 Simulation gravitationnelle

Calculer la chaleur des branches

Pour chaque branche
 Calculer la chaleur de la branche

Calculer la chaleur de chaque branche

Initialiser le premier incrément aux valeurs du nœud de début
Itérer tant que ce n'est pas la fin de la conduite

- Calcul de la chaleur transmise par la roche
- Calcul de la chaleur transmise par les moteurs
- Calcul de l'humidité absolue
- Calcul de l'énergie transmise à l'air par le ventilateur
- Calcul de la variation d'énergie cinétique

- Calcul de la variation d'énergie potentielle
 - Calcul des pertes par frictions
 - Calcul de l'enthalpie au bout de l'incrément
 - Calcul de la température sèche au bout de l'incrément
 - Calcul de la pression au bout de l'incrément
 - Calcul de la température humide au bout de l'incrément
 - Ajustement pour la condensation
 - Valeurs de fin d'incrément deviennent les valeurs du début du prochain incrément
- Utiliser les valeurs du dernier incrément comme valeur de fin de branche.
- Calcul de la densité moyenne de la branche
 - Calcul de l'humidité moyenne de la branche
 - Calcul de la pression de ventilation naturelle

B.4.3.1 Calcul de la chaleur transmise par la roche

Cette méthode est tirée directement du chapitre 15 du livre de McPherson (1993).

La chaleur transmise par la roche dépend de plusieurs facteurs. Il faut trouver les valeurs des paramètres suivants :

• Périmètre de la conduite	per	m
• Coefficient de friction ($k/0.6$)	f	
• Âge de la galerie	t	s
• Débit volumique	Q	m^3/s
• Température sèche moyenne	t_s	$^{\circ}C$
• Température humide moyenne	t_h	$^{\circ}C$
• Pression barométrique	P	Pa
• Conductivité thermique de la roche	k_r	$W/(m^{\circ}C)$
• Densité de la roche	ρ_r	kg/m^3
• Chaleur spécifique	C_r	$J/(kg^{\circ}C)$
• Température de la roche vierge	TRV	$^{\circ}C$
• Fraction humide	w	
• Longueur de l'incrément	Y	m

Il existe 2 méthodes différentes pour calculer le flux de chaleur provenant de la paroi rocheuse, dépendamment si la paroi est humide ou non.

B.4.3.2 Calcul du flux de chaleur d'une paroi sèche

À partir des paramètres de base, on peut facilement calculer les paramètres dérivés :

Diffusion de la roche

$$\alpha_r = k_r / \rho_r C_r \quad m^2/s \quad (3-1)$$

Où :

α_r est la diffusion de la roche m^2/s

Diamètre hydraulique de la galerie

$$d_h = 4A / per \quad \text{m} \quad (3-2)$$

Où :

d_h est le diamètre hydraulique m

Rayon effectif

$$r_a = per / 2\pi \quad \text{m} \quad (3-3)$$

Où :

r_a est le rayon effectif m

On peut utiliser l'approximation suivante pour calculer le nombre de Reynolds

$$Re = 268000 \frac{Q}{per} \quad (3-4)$$

Où :

Re est le nombre de Reynolds

Pour la distance moyenne du chemin radiation L, nous prenons une distance qui équivaut à 3 fois la grandeur de r_h .

Nombre de Nusselt

$$N_u = \frac{0.35 f Re}{1 + 1.592(15.217 f Re^{0.2} - 1) / Re^{0.125}} \quad (3-5)$$

Où :

N_u est le nombre de Nusselt

Le coefficient de transfert de chaleur h contient 2 termes. Le premier terme traite de la chaleur convective :

$$h_c = 0.026 \frac{N_u}{d_h} \quad \text{W/(m}^2\text{°C)} \quad (3-6)$$

Où :

h_c est le coefficient de transfert de chaleur convective W/(m²°C)

Le second terme est le coefficient de transfert de chaleur radiative effectif $a_b h_r$:

$$h_r = 22.68 * 10^{-8} (273.15 + t_h)^3 \quad \text{W/(m}^2\text{°C)} \quad (3-7)$$

$$a_b = 0.104 \ln(147XL) \quad (3-8)$$

Où:

h_r est coefficient de transfert de chaleur radiative $W/(m^2°C)$

a_b est la fraction d'absorption

X est l'humidité de l'air calculée selon l'équation 3-5

Le coefficient de transfert de chaleur se calcule ainsi :

$$h = h_c + a_b h_r \quad W/(m^2°C) \quad (3-9)$$

Nombre de Biot

$$B = \frac{hr_a}{k_r} \quad (3-10)$$

Où :

B est le nombre de Biot

Nombre de Fourier

$$F_0 = \frac{\alpha_r t}{r_a^2} \quad (3-11)$$

Où :

F est le nombre de Fourier

On peut calculer le gradient de température de la roche G en utilisant l'algorithme de Gibson

Finalement, le flux de chaleur sensible se calcule selon l'équation :

$$q_{\text{sen},s} = h \frac{G}{B} (VRT - t_s) \quad W/m^2 \quad (3-12)$$

Où :

$q_{\text{sen},s}$ est le flux de chaleur sensible pour une surface sèche. W/m^2

B.4.3.3 Calcul du flux de chaleur d'une paroi humide

On utilise les mêmes éléments que pour le calcul du flux de chaleur de la paroi sèche.

Par contre, nous pouvons négliger la chaleur radiative. Le coefficient de transfert de la chaleur h se simplifie donc à l'expression :

$$h = h_c$$

Lorsque la paroi est humide, la chaleur est échangée sous deux formes : latentes et sensibles.

Nous avons donc :

$$q = q_{\text{sen},h} + q_{\text{lat},h} \quad \text{W/m}^2 \quad (3-13)$$

Où :

q est le flux de chaleur provenant de la masse rocheuse

$q_{\text{sen},h}$ est le transfert de chaleur sensible

$q_{\text{lat},h}$ est le transfert de chaleur latente

Pour évaluer $q_{\text{sen},h}$ et $q_{\text{lat},h}$, nous avons besoin de la température de la surface mouillée t_{sh} .

Pour ce faire, nous pouvons utiliser les relations suivantes d'une façon itérative, en faisant varier la valeur de t_{sh} .

$$q_{\text{sen},h} = h(t_{sh} - t_s) \quad \text{W/m}^2 \quad (3-14)$$

$$q_{\text{lat},h} = 0.0007hL_{sh} \frac{e_{sh} - e}{P} (VRT - t_s) \quad \text{W/m}^2 \quad (3-15)$$

$$q = h \frac{G}{B - G} (VRT - t_{sh}) \quad \text{W/m}^2 \quad (3-16)$$

$$E = q - (q_{\text{sen},h} + q_{\text{lat},h}) \quad \text{W/m}^2 \quad (3-17)$$

Pour permettre la convergence, nous utilisons :

$$t_{sh} = t_{sh} + 0.01E$$

B.4.3.4 Calcul de l'échange total de chaleur entre l'air et la roche.

Il est facile de voir que la surface totale de l'incrément qui est humide se calcule par l'équation suivante :

$$A_h = 2\pi r_a Y w \quad \text{m}^2 \quad (3-18)$$

Où :

A_h est l'aire totale humide

La surface sèche se définit par

$$A_s = 2\pi r_a Y (1 - w) \quad \text{m}^2 \quad (3-19)$$

Où :

A_s est l'aire totale sèche

À partir des méthodes vues dans les sections précédentes, nous sommes en mesure de calculer $q_{\text{sen},h}$, $q_{\text{lat},h}$ et $q_{\text{sen},s}$.

