



HAL
open science

Amélioration des méthodes d'évaluation des perturbations d'aéragé provoquées par un incendie

Nicolas d'Albrand

► **To cite this version:**

Nicolas d'Albrand. Amélioration des méthodes d'évaluation des perturbations d'aéragé provoquées par un incendie. Journée de présentation des résultats INERIS à CdF, Jun 1994, Hombourg-Haut, France. pp.97-105. ineris-00971894

HAL Id: ineris-00971894

<https://ineris.hal.science/ineris-00971894>

Submitted on 3 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AMELIORATION DES METHODES D'EVALUATION DES PERTURBATIONS D'AERAGE PROVOQUEES PAR LES INCENDIES EN MINES

Nicolas d'ALBRAND

INERIS

1 - INTRODUCTION.

De tous temps les mineurs ont été préoccupés par les risques d'incendies pouvant survenir dans les mines. Ce risque, de par ses conséquences, constitue l'un des soucis majeurs de l'exploitant minier, tant au plan de la sécurité que de la production. En effet un incendie peut avoir des conséquences catastrophiques non seulement au voisinage du foyer, comme c'est généralement le cas en espace découvert, mais aussi en raison du confinement à des distances importantes. Ceci est dû au fait que la ventilation entraîne et disperse dans les galeries et les ouvrages des gaz chauds, toxiques, pauvres en oxygène et parfois explosibles. Lorsque les gaz chauds parcourent des ouvrages inclinés (plans, bures, puits,...) il se crée une force aéromotrice thermique qui modifie le régime de ventilation de la mine et peut aller jusqu'à provoquer des inversions d'aérage, ce qui peut s'avérer un facteur aggravant.

Les perturbations dues à un incendie ont, par le passé, entraîné des catastrophes. Parmi les plus graves on peut citer :

- Roche la Molière (France) - 1928 - 48 morts ;
- Marcinelle (Belgique) - 1956 - 263 morts ;
- Dukla (Pologne) - 1961 - 108 morts ;
- Merlebach (France) - 1976 - 16 morts.

Ces dernières, ainsi que dans une moindre mesure les incidents, ont été l'occasion de réflexions et de recherches qui ont abouti à la mise au point de méthodes et programmes de calcul visant à quantifier ces perturbations.

Cependant, de nouveaux progrès apparaissent encore nécessaires pour les raisons suivantes :

- les modèles ont été développés dans l'hypothèse d'un régime permanent établi aussi bien pour l'intensité de l'incendie que pour les débits d'aéragé et l'envahissement des chantiers par les gaz chauds. Dans certains cas, les calculs ne convergent pas vers une solution unique. De plus, lorsqu'il existe, ce régime permanent ne peut pas être atteint si, dans les phases intermédiaires de progression des gaz chauds dans les circuits, des inversions qui modifient le trajet suivi par ces gaz se produisent.

- les modèles de calcul actuels utilisent, pour représenter les échanges de chaleur avec les terrains, la formule de Rees dont la base expérimentale -refroidissement de terrains chauds- est fortement éloignée des conditions d'échanges de chaleur en cas d'incendie.

Il est très important de connaître et de gérer convenablement la ventilation d'une mine en activité normale (ce que l'on sait faire maintenant). Mais il s'avère aussi important de prévoir à l'avance les perturbations provoquées par un incendie, de manière à en limiter les conséquences. C'est dans cette optique que cette recherche a été conduite.

Objectif.

Les possibilités actuelles de la technique sont encore loin de nous permettre d'envisager la mise au point d'un système permettant de gérer la situation en temps réel. Notre objectif était beaucoup moins ambitieux. Il était tout simplement de pouvoir, et ce n'est déjà pas évident, simuler des incendies dans une mine, mettre en évidence les perturbations apportées à l'aéragé, et trouver les parades pour minimiser ces perturbations (inversions d'aéragé, envahissement des chantiers par les fumées d'incendie).

Pour réaliser cet objectif, les travaux suivants ont été entrepris :

- développement d'un module de calcul de simulation d'incendie dans une galerie et couplage de ce module à un logiciel de calcul d'aéragé écrit précédemment ;
- simulation numérique, à l'aide de ce logiciel, d'un incendie dans une mine ;
- simulation en vraie grandeur, d'un incendie, dans la mine et mesure des effets ;
- comparaison de la simulation et de la réalité, et calage éventuel du modèle.

2 - RAPPEL D'UN ÉTAT DES CONNAISSANCES.

Il est évident que le sujet n'est pas neuf et que des méthodes qualitatives et quantitatives ont déjà été élaborées et ont rendu des services.

2.1 - Méthodes qualitatives.

La méthode la plus connue est la méthode de stabilisation de la ventilation en cas d'incendie, développée par W. Budryk.

