



HAL
open science

Sur l'aéragé naturel des anciennes galeries de mines en zone montagneuse : expérimentation et modélisation

Nicolas Florsch, C. Beghein, Baudouin Lismonde, Pascal Clerc

► To cite this version:

Nicolas Florsch, C. Beghein, Baudouin Lismonde, Pascal Clerc. Sur l'aéragé naturel des anciennes galeries de mines en zone montagneuse : expérimentation et modélisation. *Archeosciences, revue d'Archéométrie*, 2002, 26 (1), pp.47-65. 10.3406/arsci.2002.1023 . hal-00261383

HAL Id: hal-00261383

<https://hal.science/hal-00261383>

Submitted on 9 Feb 2021

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Sur l'aéragé naturel des anciennes galeries de mines en zone montagneuse : expérimentation et modélisation.

Nicolas Florsch, Claudine Wehrli, Baudouin Lismonde, Patrick Clerc

Citer ce document / Cite this document :

Florsch Nicolas, Wehrli Claudine, Lismonde Baudouin, Clerc Patrick, ASEPAM - Association Spéléologique pour l'Etude et la Protection des Anciennes Mines. Sur l'aéragé naturel des anciennes galeries de mines en zone montagneuse : expérimentation et modélisation. . In: Revue d'Archéométrie, n°26, 2002. pp. 47-65;

doi : <https://doi.org/10.3406/arsci.2002.1023>

https://www.persee.fr/doc/arsci_0399-1237_2002_num_26_1_1023

Fichier pdf généré le 07/01/2019

Résumé

L'aérage des anciennes mine était crucial pour le travail du mineur d'autrefois. Dans la plupart des régions montagneuses, les galeries étaient équipées de puits d'aérage. Cependant, le percement d'un puits n'était pas entrepris d'emblée et de nombreuses galeries courtes sont dépourvues de tels systèmes. C'est alors la ventilation naturelle, convective, qui assure le renouvellement de l'air. Il semble qu'au delà d'une distance seuil, l'aérage naturel n'est pas pour renouveler l'air vicié. Nous abordons ici le fonctionnement physique d'une galerie horizontale de mine par trois méthodes quantitatives. D'abord, l'approche expérimentale, fondée sur l'ajustement empirique, donne une première expression de la vitesse de l'air dans la galerie en fonction du contraste de température intérieur-extérieur. Cela permet de quantifier le taux de renouvellement d'air respirable et précise la distance (de l'ordre de 50 m) à partir de laquelle l'aérage devient un réel problème. Ensuite, un calcul théorique précise cette loi sous la forme : (voir article) où $T(\text{ext})$ et $T(\text{fond})$ sont les températures à l'extérieur et en fond de mine, g est l'accélération de la pesanteur, H la hauteur de la galène et x la distance depuis son entrée. Enfin, on aborde ce problème aérodynamique grâce à un code d'éléments finis industriel, approche qui valide le fonctionnement qualitatif du système, sans aboutir toutefois à la convergence en raison, sans doute, du fort découplage entre l'extérieur de la mine et le fond de la galerie.

Abstract

In the past, it was crucial to ventilate the old mines, in order to make the miners' work possible. In most mountainous areas, the galleries were equipped with ventilation shafts. However, in many short galleries, such shafts were not bored and air removal was achieved thanks to natural ventilation. It seems that beyond a critical distance, natural ventilation is no longer efficient and the turnover of breathable air is not achieved. The work presented here deals with the physical analysis of air removal in a horizontal mine gallery, using three quantitative approaches. In the first approach, air velocity and temperature measurements were used to establish an empirical expression of the air velocity within the gallery with respect to the temperature difference between the inner and the outer air. This law quantifies the breathable air change rate and gives the distance (of about 50 meters) above which ventilation does not work anymore. The second approach is based on a theoretical analysis which yields the following expression of the air velocity, where $T(\text{out})$ and $T(\text{end})$ are respectively the temperatures outside and at the end of the gallery, g is the gravitational acceleration, H is the gallery height and x is the distance from the gallery entry. In the last approach, the flow field is solved with a commercial CFD (Computational Fluid Dynamics) code based on the finite volume method. Although convergence was not actually reached due to the strong dynamic uncoupling effect between the inner and the outer parts of the gallery, the qualitative results computed with this code are in agreement with the previous ones.