Ainsi, on peut calculer les puissances dégagées par chacun des types de transfert de chaleur sur les surfaces sèches et humides.

$$\text{Surface sèche} \quad \Omega_{\text{sen},s} = A_s q_{\text{sen},s} = 2\pi r_a Y(1-w)q_{\text{sen},s} \quad \text{W} \quad (3-20)$$

$$\text{Surface humide} \quad \Omega_{\text{sen},h} = A_h q_{\text{sen},h} = 2\pi r_a Ywq_{\text{sen},h} \quad \text{W} \quad (3-21)$$

$$\text{Surface humide} \quad \Omega_{\text{lat},h} = A_h q_{\text{lat},h} = 2\pi r_a Ywq_{\text{lat},h} \quad \text{W} \quad (3-22)$$

Où :

$\Omega_{\text{sen},s}$ est la chaleur sensible totale dégagée par la portion de paroi sèche

$\Omega_{\text{sen},h}$ est la chaleur sensible totale dégagée par la portion de paroi humide

$\Omega_{\text{lat},h}$ est la chaleur latente totale dégagée par la portion de paroi humide

B.4.3.5 Algorithme de Gibson

Cet algorithme est utilisé pour le calcul du gradient de température

$$x = \log_{10}(F)$$

$$y = \log_{10}(B)$$

$$c = x(0.000104x + 0.000997) - 0.001419$$

$$c = -\{x[x(xc - 0.046223) + 0.315553] + 0.006003\}$$

$$d = y - [x(4x - 34) - 5]/120$$

$$d = 0.949 + 0.1e^{-2.69035d^2}$$

$$m = \left\{ (y - c)^2 + \frac{216 + 5x}{70} \left[0.0725 + 0.01 \tan^{-1} \left(\frac{x}{0.7048} \right) \right] \right\}^{1/2}$$

$$n = \frac{(y + c - m)}{2}$$

$$G = \frac{10^n}{d}$$

B.4.3.6 Calcul de la chaleur transmise par les équipements mécaniques

On peut diviser l'équipement mécanique en deux catégories : électrique et diesel

Moteurs électriques

La chaleur produite par un moteur électrique se calcule :

$$\Omega_{m, \text{sen}, e} = \text{Puis} * FUM \quad \text{l/s} \quad (3-23)$$

Où :

$\Omega_{m, \text{sen}, e}$ est la chaleur produite

Puis est la puissance fournie par le moteur kW

FUM est le facteur d'utilisation de la machine

Moteurs diesels

Les moteurs diesels produisent de la chaleur sensible et latente. Pour calculer la chaleur totale produite, on doit trouver dans un premier temps la consommation d'essence de la machine. Cela se fait en multipliant la puissance effective par un taux de consommation par unité de puissance. Ce taux est autour de 0.3 l/kW.h.

$$CE = \text{Puis} * FUM * \frac{0.3}{3600} \quad \text{l/s} \quad (3-24)$$

Où :

CE est la consommation d'essence l/s

La chaleur produite est trouvée en multipliant la consommation par la valeur calorifique du carburant (qui est typiquement de 34000 kJ/l).

$$\Omega_{m, d} = CE * 34000 * 10^3 \quad \text{W} \quad (3-25)$$

Où :

$\Omega_{m, e}$ est la chaleur totale produite par le moteur W

Pour calculer la quantité de vapeur d'eau produite et ainsi calculer la chaleur latente, il faut utiliser le Ratio Eau-Carburant, qui est la quantité d'eau produite pour chaque litre de carburant brûlé.

$$\Omega_{m, \text{lat}, d} = FC * REC * L \quad \text{W} \quad (3-26)$$

Où :

$\Omega_{m, \text{lat}, d}$ est la chaleur latente totale générée par le moteur diesel W

REC est le ratio Eau-Carburant dans les gaz d'échappement du moteur diesel (1 eau/ 1 carburant)

L est la chaleur latente d'évaporation, calculé selon l'équation 3-3.

Enfin pour trouver la chaleur sensible totale, nous n'avons qu'à soustraire la chaleur latente totale à la chaleur totale.

$$\Omega_{m, \text{sen}, d} = \Omega_{m, d} - \Omega_{m, \text{lat}, d} \quad \text{W} \quad (3-27)$$

Où :

$\Omega_{m, \text{sen}, d}$ est la chaleur sensible totale produite par le moteur diesel W

B.4.3.7 Calcul de la variation d'énergie potentielle

Le terme de l'énergie potentielle peut se calculer facilement en utilisant les valeurs d'élévations des extrémités.

$$\Delta PE = (1 + \bar{\chi})g(Z_1 - Z_2) \quad \text{J/kg} \quad (3-28)$$

Où :

ΔPE est la variation d'énergie potentielle pour l'incrément J/kg

$\bar{\chi}$ est l'humidité absolue dans l'incrément

g est la constante gravitationnelle m/s²

Z_1, Z_2 sont les élévations pour les extrémités de l'incrément m

B.4.3.8 Calcul de la variation d'énergie cinétique

Le terme de variation d'énergie potentiel est souvent faible. Par contre, il se calcule facilement par la relation :

$$\Delta KE = \frac{(1 + \bar{\chi})M^2}{2A^2} \left[\frac{1}{\rho_1^2} - \frac{1}{\rho_2^2} \right] \quad \text{J/kg} \quad (3-29)$$

Où :

ΔKE est la variation d'énergie cinétique pour l'incrément J/kg

M est le débit massique d'air sec kg/s

A est l'aire de la section de la galerie m²

ρ_1, ρ_2 sont les densités apparentes aux extrémités de l'incrément kg/m³

À ce point-ci, ρ_2 n'est pas encore connu car il nécessite la connaissance des données psychrométriques. Puisque la variation de l'énergie cinétique est très faible, nous pouvons utiliser la différence de densité de l'incrément précédent. Ainsi :

$$\rho_2 = \rho_1 + \Delta \rho_{\text{prec}} \quad \text{kg/m}^3$$

B.4.3.9 Calcul du travail fourni par le ventilateur

La relation entre le travail développé par le ventilateur et la pression s'écrit :

$$W = \frac{P_f}{\rho} \quad \text{J/Kg} \quad (3-30)$$

Où :

W_f est le travail fait par le ventilateur J/Kg
 P_f est la pression fournie par le ventilateur Pa
 ρ est la densité moyenne de l'air sec kg/m³

La pression de ventilateur se définit :

$$P_f = cQ^2 + bQ + c \quad \text{Pa} \quad (3-31)$$

Où :

a,b,c sont des paramètres qui définissent la courbe du ventilateur à une densité de l'air donné.

Si notre air a une densité différente, la valeur de la pression n'est plus valable. Par contre, nous pouvons utiliser les lois des ventilateurs pour trouver la vraie valeur de pression à la densité donnée. Nous savons que :

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (3-32)$$

En combinant les équations 3-30, 3-31 et 3-32 on peut trouver une équation pour trouver W en tenant compte de la densité de l'air.

$$W = \frac{1}{\rho_{stand}} [cQ^2 + bQ + c]$$

B.4.4 Calcul des pertes par friction

D'après la relation 1-10, nous savons que le travail est la perte de charge pour l'incrément, divisée par la densité. La perte de charge dans l'incrément nous est donnée par la loi de Darcy-Weisbach.