L'étude d'un plan d'aéragé d'une mine complexe étant souvent peu commode, Budryk a proposé de représenter les plans sous la forme de schémas dits "canoniques" ouverts ou fermés. Ces schémas topologiques permettent de mettre en évidence des circuits parallèles, ceux justement dans lesquels peuvent se produire des inversions d'aéragé sous l'effet d'un incendie. Dans la pratique il est commode de représenter le réseau sous la forme d'un schéma canonique fermé, en plaçant à l'extérieur la branche comportant la force aéromotrice accidentelle.

Le développement d'un incendie dans une branche peut entraîner des inversions d'aéragé :

- dans les branches latérales, si l'incendie est en aéragé montant ;
- dans la branche incendie elle-même, si l'incendie est en aéragé descendant.

2.2 - Méthodes quantitatives.

Le débit d'air dans les branches d'un réseau dépend de la caractéristique des branches (résistance aéraulique, profondeur des noeuds), de la température de l'air et des charges générées par les ventilateurs.

Toute modification de la température de l'air (ou des gaz) dans les branches modifie les débits (dès qu'il y a dénivellée), en jouant sur l'effet de tirage naturel. Toutes les méthodes numériques développées permettent, connaissant les débits d'air dans chaque branche, de calculer la température moyenne de l'air en aval aéragé d'un incendie en fonction d'un certain nombre de caractéristiques et, d'utiliser ces valeurs de température pour faire à nouveau un calcul d'aéragé.

Le premier, E. Simode, a proposé des formules établies empiriquement, à partir d'expériences pratiquées dans des mines étrangères, pour représenter le refroidissement des fumées, au contact du terrain le long de leur trajet.

Les graphiques tracés au moyen de ces formules donnent une idée de ce refroidissement en fonction du chemin parcouru par les fumées et de leur vitesse.

En fournissant une valeur approximative de la température moyenne du fluide, ils permettent d'estimer la valeur de la masse volumique moyenne dont dépend l'effet aéromoteur de l'incendie.

Ainsi pour une voie unique, si l'on connaît la vitesse initiale v (m/s) de l'air dans la branche et, si l'on se donne l'élévation de température $\Delta\theta_f$ (°C) au niveau du foyer :

- l'élévation de la température $\Delta\theta$ (°C) des fumées en fonction de la distance D (m) du foyer est

$$\Delta\theta = \Delta\theta_f \cdot e^{\frac{-0,0175 \cdot D}{v^{0,64}}}$$

- l'élévation moyenne $\Delta\theta_m$ (°C) de cette température sur la distance D est

$$\Delta\theta_m = \frac{-\Delta\theta_f \cdot v^{0,64}}{0,0175} \left[\frac{e^{\frac{-0,0175 \cdot D}{v^{0,64}}} - 1}{D} \right]$$

L. Vielledent a défini une longueur réduite $\Delta = D/\mathcal{D}$, \mathcal{D} étant la distance qui sépare deux points entre lesquels l'échauffement de l'air est diminué dans le rapport $1/e = 0,368$. Cet artifice lui a permis une simplification des calculs faits à l'aide d'une calculatrice manuelle. Malgré cela, ces formules empiriques ne sont pas d'un emploi facile surtout lorsque l'incendie se développe dans un maillage compliqué.

E. Simode a repris le problème à la base en développant le programme FEUMIN qui permet le calcul des températures de l'air en différents points d'un réseau. Ce programme nécessite la connaissance des températures du foyer θ_f et de la paroi θ_p . La première est choisie librement, quant à la seconde elle est calculée à l'aide de la formule de Rees. Malheureusement cette formule de Rees a été établie pour des flux thermiques allant des terrains vers l'air de la galerie. De ce fait son utilisation est délicate lorsque la température des fumées est de l'ordre de plusieurs centaines de degrés Celsius ce qui est le cas au voisinage du foyer.

Ensuite, ce programme FEUMIN a été couplé au programme de calculs d'aéragé RESO, lui aussi développé par le Centre de Calculs d'Aéragé des HBL, pour former un programme complet nommé RESFEU. Ce logiciel, non interactif, fonctionne sur un ordinateur central et se contente d'une simulation en régime pseudo permanent.

R. Greuer, dans le cadre de la Michigan Technological University, a mis au point une méthode simplifiée pour calculer les transferts de chaleur entre l'air de la galerie et les terrains encaissants. Cette méthode a ensuite été intégrée dans le programme général de calculs d'aéragé et de simulation d'incendies en régime transitoire MFIRE développé par le Bureau of Mines (USA).

L'utilisation de MFIRE nécessite la création préliminaire, à l'aide d'un éditeur de texte particulier, d'un fichier contenant toutes les données nécessaires aux calculs, ce qui rend impossible toute interactivité. Beaucoup plus grave est l'existence d'erreurs de programmation qui, bien que donnant des résultats exacts aux températures "normales", conduisent à des résultats erronés dès que des températures importantes entrent en jeu, ce qui est le cas des incendies. Ces erreurs pourraient sans doute être facilement corrigées.