SUR L'AÉRAGE NATUREL DES ANCIENNES GALERIES DE MINES EN ZONE MONTAGNEUSE : EXPÉRIMENTATION ET MODÉLISATION

Nicolas FLORSCH^(1,5), Claudine BEGHEIN⁽²⁾, Baudouin LISMONDE⁽³⁾, Patrick CLERC^(4,5)
et ASEPAM⁽⁵⁾

Résumé : L'aérage des anciennes mines était crucial pour le travail du mineur d'autrefois. Dans la plupart des régions montagneuses, les galeries étaient équipées de puits d'aérage. Cependant, le percement d'un puits n'était pas entrepris d'emblée et de nombreuses galeries courtes sont dépourvues de tels systèmes. C'est alors la ventilation naturelle, convective, qui assure le renouvellement de l'air. Il semble qu'au delà d'une distance seuil, l'aérage naturel n'est pas suffisant pour renouveler l'air vicié. Nous abordons ici le fonctionnement physique d'une galerie horizontale de mine par trois méthodes quantitatives. D'abord, l'approche expérimentale, fondée sur l'ajustement empirique, donne une première expression de la vitesse de l'air dans la galerie en fonction du contraste de température intérieur-extérieur. Cela permet de quantifier le taux de renouvellement d'air respirable et précise la distance (de l'ordre de 50 m) à partir de laquelle l'aérage devient un réel problème. Ensuite, un calcul théorique précise cette loi sous la forme :

$$v = \sqrt{\frac{T_{\text{ext}} - T_{\text{fond}}}{T_{\text{fond}}}} \left| g \frac{H}{2} \exp\left(-\frac{x}{4H}\right) \right|,$$

où T_{ext} et T_{fond} sont les températures à l'extérieur et en fond de mine, g est l'accélération de la pesanteur, H la hauteur de la galerie et x la distance depuis son entrée. Enfin, on aborde ce problème aérodynamique grâce à un code d'éléments finis industriel, approche qui valide le fonctionnement qualitatif du système, sans aboutir toutefois à la convergence en raison, sans doute, du fort découplage entre l'extérieur de la mine et le fond de la galerie.

Abstract : In the past, it was crucial to ventilate the old mines, in order to make the miners' work possible. In most mountainous areas, the galleries were equipped with ventilation shafts. However, in many short galleries, such shafts were not bored and air removal was achieved thanks to natural ventilation. It seems that beyond a critical distance, natural ventilation is no longer efficient and the turnover of breathable air is not achieved. The work presented here deals with the physical analysis of air removal in a horizontal mine gallery, using three quantitative approaches. In the first approach, air velocity and temperature measurements were used to establish an empirical expression of the air velocity within the gallery with respect to the temperature difference between the inner and the outer air. This law quantifies the breathable air change rate and gives the distance (of about 50 meters) above which ventilation does not work anymore. The second approach is based on a theoretical analysis which yields the following expression of the air velocity,

$$v = \sqrt{\frac{T_{\text{out}} - T_{\text{end}}}{T_{\text{end}}}} \left| g \frac{H}{2} \exp\left(-\frac{x}{4H}\right) \right|,$$

where T_{out} and T_{end} are respectively the temperatures outside and at the end of the gallery, g is the gravitational acceleration, H is the gallery height and x is the distance from the gallery entry. In the last approach, the flow field is solved with a commercial CFD (Computational Fluid Dynamics) code based on the finite volume method. Although convergence was not actually reached due to the strong dynamic uncoupling effect between the inner and the outer parts of the gallery, the qualitative results computed with this code are in agreement with the previous ones.

Mots-clés : Aérage, mine, modélisation.

Key-words : Ventilation, mine, modelling.

(1) UMR 7619 « Sisyphé », Université Pierre et Marie Curie, Paris, florsch@ccr.jussieu.fr et UMR 5060 « Archéomatériaux », Université Technologique de Belfort-Montbéliard.

(2) Laboratoire d'Etude des Phénomènes de Transferts Appliqués aux Bâtiments (LEPTAB), Université de La Rochelle.