Nous avons donc :

$$\Delta F = \frac{(1 + \bar{\chi})f\Delta L \cdot per \left(\frac{M}{\bar{\rho}}\right)^2}{8A^3} \quad \text{J/kg} \quad (3-33)$$

Où :

ΔF est la perte d'énergie dans l'incrément J/kg
 f est le facteur de friction
 ΔL est la longueur de l'incrément m
 per est le périmètre de la section de la galerie m
 $\bar{\rho}$ est la densité moyenne dans l'incrément kg/m³

Calcul de la température sèche

$$\Delta t_s = t_{s2} - t_{s1} = \left[\Delta KE + \Delta PE + \sum \frac{q_{\text{sen}}}{M} \right] \frac{1}{C_{pa}} \quad ^\circ\text{C} \quad (3-34)$$

Où :

C_{pa} est la chaleur spécifique pour l'air sec (1005 J/(kg°C))

Calcul de la pression barométrique

$$P_2 = P_1 e^{\frac{W_f - \Delta F - \Delta KE - \Delta PE}{R_m(t_{s2} - t_{s1})} \ln \left(\frac{t_{s2} + 273.15}{t_{s1} + 273.15} \right)} \quad \text{Pa} \quad (3-35)$$

Où :

P_2 = Pression barométrique à la sortie de l'incrément Pa

P_1 = Pression barométrique à l'entrée de l'incrément Pa

Calcul de la température humide

Pour trouver la température humide, nous devons utiliser une méthode numérique. Nous utilisons les équations 3-1, 3-2, 3-3, 3-4 et 3-5. La seule variable inconnue et indépendante est t_{h2} .

ANNEXE C

Sommaire de la méthodologie de travail avec Eolaval

Comment utiliser Eolaval?

Introduction

Bienvenue dans le tutoriel d'Eolaval. Ce présent document vous enseigne l'utilisation du logiciel pour parvenir à faire des simulations informatisées d'un réseau de ventilation. Comme vous le verrez, cette nouvelle version d'Eolaval est plus conviviale et l'apprentissage se fait assez rapidement. Les nouveaux outils mis à la disposition dans celle-ci rendent l'édition d'un réseau de ventilation minier beaucoup moins fastidieux. L'apprentissage se divise en 4 étapes plus particulièrement et dans chaque étape des liens sont fait dans la rubrique d'aide pour compléter les explications. Ces étapes se divisent comme ceci:

1^{ère} étape : Schéma sur Autocad

2^{me} étape : Importation d'un fichier Autocad dans Eolaval et importation d'une ancienne base de données de la version antérieure de Eolaval

3^{me} étape : Construction de la base de données et édition des nœuds et des branches dans la nouvelle version Eolaval.

4^{me} étape : Simulation conventionnelle et gravitationnelle.

1^{re} étape Schéma sur Autocad

Tout d'abord, étant donné que plusieurs mines utilisent déjà le logiciel de dessin Autocad, il est suggéré de créer le schéma du réseau de ventilation à partir de celui-ci. Eolaval est un logiciel de simulation et non un logiciel de dessin. Donc, la conception du schéma se fera plus aisément et rapidement de cette manière.

En premier lieu, le dessin du réseau de ventilation est une représentation schématique de l'écoulement de l'air. Les galeries, les monteries, le ou les puits doivent être représentés par une simple ligne. Il est suggéré, si la mine est dessinée sur pro-mine, de relier les stations d'arpentage pour construire le schéma.

En second lieu, lorsque le schéma est terminé, il faut sélectionner "Exporter" dans le menu fichier d'Autocad. Une boîte de dialogue demande quel fichier est à Exporter et sous quel format (type). Il faut sélectionner le format dxf (il s'agit d'un format de fichier graphique utilisé pour passer d'un logiciel à l'autre. De cette manière, Eolaval est capable de lire le dessin en provenance d'Autocad.

2^e étape Importer un fichier DXF

Lorsque le dessin sur Autocad est terminé et qu'il est enregistré sous format .dxf, on ouvre Eolaval, on se dirige dans le menu fichier et on sélectionne Importer DXF. De cette manière, le schéma graphique se trouve maintenant dans Eolaval. Il ne reste plus qu'à construire la base de données.

Si vous avez une vieille base de données d'une ancienne version Eolaval, il est possible de l'importer aussi. De la même manière, on se dirige dans le menu fichier, mais on sélectionne Importer. L'ancienne base de données s'affichera dans le menu base de données de Eolaval. Pour associer les éléments de la base de données au graphique, on utilisera le bouton "Associer" dans le dialogue d'édition de branches ou de noeuds.

3^e étape Construction de la base de données

Construction de la base de données et édition des noeuds et des branches dans Eolaval. Lorsque le schéma est importé dans Eolaval, on peut commencer à éditer nos branches. À l'aide de l'icône sélectionner dans la barre d'outils, pointez une branche ou un noeud et cliquez sur le bouton de droite pour afficher le menu contextuel. Dans celui-ci, sélectionnez Éditer objet. Une fois tous les paramètres entrés, recommencez le même processus pour l'ensemble des branches du réseau de ventilation.

Important : Tous les noeuds qui se situent à la surface doivent obligatoirement s'appeler SURFACE. N.B. Le réseau de ventilation doit être une boucle fermée. Donc, il faut faire attention de ne pas éditer des culs de sac, tels une galerie de développement ou encore un chantier. Sinon, le réseau risque de ne pas balancer. De plus, les branches qui partent ou arrivent à la surface ne sont pas des culs de sac.

4^e étape Simulation

Une fois que l'ensemble des branches et des noeuds du réseau est édité, on peut enfin simuler la ventilation. Il faut tout d'abord balancer le réseau. Cependant, pour le balancement du réseau il faut obligatoirement fixer un débit sur une branche. Il est suggéré de fixer le débit d'entrée du réseau si on est en présence d'un système de ventilateurs soufflants ou de fixer le débit de sortie si on est en présence d'un système de ventilateurs aspirants. Pour fixer le débit d'une branche, on peut aller directement dans la base de données des branches et dans la colonne "Débit fixe", on inscrit "Oui" à l'endroit approprié.

Dans la colonne bilan de la base de données des noeuds, le bilan doit être égal à 0 pour tous les noeuds suite au balancement. Si cette condition est atteinte, on peut simuler le réseau selon une simulation conventionnelle ou selon une simulation gravitationnelle.

Suite à la première simulation, il est possible de faire tous les changements que l'on désire, comme fixer le débit de d'autres branches. Toutefois, il est suggéré de fixer le débit des branches un à la fois pour voir comment varie l'écoulement de l'air dans le réseau.

Simulation conventionnelle

Effectue une simulation conventionnelle pour connaître le comportement de l'air dans le réseau. Le débit d'air est distribué dans le réseau selon la résistance de chaque branche (galeries). On assume que l'air est incompressible. Il est impossible de faire une simulation si le réseau n'est pas balancé.

Simulation gravitationnelle

Effectue une simulation gravitationnelle. Comparativement à la simulation conventionnelle qui consiste en un bilan volumique, la simulation gravitationnelle utilise un bilan massique. La densité de l'air varie selon la température, le taux d'humidité, la pression et la profondeur. Il est impossible de faire une simulation si le réseau n'est pas balancé.

ANNEXE D

EOLAVAL, A Mine Ventilation Planning Tool

By
Kostas Fytas, Sebastien Perreault and Bernard Daigle

(un article publié sur Eolaval)¹

¹ Eolaval, a mine ventilation planning tool, K. Fytas, S. Perreault & B. Daigle, Proceedings of the 9th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection (MPES), organized by the National Technical University of Athens, Greece, 6-9 November 2000, Balkema Publishers, pp 51-56.