Les programmes RESFEU et MFIRE avaient été développés pour fonctionner sur des ordinateurs dans des centres de calcul. Dès l'apparition de la microinformatique, le CERCHAR a envisagé de développer de tels programmes de manière à les rendre facilement utilisables directement dans les mines.

Par ailleurs d'autres travaux ont été entrepris mais n'ont pas, à notre connaissance, abouti.

3 - MISE AU POINT D'UN MODÈLE.

L'INERIS disposait déjà du logiciel VENDIS développé précédemment par J. Gunther pour les calculs d'aéragé. Ce logiciel avait été écrit en Fortran pour fonctionner sur un micro-ordinateur Micro-PDP de chez DEC, puis porté sur un PC (au départ avec un microprocesseur 8086). Ce logiciel utilise la méthode classique de Hardy et Cross pour résoudre les équations qui ne sont pas linéaires et tient compte de l'effet du tirage naturel.

Ainsi implanté VENDIS permet le calcul d'un état stationnaire de l'aéragé d'un réseau minier moyen (≈ 250 branches, 200 nœuds) en une dizaine de secondes.

Par rapport à d'autres programmes similaires, l'un des intérêts de VENDIS, réside dans la possibilité de visualiser, sur un terminal graphique couleur Tektronix, le réseau avec les résultats d'un calcul. Les modifications que l'on souhaite apporter au réseau sont faites à l'aide d'une souris directement sur l'écran graphique. Cette particularité est une aide notable à la recherche de solutions, l'utilisateur pouvant avoir une vue globale du réseau. Des agrandissements de zones sont possibles et peuvent être utiles dans certains cas. Une tablette graphique permet la digitalisation des plans et des courbes caractéristiques des ventilateurs.

Pour ces raisons, VENDIS a été utilisé comme programme de base de départ pour créer un programme permettant la prise en compte d'un incendie et le calcul de ses effets sur l'aéragé.

Dans ce but VENDIS a été restructuré de manière à disposer d'un programme principal constitué :

- des sous programmes nécessaires au calcul d'aéragé proprement dit ;
- d'un sous programme spécifique "INCENDIE" de calcul de la température dans une branche tenant compte des échanges thermiques foyer - air - terrains.

Le logiciel résultant est dénommé VENDIS-FS.

Les hypothèses retenues et les fonctionnalités du module "INCENDIE" sont décrites ci-après.

3.1 - Module "INCENDIE".

Le module "INCENDIE", dont le principal artisan est J. Gunther permet le calcul de la température de l'air dans une branche du réseau. Par "air", on entend ici, par commodité, aussi bien l'air de ventilation que son mélange avec les gaz et fumées de combustion.

La température de l'air dans les branches dépend des apports thermiques qui lui sont fournis et des échanges thermiques avec les terrains.

Les apports thermiques sont liés à l'incendie lui-même qui constitue le terme source de la puissance thermique.

Le terme source dépend de :

- la nature du combustible (charbon, pneus, huile,...)
- la forme et de la surface de la source,
- la quantité d'oxygène disponible,

et, de plus, ce terme évolue dans le temps.

Les échanges thermiques avec les terrains sont gouvernés par :

- le coefficient de convection, fonction lui-même de la nature de la surface et de la vitesse,
- la conductibilité thermique des terrains, leur masse volumique et leur chaleur spécifique qui dépendent de leur nature, de l'état de fissuration et de la stratification, ainsi que des circulations éventuelles d'eau.

A ceci, il faudrait ajouter les phénomènes de condensation et d'évaporation, les phénomènes de rayonnement et, tenir compte de la composition des fumées.

Le calcul de la température de l'air dans un tronçon dx de galerie nécessite, en toute rigueur, la résolution d'un ensemble complexe d'équations régissant les phénomènes cités ci-dessus, dans un espace à trois dimensions, aussi bien dans la galerie que les terrains encaissants.

L'expérience acquise par ailleurs de calculs d'échanges thermiques simplifiés dans une galerie, réalisés avec des logiciels de CFD (Computational Fluid Dynamics), a montré qu'il fallait des temps de calcul de plusieurs jours sur une station SUN pour modéliser quelques centaines de mètres de galerie, et ce sans calcul de ventilation.

Pour faire les calculs il est donc nécessaire d'adopter un certain nombre d'hypothèses simplificatrices et de disposer d'un certain nombre de données. L'une des hypothèses simplificatrices adoptée est l'homogénéité des températures dans une section droite de galerie, ce qui autorise des calculs monodimensionnels. Cette hypothèse, la moins contraignante, est sans doute fautive au voisinage de l'incendie, mais elle est d'autant plus réaliste que l'on s'éloigne du foyer du fait du mélange par turbulence des fumées et de l'air.