(3) Laboratoire d'Écoulements Géophysiques et Industriels (LEGI), Université Joseph Fourier, GRENOBLE.

(4) INRAP, Base de Moulin-lès-Metz.

(5) Association Spéléologique pour l'Étude et la Protection des Anciennes Mines, 4 rue Weisberger, 68160 SAINTE-MARIE-AUX-MINES.

INTRODUCTION

La ventilation des mines constituait l'une des préoccupations techniques majeures pour les mineurs d'autrefois, au même titre que l'exhaure. Certaines iconographies (Agricola, 1556) montrent des systèmes relativement sophistiqués de soufflets (actionnés de diverses manières), de ventilateurs et de conduits acheminant l'air frais au fond des galeries. Dans les pays montagneux, les mineurs savaient tirer parti des dénivelés et perceaient souvent des puits d'aéragage qui mettaient en œuvre un « effet de cheminée ». Dans le Massif Vosgien, par exemple, la grande majorité des mines comportaient des puits d'aéragage tandis qu'il ne reste guère de traces d'autre système mécanique. Le percement d'un puits nécessitait au départ un investissement non négligeable, mais permettait ensuite l'économie d'une énergie mécanique artificielle.

Vers la fin des années 80, Grandemange (1988) décrit nombre de systèmes rencontrés dans les Vosges, sans toutefois aborder la modélisation physique ou l'expérimentation. Dans tous les cas, l'effet de cheminée est exploité grâce à un puits d'aéragage. La plupart du temps, c'est un système de faux plafond en bois, ajusté dans la partie sommitale de la galerie, qui assure l'acheminement de l'air vers le fond. Dans quelques cas, les anciens perceaient une deuxième galerie dédiée à cette fonction.

Une première étude *quantitative* sur le fonctionnement de l'aéragage des anciennes mines en milieu montagneux, effectuée entre 1992 et 1995, concernait l'aéragage dans les systèmes pourvus de puits et d'un faux plafond. Lors de cette étude, l'ASEPAM a reconstitué en grandeur nature un système opérationnel de ventilation. Parallèlement, nous avons entrepris une étude physique du phénomène de ventilation fonctionne même lors des écarts de température intérieur-extérieur faibles, ce qui devait permettre le travail sous terre toute l'année (on pensait auparavant qu'il pouvait y avoir interruption aux intersaisons).

Suite aux résultats encourageants de cette première étude, de nombreuses questions ont émergé, qui concernent à la fois le fonctionnement physique des systèmes et les implications socio-économiques du fonctionnement de l'aéragage. Dans ce papier, nous étudions le comportement de l'air dans une galerie *sans puits d'aéragage*, telle qu'elle se présente par exemple au début du percement.

I - GÉNÉRALITÉS

Dès 1968, P. Fluck, T. Vincent et d'autres chercheurs ont abordé la « climatologie souterraine » des anciennes mines (Fluck, 1985). Certes, les études abondent bien avant cette date pour le milieu karstique (avec une quantification, par la mesure, de certains paramètres, et une approche souvent qualitative de la physique déterminant les phénomènes étudiés) et il existe un savoir-faire du mincur moderne (le plus souvent en ventilation forcée), mais ils concernent des milieux si différents d'une mine du XVI^e s. qu'il peut être imprudent de vouloir en tirer, sans étude supplémentaire, des enseignements utiles à l'archéologie minière.