Kostas Fytas, Sebastien Perreault and Bernard Daigle
Department of Mining and Metallurgy, Laval University, Quebec City, Canada

EOLAVAL, A Mine Ventilation Planning Tool

ABSTRACT: This paper presents the new version of EOLAVAL, an interactive mine ventilation design software. In its new expanded version it is a user friendly and fully interactive computer package. The features of the new version are a graphics interface, compatible with AutoCAD files, an integrated database of fan characteristics and the optional use of the thermodynamic approach in carrying out network simulations. This software can be used in underground mine ventilation planning: mine ventilation network analysis and simulation, economic design of airways, auxiliary ventilation design, calculation of a mine air heating plant, and evaluation of the natural ventilation and pressure losses in a mine shaft. This paper presents a case study illustrating the use of the computer package in mine ventilation design.

Introduction

Mine ventilation planning is an important part of the overall mine planning process. Computer simulation of ventilation networks has been one of the earliest applications of computer technology into mine planning. Since then computer assisted ventilation planning has become a routine practice in all underground mines used mainly in evaluating various alternatives in mine ventilation (Hartman, 1997 and Fytas et al, 1997).

Eolaval, since its initial conception fifteen years ago, has been a very useful ventilation planning tool in Quebec mines. Its initial DOS version has been in use by the Quebec underground mines since 1988 (Fytas et al, 1995). The Windows version of Eolaval (written in 1996) was coded using Basic and Visual Basic. That was satisfying at that time, since no heavy graphical manipulation had to be accomplished. This new version of Eolaval has been completely re-coded using C++ and an object-oriented approach since we wanted to gain speed in both graphical display and simulation.

Programming

The Microsoft Foundation Class Library (MFC) was used to create the main frame of Eolaval. Microsoft distributes this library and it is the core of Windows. It makes available a range of tools that enable the user to create a program that looks like a standard Windows application. It is hoped that this feature will make end users more comfortable with Eolaval and will decrease the learning time.

Graphics interface

The graphics interface is powered by OpenGL. This is an environment for developing 2D and 3D graphic applications. Developed by Silicon Graphics, it is widely used in most CAD packages. It is a very powerful tool and it is supported by most of the video board developers.

The graphics interface was programmed using ClassGL. It is an OpenGL wrapper class developed by Solid Graphics. This wrapper makes the use of OpenGL with MFC easier. It eliminates a large part of the overhead necessary to use the OpenGL library with MFC.

Spreadsheet

In order to display the branches and nodes parameters a spreadsheet was used that has been developed by Christ Maunder and it is distributed freely on the Internet. It has been programmed using MFC.

Simulation

The purpose of the simulation of a mine ventilation network is to analyse mine air quantity. It is carried out in order to perform the following tasks (Hartman, 1997): evaluation of alternative ventilation paths, evaluation of alternative shapes and sizes of ventilation raises and shafts, selection of appropriate type and location of mine fans, selection of appropriate fan and duct types for auxiliary ventilation

The first step of every simulation of a ventilation network is the creation of the 3D model of the network (that places all branches and nodes in 3D space). A branch is defined as any mine opening such as raise, shaft or drift. A branch can be consisted of one or more serial segments. These segments must share the same geometrical and ventilation attributes. A node is defined as the junction point of 2 or more branches.

In the previous version of Eolaval, the user had to manually type in all the parameters for each branch of the network. Since no graphics were involved, node parameters were not required. The input of that information was a tenuous task with the risk for clerical errors. In the current version the user has to place branches and nodes in the graphical environment. This can be achieved either directly in Eolaval or in any CAD Mining package. If the latter option is used, data needs to be imported into Eolaval in the form of a DXF file. This process concerns only geometrical data.

The second step is to assign to branches and nodes the following ventilation parameters (Figure 1) : branch surface, branch perimeter, K factor, shape factor, branch length, resistance (it can optionally be calculated by the program)

Figure 1. Definition of branches and nodes

The user needs to specify the branch type. The options are:

- Variable air quantity branch
- Fixed air quantity branch
- Branch with a booster fan

The use of booster fan branches is a new feature of the new Eolaval version. When a booster fan branch is selected, the user needs to specify the fan model choosing from within a built-in fan database that contains the characteristic curves of the most commonly used fans in Quebec underground mines. The program computes the pressure drop according to the fan selected.

The third and last step is the numerical simulation. The user has the choice among 3 types of simulation:

- Conventional simulation
- Gravimetric simulation
- Thermodynamic simulation

User Interface

The user interface is always a critical aspect while designing new software. Many sophisticated systems without a proper interface are under-used. Mine staff can feel lost in front such a software. A good user interface should be intuitive, easy to learn and user-friendly. We put a special attention to respect these criteria.

Eolaval's user interface offers most of the standard Windows functions and features. It is possible to move, add and dock toolbars. There are ToolTips and status bar help strings to help the user understand the purpose of a menu command. An unlimited undo/redo system has been implemented. A html help system is available.

Eolaval's user interface is divided in 2 main views. The first one is used to visualise the ventilation network in 3 dimensions (Figure 1). The second view shows the network under a spreadsheet form (Figure 6).

Graphic view

The graphic view of Eolaval is a simple CAD interface. It allows the user to retrieve graphical data from mining CAD packages, to manipulate and edit graphically the branches and nodes of the network and to visualise the simulation results.

Input

Eolaval can use either a DXF (Drawing Exchange Format) file as input or the user can build the network from scratch. The program supports:

- Points
- 2D and 3D Polylines
- Lines
- Polyfaces
- 3D Meshes
- Layers

View controls

Eolaval offers several options to navigate around the network. It makes it easy for the user to find the best 3D view in order to visualise any network (Figure 2). Tools available include:

- Zooming (in, out, real time, windows, extend)
- Panning in real time.
- Rotation in real time.

It is possible to name and save special views or to return to a previous view. Eolaval uses the

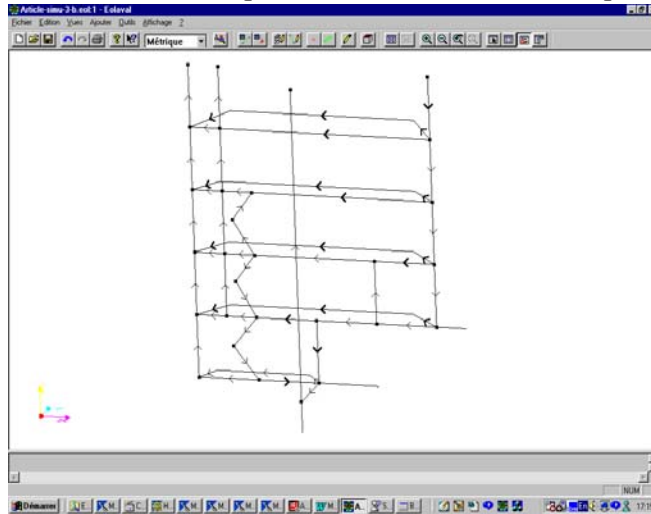


Figure 2. Graphic view

layers system. Like AutoCAD, it is possible to group objects on a layer and to modify object properties by modifying layer properties.

Creating and editing objects

The user can create a new branch or a new node. It is possible to either pick a location on the screen or to type in the specific co-ordinates.