3.1.1 Principe général de la simulation.

Il s'agit de calculer à chaque pas de temps que l'on s'est fixé, la température moyenne de l'air (des gaz) dans chacune des branches du réseau, et ce pendant toute la durée de la simulation. A chaque pas de temps, ces températures sont prises en compte pour le calcul d'aéragé. Ces températures influent d'une part sur la résistance aéraulique des branches mais aussi sur le tirage naturel dès que l'on rencontre des ouvrages non horizontaux (plans, bures, cheminées, puits).

Procédure.

Un incendie se déclare au temps 0 dans une branche du réseau. Le combustible est supposé être du carbone pur, la combustion ne donnant que du CO_2 (combustion en excès d'oxygène). On s'intéresse à l'état du réseau, à des intervalles de temps successifs dont le pas est dt . Au cours de chaque intervalle dt , on réalise successivement cinq étapes de calcul.

Etape 1 :

On calcule, dans chaque branche, l'échange air-terrains et l'on déduit une nouvelle valeur des températures de l'air et des terrains

Etape 2 :

On calcule l'échauffement de l'air dû à la puissance thermique développée. Cette puissance thermique peut, soit être considérée dans le programme comme fournie, soit calculée à partir de la combustion d'une masse de combustible. Dans ce dernier cas, on combine une certaine proportion (voir plus loin) de l'oxygène contenu dans la branche en feu avec du combustible (s'il existe); on diminue en conséquence le stock de combustible; la puissance thermique produite échauffe l'air de la branche; on y remplace l'oxygène consommé par du CO₂.

Etape 3 :

Ces nouvelles températures de l'air déterminent un nouveau tirage naturel et de nouvelles résistances aérauliques effectives. Un calcul du réseau donne alors de nouveaux débits, desquels on déduit les vitesses v de l'air dans chaque branche et la longueur $l = v \cdot dt$ de propagation.

Etape 4 :

On fait "avancer" l'air de toutes les branches d'une longueur $v \cdot dt$; en chaque nœud, on mélange les quantités d'air venant des branches qui débitent vers le nœud et on en déduit une température pondérée qui sera celle de l'air issu du nœud. On fait la même chose pour la composition de l'air.

Etape 5 :

En chaque branche partant d'un nœud, on mélange l'air qui est entré dans cette branche (et dont on a calculé à l'étape précédente la température et la composition pondérée), avec l'air qui s'y trouvait auparavant, supposé "poussé vers l'autre extrémité".

Autrement dit, si v est la vitesse de l'air, l la longueur de la branche, T_0 la température antérieure, T_1 la température de l'air issu du nœud amont, la nouvelle température sera $[T_1 \cdot v \cdot dt + T_0 \cdot (l - v \cdot dt)]/l$. Un calcul similaire est fait pour la composition en admettant, qu'à l'image des températures, le mélange est homogène dans une section. Bien entendu, ce n'est correct que si $v \cdot dt < l$, et ce sera physiquement discutable si $v \cdot dt \ll l$. La méthode sera donc valable si les temps de transit de l'air dans les branches sont supérieures à dt , sans lui être trop supérieures ; cela peut nécessiter une restructuration du réseau, qu'on limitera sans doute aux branches proches de l'incendie. On notera que cette façon de faire ne définit pas la température de la branche en feu ou de la branche aval de manière correcte, c'est-à-dire indépendante de dt . Mais, vu globalement, le résultat est correct.

3.1.2 Modélisation des échanges air-terrains.

Ces échanges sont gouvernés d'une part par les échanges convectifs à l'interface air-terrains, d'autre part par la conduction dans les terrains ; les effets de l'évaporation éventuelle d'eau, ainsi que les phénomènes de rayonnement, ont été négligés. Compte tenu de la complexité du milieu minier, cette modélisation ne peut être qu'approximative.

Dans la présente implantation, on a supposé des galeries circulaires et on a admis que l'échauffement des terrains se limitait à un "manteau thermique" dont on fixe l'épaisseur, et dont la conductivité est supposée infinie. La température du manteau est supposée homogène dans toute son épaisseur.

Cette hypothèse peut surprendre mais peut cependant être justifiée.

3.1.3 Modélisation de l'échauffement de l'air.

L'échauffement $\Delta\theta$ ($^{\circ}\text{C}$) de l'air, au niveau de l'incendie, est calculé classiquement en fonction de la puissance thermique Φ (W), du débit massique d'air M (kg/s) et de la chaleur spécifique c_p ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

$$\Delta\theta = \frac{\Phi(t)}{M(t)c_p}$$

La puissance thermique peut être choisie comme une puissance thermique "sèche" ou bien comme provenant de la combustion d'une masse m de combustible.