Les premiers résultats obtenus par des mesures de tem-

pérature dans les mines du « Val d'Argent » (vallée de Sainte Marie-aux-Mines, Haut-Rhin) par ces pionniers semblent indiquer qu'il existe une « distance de blocage » dans l'aéragage naturel, c'est-à-dire une distance au-delà de laquelle l'air ne circule plus dans la mine et donc n'est pas renouvelé. En effet, c'est toujours le gradient vertical de température qui constitue le *moteur* de la circulation. En hiver, par exemple, l'air extérieur est réchauffé dans la mine et tend à monter, si bien qu'un système d'aspiration se met en place : de l'air froid rentre dans la mine, circulant dans sa partie inférieure. Au fur et à mesure, il se réchauffe et il arrive un moment (ou plutôt une distance) où il va s'élever et inverser son sens de circulation, tout en continuant à se réchauffer (son sens s'inverse car il faut bien qu'il ressorte de la galerie). Finalement, il ressort de la mine en léchant le plafond et s'élève à l'extérieur, dans l'atmosphère plus froide. Or, si la galerie est assez longue, la limite -précise ou floue- où s'inverse le courant d'air est déterminée essentiellement par le gradient de température qui ne cesse de décroître au fur et à mesure que l'on s'enfonce dans la galerie, d'où un possible arrêt de la ventilation passé une certaine distance, le moteur thermique perdant de son efficacité. Grâce aux mesures de Fluck et Vincent, un ordre de grandeur de cette « distance de blocage » a même pu être estimée : elle est de l'ordre d'une cinquantaine de mètres. Agricola lui-même (1556) donne de telles distances. Il indique par exemple que si l'on dispose d'une galerie parallèle située au-dessus de la galerie d'exploitation, il convient de les faire communiquer tous les 200 pieds. En réalité, la notion même de distance de blocage est plutôt mal posée ; cette étude montre en effet qu'il n'y a pas de blocage réel, mais un passage rapide sous un seuil critique, au-delà d'une distance critique qui dépend des conditions thermiques.

Il est facile d'imaginer que la supposée distance de blocage peut être très dépendante de l'écart de température intérieur-extérieur. Il vient alors la question : y avait-il des périodes de l'année où l'aéragage naturel était si peu efficace qu'il fallait que le mineur interrompe son travail ? On verra que c'est une idée reçue. Une deuxième question peut être posée immédiatement : à partir de quel moment fallait-il recourir à un système d'aéragage plus artificiel, ou, autrement dit, à partir de quel moment fallait-il investir dans un puits d'aéragage ? C'est ici d'un problème de gestion de la mine qu'il s'agit, puisqu'un système de ventilation représente pour le concessionnaire un investissement et donc un risque importants.

Pour répondre à cette dernière question, nous avons tout d'abord effectué une étude statistique sur les longueurs de galerie. Cette étude est limitée en terme de signification du fait du faible échantillonnage dont nous disposons, issu des topographies effectuées durant les années 60 à 80 par Fluck et divers autres auteurs (la plupart des topographies ont été publiées au fil des numéros de la revue « Pierres et Terres »). Le résultat montre néanmoins que les galeries se répartissent en deux groupes (fig. 1). Le premier concerne justement les galeries de longueur inférieure à une cinquantaine de mètres, qui constituent un bloc bien différencié sur l'histogramme. Il s'agit de galeries sans système de puits. Un deuxième groupe est dispersé (les longueurs sont très variables) et concerne des galeries avec puits. Par ailleurs, les difficultés du percement comme le temps accordé à un investisseur minier pour entreprendre sa recherche sont certainement déterminants pour une telle statistique : il peut