Objects can be deleted at any time. The program has tools to edit an object or to change its elevation. Eolaval features also some drafting aids:

- Cursor position at the bottom of the screen.
- Axis system that shows view orientation
- Snap object that shows selected object

Message window

The message screen is under the graphic view. All messages related to the graphic view are shown in this window. It gives instructions about the current command and it notifies on errors.

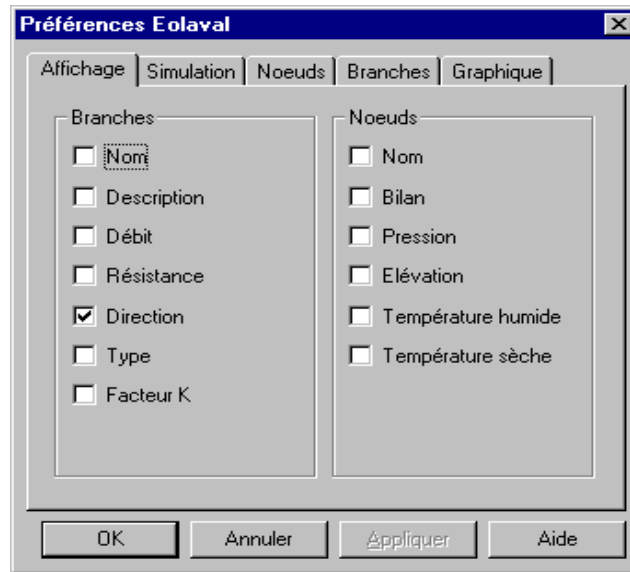


Figure 3. Display preferences

Preferences

EOLAVAL is highly customisable. The user can adjust preferences to make the software work exactly the way he wants. For example, the user decides what type of information he wants to be displayed on the screen by modifying the display preferences (Figure 3).

Spreadsheet view

The spreadsheet view is a window that contains an Excel like grid. It is possible to edit any property, to add a new branch or to delete an existing one. It is through this view that the user can balance the network and carry out the simulation.

Case Study

The following part of the paper presents a practical case study where the potential of the new version of EOLAVAL in designing mine ventilation systems is illustrated. Figure 4 presents the mine ventilation network of an underground mine. The objective of this case study is to calculate the air quantity distribution in the network in one hand and to evaluate the impact of adding two ventilation raises (raise no.3 between levels 3 and 4 and raise no.5 between level 4 and surface) on the fan requirements. In order to facilitate modeling of the mine ventilation network, it is recommended that the user take into account only the main ventilation airways. The user inputs the total air quantity entering the mine and the fixed air quantities where necessary and the program balances all air quantities automatically before the Hardy- Cross simulation starts.

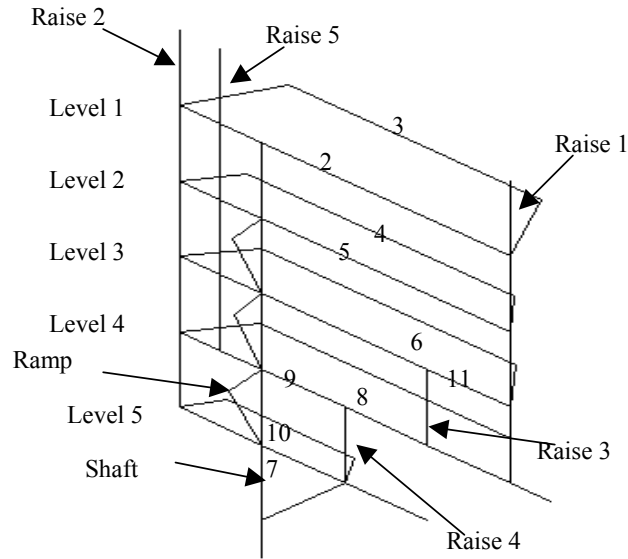


Figure 4. Mine ventilation network of case study

Following the creation of the network data files, EOLAVAL creates the simulation input data file by calculating the resistance of each airway and by verifying if the quantity of air is balanced at each node. The next step is the simulation itself. The conventional simulation through the Hardy Cross iterations will produce the final air quantity and its direction in each branch. The program will also calculate the static head of the main fan, the static head developed by the booster fans and the head losses of the regulators within the network. Table 1 shows a summary of the input data and simulation results, namely the fixed air quantity branches, the necessary regulators and fans.

Table 1. Input data and simulation results of the case study

Branch No.	Fixed air quantity (m ³ /s)	Regulator/Fan (Pa)	
Raise 1	160	Without raises	948 Fan
		With raise 3	842 Fan
		With raises 3&5	697 Fan
2	28	348 Regulator	
3	15	444 Regulator	
4	15	313 Regulator	
5	15	292 Regulator	
6	12	256 Regulator	
7	5	10 Regulator-	
8	12	226 Regulator	
9	20	99 Regulator	
10	5	135 Regulator	
11	12	148 regulator	

Figure 5 shows the direction and quantity of air flowing in each branch. In this case study, we can notice that by adding the two raises (raise 3&5) the necessary static head of the main fan (raise 1) is decreased by 251 Pa (26%).

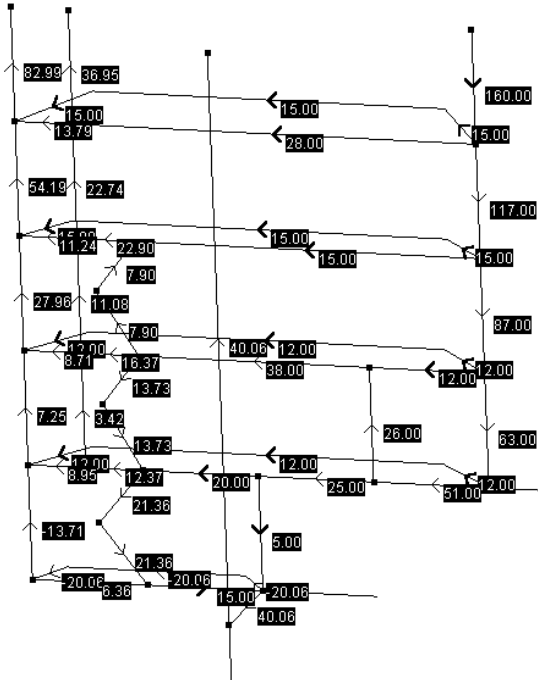


Figure 5. Air quantity distribution in network (with raises)

Bases de données										
Fichier Edition Vues Outils Affichage 2										
Noeuds										
No. de Noeud	Br. Entrantes	Br. Sortantes	Bilan m³/s	X	Y	Z	Temp. Sèche °C	Temp. Humide °C	Pression Pa	
e3-n1	e3-b1	e3-b5	0.0000	150.0000	0.0000	-100.0000	15.0000	15.0000	101.3000	
e4-n2	m4	e4-b2,e4-b1	-0.0000	200.0000	0.0000	-150.0000	15.0000	15.0000	101.3000	
e5-n3	e5-b2	e5-b3,m5	-0.0000	0.0000	0.0000	-200.0000	15.0000	15.0000	101.3000	
Surface	m9,p2	m1	0.0000	200.0000	0.0000	50.0000	15.0000	15.0000	101.3000	
e2-n1	e2-b1	R1,e2-b4	0.0000	49.6109	0.0000	-50.0000	15.0000	15.0000	101.3000	
e3-n2	m3	e3-b2,m4,e3-b1	0.0000	200.0000	0.0000	-100.0000	15.0000	15.0000	101.3000	
e4-n3	e4-b2,m5,e4-b3	m6	-0.0000	0.0000	0.0000	-150.0000	15.0000	15.0000	101.3000	
e1-n1	e1-b1	e1-b3	0.0000	25.0000	0.0000	0.0000	15.0000	15.0000	101.3000	
e2-n2	m2	e2-b2,m3,e2-b1	0.0000	200.0000	0.0000	-50.0000	15.0000	15.0000	101.3000	
e3-n3	e3-b2,m6,e3-b3	m7	0.0000	0.0000	0.0000	-100.0000	15.0000	15.0000	101.3000	
e4-n4	e4-b4	e4-b3	-0.0000	25.0000	0.0000	-150.0000	15.0000	15.0000	101.3000	
r1	R1	R2	0.0000	32.4439	0.0000	-72.5243	15.0000	15.0000	101.3000	
e1-n2	m1	e1-b2,m2,e1-b1	0.0000	200.0000	0.0000	0.0000	15.0000	15.0000	101.3000	
e2-n3	e2-b2,m7,e2-b3	m8	0.0000	0.0000	0.0000	-50.0000	15.0000	15.0000	101.3000	
e3-n4	e3-b4	e3-b2	0.0000	25.0000	0.0000	-100.0000	15.0000	15.0000	101.3000	