Dans le premier cas, on indique au programme :

- la valeur de Φ (kW) que l'on veut fournir à l'air.
- la durée t_m (s) de montée en puissance de l'incendie,

Si l'on indique une durée t_m de montée en puissance de l'incendie en fonction du temps, le programme démarrera le calcul au premier pas de temps avec une puissance nulle, puis l'incrémentera de manière linéaire sur la durée t_m de montée en puissance.

$$\begin{array}{ll} \Phi(t) = \Phi \cdot t/t_m \text{ (kW)} & \text{pour } 0 < t < t_m \\ \Phi(t) = \Phi \text{ (kW)} & \text{pour } t \geq t_m \end{array}$$

Dans le second cas, Φ est calculé et pour cela on indique :

- la masse initiale m (kg) de combustible (supposée être du carbone),
- le pourcentage d'oxygène (%) de l'air utilisé pour la combustion,

3.2 - Utilisation de VENDIS-FS.

Le logiciel VENDIS-FS nécessite :

- un micro-ordinateur type PC,
- un terminal graphique couleur Tektronix 4111 ou 4211,
- une tablette graphique Tektronix 4957,
- une imprimante (*),
- un copieur couleur Tektronix 4696 (*).

Une première version de VENDIS-FS a été écrite pour être utilisée sur un micro-ordinateur type PC, muni d'une carte Archipel à transputer T800 (Volvox-1A). Cette solution avait été retenue à cause de la lenteur des processeurs des PC de l'époque (8088 ou 8086 - 16 MHz). Le transputer T800, même sans utiliser ses possibilités de calcul parallèle, permet d'atteindre des performances comparables à celle d'une station de travail SUN (tout du moins pour cette application).

Pour l'utilisateur l'opération était transparente, le programme au lieu d'être exécuté par le processeur du PC l'était par le transputer. Elle avait cependant l'inconvénient de nécessiter

une carte de communication Archipel (Volvox 222 + IO) entre le PC et le terminal graphique, carte dont la production a été arrêtée en 1992.

Cette situation ainsi que l'évolution des processeurs installés dans les PC nous a conduit à transposer VENDIS-FS. Le travail a consisté à adapter quelques instructions en Fortran pour rendre le programme compilable par un compilateur adapté à la famille des processeurs 80X86. Cette deuxième version de VENDIS-FS fonctionne sur un PC avec un processeur 80486 - 33 MHz avec des temps de calcul aussi courts, sinon moins, qu'avec le T800.

Indépendamment du matériel utilisé, la durée d'une simulation dépend de la complexité du réseau, du pas de temps choisi (à chaque pas de temps un calcul complet d'aéragage est fait) et de la localisation de l'incendie. A titre d'exemple, une simulation d'incendie de 30 minutes, faite pour un réseau tel que celui de la mine de Bierzo décrit § 4.3 (32 branches, 43 nœuds), se fait en moins de 1 minute; avec le réseau de la mine de Gardanne (180 branches, 268 nœuds) le temps de calcul est de l'ordre de 5 minutes.

4 - CALAGE DU MODÈLE.

On a vu, dans le chapitre précédent, qu'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices avaient été adoptées lors de l'écriture du modèle d'incendie. Ces simplifications ont été adoptées, soit pour diminuer les temps de calcul, soit parce que l'influence de certains paramètres a semblé négligeable.

Ces simplifications rendent nécessaires, dans ces conditions, une validation du programme et éventuellement des ajustements dans ce dernier. Dans le but de caler ce modèle la démarche suivante avait été envisagée :