Branches												
No. de branche	Entrée	Sortie	Surface m²	Périmètre m	Facteur K kg/m²	Facteur de forme	Longueur m	Résistance sec²Pa/m⁵	Débit m³	Débit fixe Index	Ventilateur	Description
R1	e2-n1	r1	16.0000	16.0000	0.0160	1.1300	28.3000	0.0020	25.5911	Non		Rampe 1
R2	r1	e3-n5	16.0000	16.0000	0.0160	1.1300	32.6000	0.0023	25.5911	Non		Rampe 2
R3	e3-n5	r2	16.0000	16.0000	0.0160	1.1300	27.1000	0.0019	39.9303	Non		Rampe 3
R4	r2	e4-n5	16.0000	16.0000	0.0160	1.1300	32.7000	0.0023	39.9303	Non		Rampe 4
p1	e5-n2	p1	16.0000	16.0000	0.0160	1.1300	50.0000	0.0035	111.7844	Non		ravers banc puit
R5	e4-n5	r3	16.0000	16.0000	0.0160	1.1300	31.0000	0.0022	39.9225	Non		Rampe 5
m10	e4-n6	e5-n2	12.2500	14.1400	0.0180	1.1300	50.0000	0.0078	40.0165	Non		zie entre niv5 et
R6	r3	e5-n1	16.0000	16.0000	0.0160	1.1300	33.0000	0.0023	39.9225	Non		Rampe 6
p2	p1	Surface	38.5000	22.0000	0.0390	1.0000	250.0000	0.0034	111.7844	Non		Puits
m1	Surface	e1-n2	15.9000	14.1400	0.0120	1.0000	50.0000	0.0021	230.0000	Oui		Monterie entré
m2	e1-n2	e2-n2	15.9000	14.1400	0.0120	1.0000	50.0000	0.0021	121.7401	Non		monterie
m3	e2-n2	e3-n2	15.9000	14.1400	0.0120	1.0000	50.0000	0.0021	67.2411	Non		monterie
e5-b1	e5-n1	e5-n2	16.0000	16.0000	0.0160	1.1300	50.0000	0.0035	41.1582	Non		Niv.5,branche 1
e4-b1	e4-n2	e4-n1	16.0000	16.0000	0.0160	1.1300	50.0000	0.0035	26.3895	Non		Niv4, branche 1

Figure 6. Sample of a database of branches and nodes of a ventilation network

This case study shows how the program allows the user to select a fan that meets the air quantities and static head requirements and also to correctly calculate the regulators dimensions. The program can also be used to predict the effect of adding new branches in the

network as the mine develops through time (ventilation raises no. 3 and no. 5 in our case study). Figure 6 shows a typical example of a database of branches and nodes used by Eolaval.

Another question that needs to be answered in this example is: what is the economic size of the raise no. 5 ? In order to answer this question, we can use EOLAVAL to calculate the optimal economic dimensions of the raise. The optimisation of the dimensions of a ventilation raise is a trade-off between excavation costs (proportional to the excavated volume) and the fan operating costs (electricity costs). Normally, as we increase the surface of a ventilation raise, construction costs increase whereas friction losses, therefore electricity costs, decrease. EOLAVAL requires the following input data for this optimisation :

- Length of the raise no. 5 (200m);
- Mine life (10 years);
- Interest rate (7 %);
- Air quantity through the raise (37 m³/s);
- Operating hours per year (5840 hours);
- Electricity cost (0,4\$/kwh);

The program has built-in several options of raise shape and raise size with their corresponding excavation costs. The program is built in such a way that the user can change any of these values (dimensions or excavation costs). The program produces the total cost per year for one raise or two parallel raises. The results obtained from EOLAVAL indicate that the optimal dimensions of the ventilation raise are 3mx3m that correspond to a total annual cost (construction + electricity) of 1 681 \$/year.

The user should be aware that the precision obtained depends on the accuracy of the data used. It is also very useful to compare the simulation results with the ventilation survey data (in the case of an operating mine) in order to verify the precision of the simulation and correct in necessary the K factors.

CONCLUSIONS

The new graphics enhanced version of EOLAVAL has been developed at the Department of Mining & Metallurgy at Laval University in collaboration with the Québec Mining Association in order to provide a practical and easy to use mine ventilation planning tool to the Québec Mining Industry. The whole project has been financed by the Quebec Research Institute on Occupational Health and Safety (IRSST). Eolaval's beta version has been distributed to many mines in the province of Québec in order to be tested extensively. It is expected that the final version will soon be available for final distribution. The software has always been used as a teaching tool at Laval University since its conception.

Possible areas of applications of EOLAVAL are:

1. Designing the ventilation system of a new mine:
 - evaluation of alternative ventilation configurations;
 - optimisation of airway shape and size;
 - design of auxiliary ventilation systems;
 - design of mine air heating plants;
 - evaluation of mine shaft pressure losses;
 - evaluation of natural ventilation pressure;
 - evaluation of the effects of air density fluctuations on the fan operating point.
2. Design of ventilation network expansions as the mine evolves through time.

REFERENCES

- Hartman, Howard, Mutmanky Jan and Wang Y., Mine Ventilation and Air Conditioning, Wiley Interscience, 1997.
- McPherson, Malcolm, Subsurface Ventilation and Environmental Engineering, Chapman & Hall, 1993.

- Kostas Fytas & Pierre Thibault, EOLAVAL - An integrated Mine Ventilation Design Software, Proceedings of CAMI'95 - Third Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry, Montreal, Quebec, October 22-25, Université McGill, 1995, pp. 689-698.
- Kostas Fytas & Pierre Thibault, EOLAVAL: A Mine Ventilation Design Software, presented at the First International Conference on Information Technologies in the Minerals Industry (via the Internet), organized by the National Technical University of Athens, Greece, 1-12 December 1997.
- Kostas Fytas & Pierre Thibault, Proceedings of the Seventh International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection (MPES), Calgary, October 6-9, 1998, A. A. Balkema, pp. 795-802.

ANNEXE E

Simulation d'une mine profonde – étude de
cas

Définition du problème

La mine actuelle est accessible par un puits qui se rend à la profondeur de 750 mètres (Elévation 4250). La direction de la mine désire continuer l'exploitation jusqu'à une profondeur de 1500 mètres. L'étude de faisabilité prévoit approfondir la mine en utilisant une rampe pour l'accès.

Durant la planification de la ventilation souterraine pour l'avenir l'ingénieur de ventilation doit répondre aux deux questions suivantes : le ventilateur de surface actuel est-il suffisant pour la ventilation dans la partie inférieure de la mine? Quelles seront les conditions climatiques lorsque le développement aura atteint le niveau 3500 ?

Conformément à la réglementation en vigueur et à l'équipement choisi pour l'exploitation, on a estimé qu'un débit d'air frais de 50 m³/s sera nécessaire.

Description du réseau

Le réseau de ventilation est très simple. La figure 1 nous en donne une bonne idée du réseau tel que modélisé avec Eolaval.

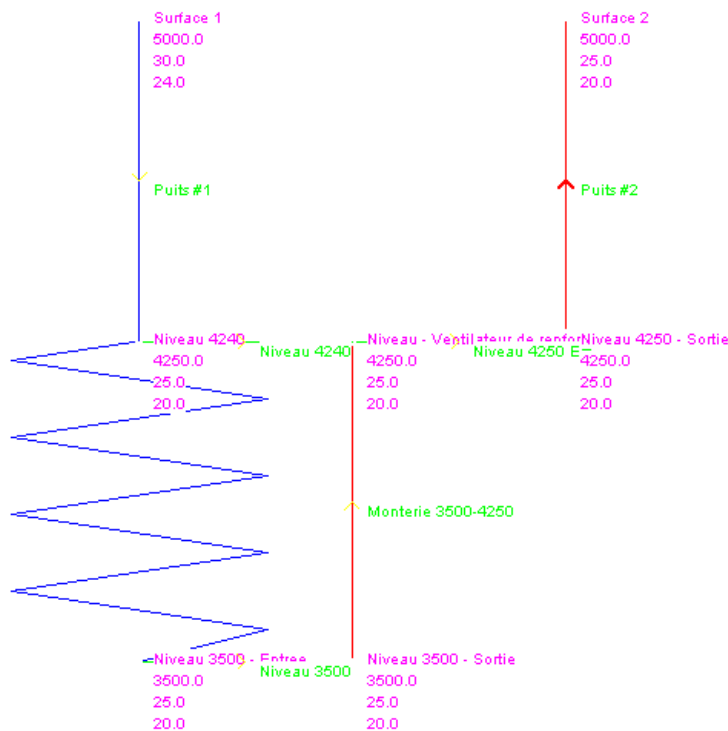


FIGURE 1. Schéma du réseau de ventilation de la mine profonde

L'air entre dans la mine par le puits #1. Ce puits d'un diamètre de 6.4 mètres est complètement équipé. Un ventilateur en haut du puits #2 aspire l'air vicié de la mine. La figure 2 montre la courbe débit-pression du ventilateur.

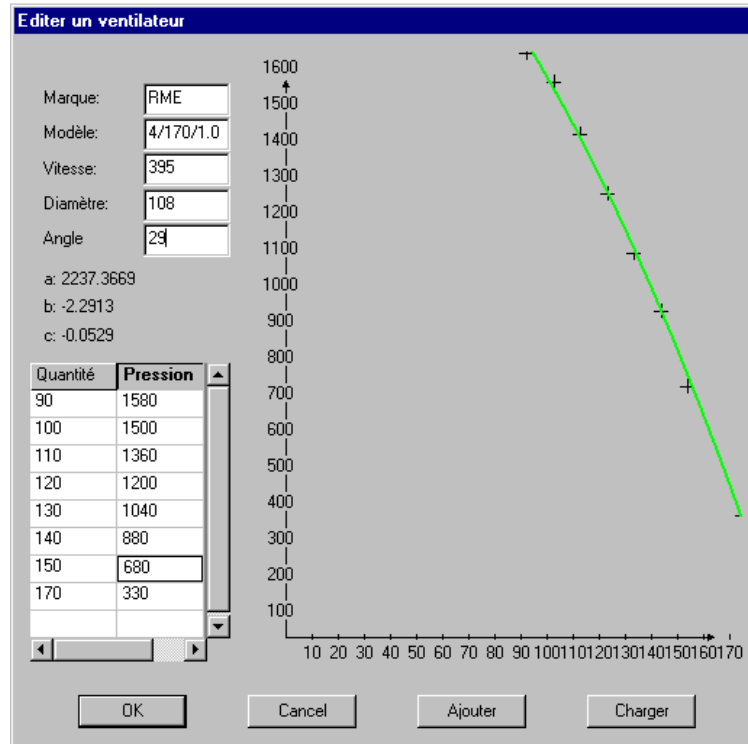


FIGURE 2. Courbe débit-pression du ventilateur principal du réseau

Les paramètres des branches principales du réseau de ventilation sont définis dans le tableau suivant.

No. de branche	Entrée	Sortie	Surface m ²	Périmètre m	Facteur K kg/m ²	Facteur de forme	Longueur m	Exp. n	Résistance kg/m ²
Puits #2	eau 4250 - Sc	Surface 2	12.5664	12.5664	0.0090	1.0000	750.0000	2.0000	0.0427
Niveau 4250 Est	Ventilateur d	eau 4250 - S	22.0000	18.4000	0.0290	1.0000	500.0000	2.0000	0.0251
Monterie 3500-4250	eau 3500 - Sc	Ventilateur c	7.0686	9.4248	0.0090	1.0000	750.0000	2.0000	0.1801
Niveau 4240	Niveau 4240	Ventilateur c	21.0000	18.4000	1.0066	1.0000	500.0000	2.0000	1.0000
Niveau 3500	eau 3500 - Er	eau 3500 - S	22.0000	18.4000	0.0180	1.0000	500.0000	2.0000	0.0156
Rampe 4250-3500	Niveau 4240	eau 3500 - Er	22.0000	18.4000	0.0180	1.0000	4859.6000	2.0000	0.1512
Puits #1	Surface 1	Niveau 4240	12.5664	12.5664	0.0280	1.0000	750.0000	2.0000	0.1330

TABLEAU 1. Paramètres des branches de ventilation

Résultats

Simulation conventionnelle

Suite à une simulation conventionnelle (on ne tient pas compte de la densité et des changements de température de l'air) avec Eolaval, la répartition de l'air à travers la mine est indiquée au tableau suivant.

No de Branche	Résistance	Débit	Perte/Branche	H (Ven/Reg)
Monterie 3500-4250	1.80e-001	4.55e+001	3.74e+002	
Niveau 3500	1.56e-002	4.55e+001	3.23e+001	
Niveau 4240	1.00e+000	2.68e+001	7.18e+002	
Niveau 4250 Est	2.51e-002	7.23e+001	1.31e+002	
Puits #1	1.33e-001	7.23e+001	6.96e+002	
Puits #2	4.27e-002	7.23e+001	2.24e+002	
Rampe 4250-3500	1.51e-001	4.55e+001	3.14e+002	

TABLEAU 2. Résultats de la simulation conventionnelle

Simulation gravitationnelle

Pour la simulation gravitationnelle, nous avons besoin des températures sèches, humides et des pressions barométriques à chaque nœud du réseau. Toutefois, dans le cas de la planification d'une mine future comme celle-ci il faut estimer ces valeurs. Par contre, dans une situation d'une mine réelle, ces valeurs devraient être mesurées sous-terre. Les paramètres estimés sont indiqués au tableau 3 et les résultats de la simulation gravitationnelle au tableau 4.