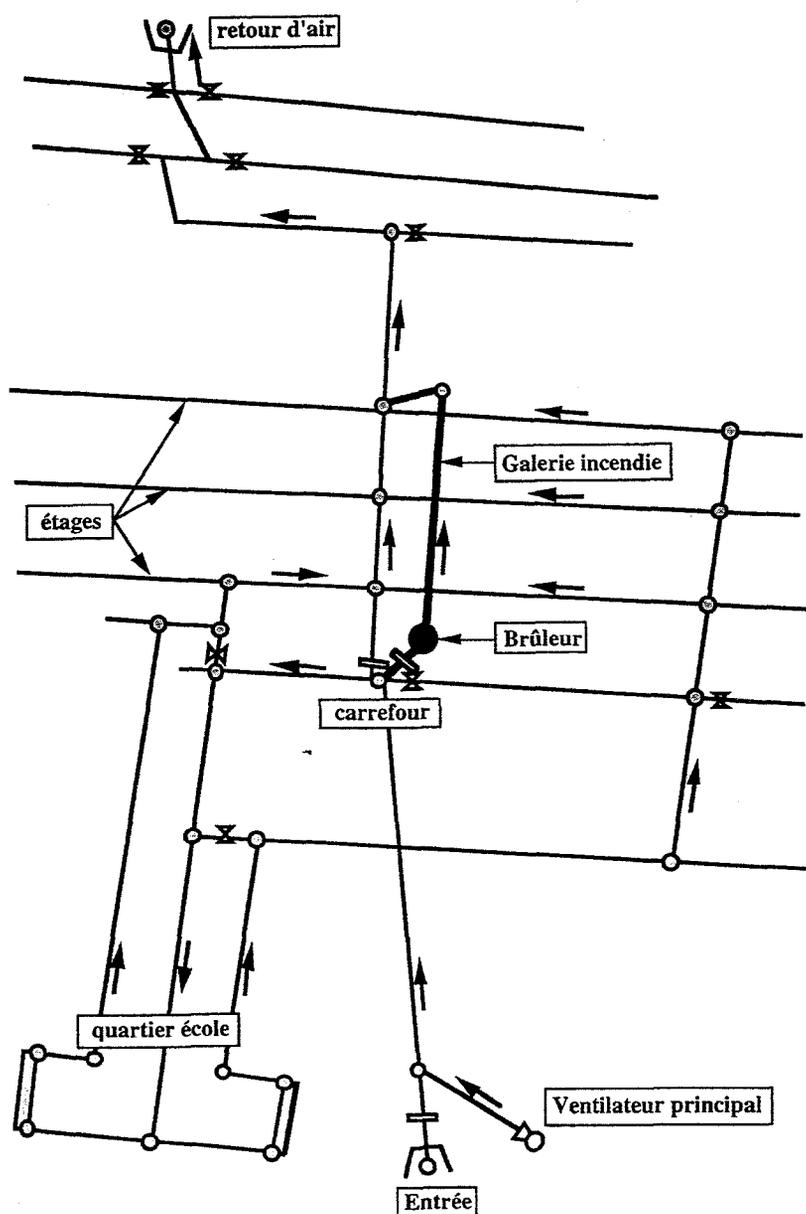
- Choix d'une mine ;
- Etude et calcul d'aéragage de la mine ;
- Simulation numérique d'un incendie à l'aide de VENDIS-FS ;
- Incendie dans la mine avec enregistrement de différents paramètres ;
- Comparaison de la simulation et des enregistrements ;
- Calage du modèle.

4.1 Choix d'une mine.

Le premier problème à résoudre a été celui du choix de la mine. Bien évidemment aucun exploitant de mine n'est prêt à mettre à disposition une mine pour que l'on y allume un incendie en vraie grandeur, même contrôlé. Ce problème a été résolu dans le cadre d'une collaboration avec AITEMIN, qui avait un projet complémentaire de celui de l'INERIS, dans le cadre de la convention CÉCA n° 7262/31/249/14.

AITEMIN a obtenu l'autorisation de procéder à des essais d'incendie en vraie grandeur dans la mine école de Bierzo. Cette mine se trouve dans le village de La Ribera de Folgoso (Province de Léon - Espagne), entre Astorga et Ponferrada.

C'est une ancienne houillère dont l'exploitation a été arrêtée en 1986, située à flanc de coteau. La galerie d'entrée située sur le versant nord atteint au toit la veine de charbon (puissance : 0,4 m, pendage : 25 %) au niveau d'un carrefour principal et se prolonge par un plan en couche. A partir de ce plan, des voies situées de part et d'autre, délimitent des niveaux d'exploitation. L'étage supérieur est relié au jour, par une série de galeries et des ouvertures sur le versant sud de la colline. Toute la partie de la mine décrite ci-dessus a été exploitée, les quartiers écoles se trouvent en aval pendage par rapport au carrefour principal. Mise à part la galerie d'entrée toute les voies sont en couche, et dans la zone exploitée il reste du charbon, aussi il n'était pas possible de trouver un ouvrage dans lequel aurait pu être réalisé un incendie. Dans ces conditions la seule solution a été de faire creuser une galerie au rocher, spécialement pour les simulation d'incendies à l'aide d'un brûleur au propane. Cette galerie incendie, d'une centaine de mètres de long ($S = 9 \text{ m}^2$) a été creusée à partir du carrefour principal et reliée au plan de retour d'air par un bure de 35 mètres de haut ($S = 7 \text{ m}^2$).



4.2 Simulation numérique d'un incendie avec VENDIS-FS.

Toutes les simulations numériques de l'influence d'un incendie sur l'aéragé ont été faites en partant de la situation de base décrite ci-dessus.

Un incendie d'une puissance de 4 MW dans la galerie incendie a été simulé pendant une durée de 30 minutes et, toutes les 30 secondes, l'évolution de la température de l'air et du débit, dans cette galerie, le bas du plan, le retour d'air du bure et la galerie d'entrée, ont été enregistrés.

Si l'on regarde les résultats on voit, qu'avec les hypothèses retenues, on obtient un arrêt du débit d'air dans la branche parallèle à celle dans laquelle se développe l'incendie. Avec une puissance thermique plus grande ou un débit global d'air plus faible on aurait sans doute observé une inversion d'air dans le plan, suite à un tirage thermique plus important dans le bure.

Essais préliminaires.

Des essais préliminaires ont pu être réalisés les 12 et 13 mars 1994. Leur but était de vérifier le bon fonctionnement de l'ensemble en situation réelle de fonctionnement du brûleur.

L'installation est pilotée à l'aide d'un programme, écrit par AITEMIN, depuis un micro-ordinateur installé dans un bureau à l'extérieur de la mine. Un écran dédié affiche un synoptique de la mine ainsi que la valeur instantanée des différents paramètres :

- caractéristiques de fonctionnement du brûleur,
- caractéristiques de fonctionnement du ventilateur,
- réglages des portes,
- température de l'air,
- vitesse de l'air,
- teneur en CO, CO₂, C_xH_x, NO, NO₂

Le brûleur, le ventilateur et les portes peuvent être réglés à partir du micro-ordinateur.

On peut aussi afficher sur l'écran la galerie incendie avec la valeur des températures de l'air et des terrains en différents points.

Les essais préliminaires avaient pour but de vérifier la pilotabilité de l'installation à partir du micro-ordinateur et, à ce titre, ont été tout à fait concluants.

- Mise en régime de la ventilation à débit maximal (100 %), portes ouvertes (100 %) ;
- Mise en service du brûleur à sa puissance maximale (100 %) ;
- Observation de l'évolution pendant 2 heures ;
- Diminution du régime de ventilation jusqu'à observer une inversion d'aéragé dans le plan ;
 - Diminution du régime de ventilation (90 %) ;
 - Observation de l'évolution pendant 20 minutes ;
 - Diminution du régime de ventilation (80 %) ;
 - Observation de l'évolution pendant 20 minutes ;
 - Diminution du régime de ventilation (70 %) ;
 - Observation de l'évolution pendant 20 minutes ;
- Fermeture progressive de la porte en amont incendie jusqu'à supprimer l'inversion ;
 - Porte fermée à 50 % ;

- Porte fermée à 60 % ;
- Porte fermée à 70 % .

Cette première série d'essais a montré qu'actuellement la mise en évidence de l'inversion de l'aéragé dans le plan n'était pas facile. Nous avons pu suivre en temps réel l'indication de l'anémomètre placé dans le plan. La vitesse ponctuelle de l'air, qui au départ était de l'ordre de 3 m/s, est descendue progressivement, en fluctuant, à 0 m/s. L'anémomètre n'étant pas bi-directionnel nous n'avons pas pu enregistrer un débit descendant dans le plan. Cependant la température, au voisinage de l'anémomètre, qui était de l'ordre de 8 °C est montée progressivement à 12 °C. Ceci est dû, sans aucun doute, à l'inversion d'aéragé dans le plan, entraînant des gaz chauds vers le bas depuis la sortie du bure. Nous avons arrêté alors la baisse du régime de ventilation.

Les essais ont aussi été perturbés par les fuites d'aéragés par les vieux travaux en partant des 2 niveaux d'exploitation compris entre le bas du plan et le bure. Des toiles plastiques ont été mises en place pendant l'essai mais des vérifications devront être faites. Il n'est malheureusement pas possible de réaliser des barrages étanches, l'un des niveaux servant de retour d'air du quartier école.

Ces essais ont montré que la puissance thermique du brûleur était légèrement supérieure à celle prise en compte dans notre simulation numérique. De même, le point de fonctionnement du ventilateur était supérieur à celui escompté. Il sera par conséquent nécessaire de reprendre la simulation numérique avec la puissance thermique réelle et la bonne vitesse de rotation du ventilateur afin de pouvoir faire des comparaisons et envisager un calage éventuel du modèle numérique.

Un phénomène, non prévu par VENDIS-FS, a cependant été mis en évidence. Le brûleur ayant fonctionné pendant plus de 2 heures le premier jour des essais a été arrêté jusqu'au lendemain, mais non la ventilation. Le lendemain matin, la température en voûte de la galerie était encore supérieure à 100 °C.

4.3 Comparaison de la simulation numérique et des enregistrements

Les essais en vraie grandeur ont été réalisés trop tard pour que leurs résultats puissent être comparés aux prévisions faites avec VENDIS-FS. D'autre part ces essais ont été faits dans des conditions légèrement différentes de celles prévues à l'origine et certains capteurs doivent encore être vérifiés et calibrés.

Malgré ces deux dernières réserves, on peut affirmer que l'ordre de grandeur des phénomènes observés est du même ordre que celui prévu. Il faut cependant noter l'écoulement stratifié en aval du brûleur (avec un écart important de températures entre la voûte et le sol) qui ne peut être modélisé avec VENDIS-FS.