No. de Nœud	Br. Entrantes	Br. Sortantes	Bilan m ³ /s	X	Y	Z	Temp. Sèche °C	Temp. Humide °C	Pression kPa	Nœud de surface
iveau - Ventilateur de renif	eau 4240.Monterie 3500-4	Niveau 4250 Est	0.0000	303.0050	12.9887	4250.0000	28.0000	27.0000	96.0000	Non
Niveau 4240	Puits #1	eau 4240.Rampe 4250-3	-0.0000	-196.9950	12.9887	4250.0000	31.0000	26.0000	97.0000	Non
Surface 1		Puits #1	-69.8499	-196.9950	12.9887	5000.0000	30.0000	24.0000	89.0000	Oui
Surface 2	Puits #2		69.8499	803.0100	12.9887	5000.0000	28.0000	27.0000	88.0000	Oui
Niveau 3500 - Entree	Rampe 4250-3500	Niveau 3500	0.0000	-196.9950	12.9887	3500.0000	31.0000	28.0000	104.0000	Non
Niveau 4250 - Sortie	Niveau 4250 Est	Puits #2	0.0000	803.0100	12.9887	4250.0000	31.0000	27.5000	95.0000	Non
Niveau 3500 - Sortie	Niveau 3500	Monterie 3500-4250	-0.0000	303.0050	12.9887	3500.0000	32.0000	29.0000	104.4563	Non

TABLEAU 3. Valeurs des paramètres de nœuds pour la simulation gravitationnelle

No de Branche	Résistance	Débit	Perte/Branche	H (Ven/Reg)
Puits #1	1.33e-001	7.64e+001	7.75e+002	
Rampe 4250-3500	1.51e-001	4.48e+001	3.03e+002	
Niveau 3500	1.56e-002	4.31e+001	2.89e+001	
Niveau 4240	1.00e+000	2.66e+001	7.10e+002	
Monterie 3500-4250	1.80e-001	4.46e+001	3.58e+002	
Niveau 4250 Est	2.51e-002	7.33e+001	1.35e+002	
Puits #2	4.27e-002	7.64e+001	2.49e+002	

TABLEAU 4. Résultats de la simulation gravitationnelle

Simulation thermodynamique

Pour la simulation thermodynamique, nous avons utilisé les paramètres thermodynamiques indiqués aux tableaux 5 et 6 suivants :

Température de la roche vierge	36.9°C à élévation 3900
Pas géothermique	1°C/100m
Chaleur spécifique de la roche	950 J/(C°kg)
Densité de la roche	2700 kg/m ³
Proportion des murs humides	20%
Age des galeries	12 mois

TABLEAU 5. Propriétés thermiques de la roche

Rampe 3500-4250	300 kW d'équipement diesel utilisé à 60%, Ratio eau-carburant 3.0
	100 kW de ventilateur utilisé à 90%
Niveau 3500	200 kW d'équipement diesel utilisé à 60%, Ratio eau-carburant 1.3
	100 kW de ventilateur utilisé à 90%
Puits #2	300 kW de ventilateur utilisé à 90%

TABLEAU 6. Équipement utilisé dans la mine

Les résultats de la simulation thermodynamique sont indiqués au tableau 7 et à la figure 3.

No de Branche	Résistance	Débit	Perte/Branche
Puits #1	1.33e-001	7.23e+001	6.94e+002
Rampe 4250-3500	1.51e-001	4.22e+001	2.69e+002
Niveau 3500	1.56e-002	4.09e+001	2.60e+001
Niveau 4240	1.00e+000	2.52e+001	6.37e+002
Monterie 3500-4250	1.80e-001	4.24e+001	3.24e+002
Niveau 4250 Est	2.51e-002	6.91e+001	1.19e+002
Puits #2	4.27e-002	7.12e+001	2.17e+002

TABLEAU 7. Résultats de la simulation thermodynamique

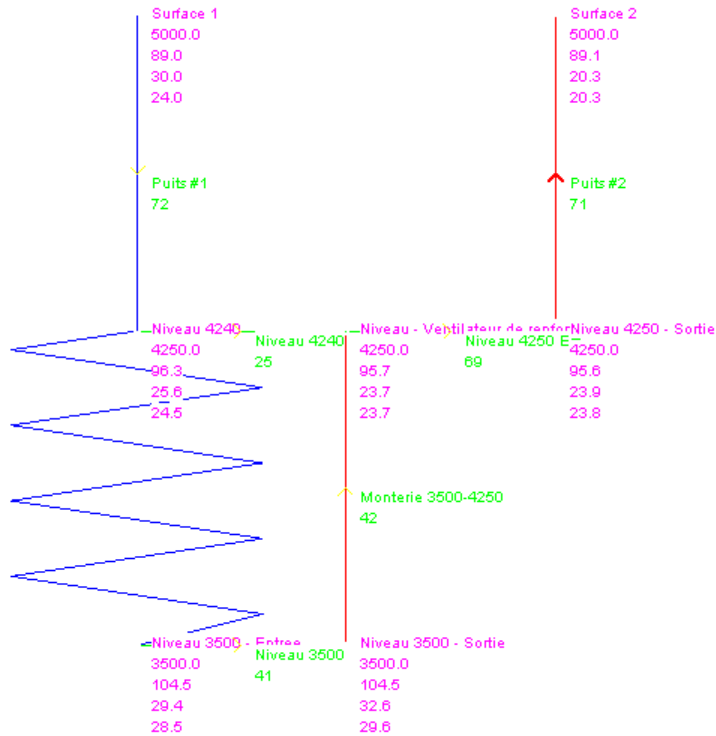


FIGURE 3. État du réseau selon les résultats de la simulation thermodynamique

Conclusions

Le tableau 8 montre les différences de débits avec les 3 méthodes d'analyse (conventionnelle, gravitationnelle et thermodynamique). La plus grande différence est 10%. Naturellement, elle se produit au niveau le plus profond de la mine. Les débits et les températures calculés par le logiciel (approche thermodynamique) pour le fond du puits actuel (profondeur de 750m) ont été vérifiés et validés par des mesures sous-terre et les différences sont minimales.

Conventionnelle m/s ³	Gravitationnelle m/s ³	Thermodyna mique m/s ³	Variation Conventionnelle- Gravitationnelle %	Variation Gravitationnelle- Thermodynamique %	Variation Conventionnelle- Thermodynamique %
72.3	76.4	72.3	5.7	5.4	0.0
45.5	44.8	42.2	1.5	5.8	7.3
45.5	43.1	40.9	5.3	5.1	10.1
26.8	26.6	25.2	0.7	5.3	6.0
45.5	44.6	42.4	2.0	4.9	6.8
72.3	73.3	69.1	1.4	5.7	4.4
72.3	76.4	71.2	5.7	6.8	1.5
		Moyenne:	3.2	5.6	5.2

TABLEAU 8. Tableau comparatif des débits obtenus avec les 3 méthodes.

Cet exemple de simulation du réseau de ventilation d'une mine profonde démontre l'avantage inconditionnel de la méthode thermodynamique : la prédiction des conditions climatiques dans les profondeurs de la mine surtout quand on fait face à la planification d'une nouvelle mine où les relevés de ventilation sont impossibles. Les résultats climatiques obtenus ne sont pas très surprenants. Par contre, ils démontrent que les conditions au niveau inférieur seront difficiles. L'ingénieur en ventilation peut utiliser cet outil pour calculer et prévoir les meilleures stratégies possibles pour le contrôle de l'environnement.

La simulation nous montre que dans notre mine, ce ne sont pas les gaz qui seront le facteur limitatif, mais bien la température.