4.4 Calage du modèle.

Compte tenu de la date tardive de la mise en service du ventilateur principal de ventilation et du brûleur dans la mine de Bierzo, et donc de l'impossibilité de comparer les simulations numériques et les simulations en vraie grandeur d'incendies, il n'a pas été possible de procéder à un calage du modèle développé. Il faut cependant dire qu'un travail très important a été fait, aussi bien dans la mise au point du modèle, que pour la réalisation d'un outil expérimental dans la mine de Bierzo (AITEMIN). Il serait nécessaire maintenant, si l'on veut conclure convenablement l'étude entreprise, de pouvoir exploiter cet outil de manière à caler si nécessaire VENDIS-FS.

4.5 Simulation en vraie grandeur d'un incendie dans la mine.

L'incendie dans la mine devait être simulé au moyen d'un brûleur à propane placé dans la galerie "incendie".

Ce brûleur, monté par AITEMIN, devait permettre un débit de propane $q = 500$ l/h, soit une puissance thermique Φ

$$\Phi = \rho \cdot q \cdot c = 3,7 \text{ MW}$$

(avec un propane industriel de masse volumique $\rho = 0,535$ kg/m³ et un pouvoir calorifique $c = 11900$ kcal/kg).

En fait, les premiers essais réalisés en avril 1994 ont montré que l'on obtenait une puissance de plus de 5 MW, calculée à partir de l'indication d'un débitmètre massique.

Il avait été prévu d'enregistrer un certain nombre de paramètres, dans la mine, pendant le déroulement d'un incendie.

Certains de ces paramètres (vitesse, température) devaient pouvoir être comparés aux valeurs calculées avec VENDIS-FS, d'autres devaient pouvoir être utilisés dans le cadre d'un développement ultérieur de ce logiciel (teneurs en CO, CO₂, O₂ et températures dans les terrains).

5 - CONCLUSIONS

L'INERIS a développé un modèle de simulation numérique d'incendie et l'a couplé à un logiciel de calcul de ventilation, pour les ouvrages miniers souterrains, VENDIS-FS. Ce logiciel permet, dans un premier temps, le calcul de l'aéragé d'une mine puis, dans un second temps, le calcul de l'effet d'un incendie sur cet aéragé. Il est possible, dans ces conditions, de connaître en fonction du temps les perturbations provoquées par un incendie sur l'aéragé d'une mine (les exploitations par chambres et piliers sont exclues).

VENDIS-FS est un logiciel interactif, fonctionnant sur micro-ordinateur avec affichage du plan de la mine sur un écran graphique couleur. Il permet de suivre en fonction du temps, l'évolution des débits et des températures.

Certaines hypothèses simplificatrices ont été adoptées de manière à ce que les temps de calculs soient "raisonnables", et peuvent d'ailleurs être justifiées. Il en est ainsi de la conductibilité thermique dans les terrains, et la monodimensionnalité de l'écoulement. Cette dernière hypothèse en particulier, si elle est tout à fait légitime à une distance suffisante du foyer pour que le mélange soit homogène, ne permet pas de mettre en évidence la complexité des écoulements de gaz au voisinage du foyer. Cette limitation interdit les calculs d'incendie en aéragé descendant, cas particulièrement défavorable dans lequel on peut observer à la fois un écoulement d'air frais descendant au daisne en même temps qu'une remontée de gaz chauds en voûte.

Pour valider le logiciel VENDIS-FS, l'INERIS en collaboration avec AITEMIN a entrepris des simulations d'incendie dans la mine école de Bierzo. Cette ancienne houillère (Espagne) dont l'exploitation a été arrêtée en 1986 a été équipée par AITEMIN (dans le cadre d'une Convention CECA) de manière à pouvoir y simuler des incendies à l'aide d'un brûleur à propane et y mesurer en différents points le débit, la température, les teneurs en CO, CO₂, NO, NO₂, O₂. La puissance thermique du brûleur atteint 5 MW.

Le programme de travail devait nous conduire à comparer les prévisions faites à l'aide de VENDIS-FS, et les résultats des essais, de manière à juger de la validité du logiciel et l'adapter si nécessaire.

Les circonstances ont rendu impossibles toute comparaison entre les prévisions et la réalité, et encore moins le calage éventuel du modèle. Cependant les essais entrepris en avril 1994 ont permis de constater qu'en première approximation les effets provoqués par la mise en service du brûleur étaient du même ordre que ceux prévus pour un cas peu différent avec VENDIS-FS.

L'INERIS dispose donc d'un logiciel, facile à mettre en œuvre, et AITEMIN dispose d'un site remarquable pour simuler en vraie grandeur des incendies dans une galerie de mine. Ces deux outils complémentaires peuvent être utilisés par les mines et entreprises de travaux souterrains de l'union européenne :

- pour compléter et préciser les résultats obtenus conformément au programme de travail initialement prévu,
- pour étudier des problèmes précis les concernant.