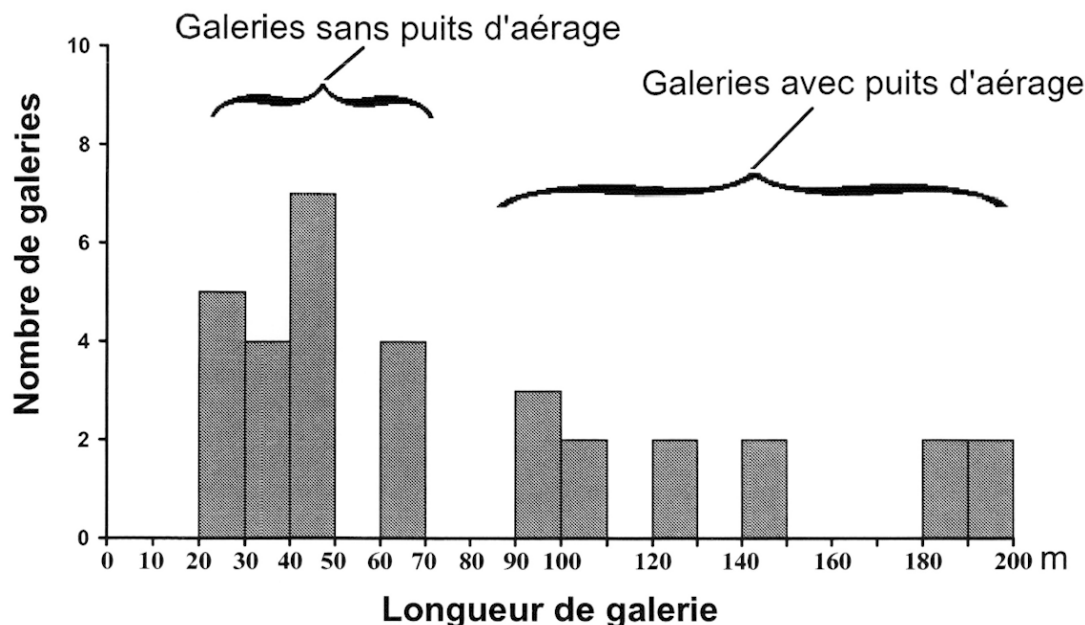


Fig. 1 : Statistique sommaire sur les longueurs de mines. On observe une accumulation sous la cinquantaine de mètres, qui correspond aux mines qui ne sont pas (encore) pourvues de puits d'aéragage.

y avoir un effet d'accumulation sur les petites longueurs bien difficile à quantifier. Enfin, les galeries de mines sont repérées sur le terrain par leurs haldes, et ces dernières, peu importantes pour les galeries courtes, peuvent être devenues insignifiantes du fait du colluvionnement très dynamique qui est propre aux zones montagneuses.

C'est pour avancer sur ces questions que nous avons proposé une campagne d'expérimentation. Nous en présentons ici les résultats, obtenus en 1998 dans une mine de Sainte-Marie-aux-Mines, ainsi que les approches théoriques qui ont suivi cette campagne.

II - APPROCHE EXPÉRIMENTALE

Les grandes lignes de la physique en jeu sont correctement décrites par le couple vitesse-température de l'air. La densité de l'air dépend principalement de la température, *via* la loi des gaz parfaits, et les contrastes qui l'affectent sont à l'origine de la pression d'Archimède qui organise les mouvements. L'humidité (eau présente dans la galerie) peut jouer un rôle important en modifiant par condensation/évaporation les échanges de chaleur à l'intérieur de la mine. Nous avons choisi de ne pas en tenir compte. Non pas que nous estimons que ce rôle puisse être négligeable, mais parce qu'il nous a semblé pertinent d'aller du plus simple au plus compliqué, et que le plus simple est déjà bien assez complexe pour mériter qu'on ne s'intéresse qu'à lui dans un premier temps. Si on minimise ces échanges thermiques, on minimise peut-être l'efficacité du mécanisme, ou bien au contraire un « effet tampon ». Cela ne concerne que la modélisation, puisque l'expérimentation comporte *de facto* les effets de l'humidité. Autrement dit, on s'attend à ce que le modèle soit un peu différent de la réalité dans le cas d'une mine « mouillée » (mais identique dans le cas d'une mine sèche).

Le moteur de tout le système d'aéragage est thermique : l'air chaud monte, l'air froid descend. Si l'intérieur de la mine (les parois) est à la même température que l'atmosphère externe, il n'y a pas de circulation d'air. Le para-

mètre fondamental est donc la différence de température entre l'extérieur et la température du fond de la mine. On peut désigner cette différence par le terme « forçage », que l'on notera F dans la suite.

La quantité F (forçage), valant :

$$F = T_{\text{externe}} - T_{\text{fond de mine}}$$

est le moteur de l'aéragage naturel des mines sans puits.

Notons que l'étude théorique qui a suivi le travail expérimental et qui est présenté plus loin montre qu'il est plus exact de normaliser F avec la température du fond de la mine. La suite montre plus précisément que le « moteur » est bien quantifié par la grandeur $F = \sqrt{(T_{\text{ext}} - T_{\text{fond}}) / T_{\text{fond}}}$.

Toutefois, l'étude expérimentale a été effectuée sans *a priori* théorique.

Les objectifs initiaux sont donc les suivants :

- établir une loi donnant la vitesse de l'air en fonction du forçage F , pour toute profondeur dans la mine (entendre par profondeur : distance à l'entrée, les mines concernées par cette étude étant horizontales).
- clarifier la notion de « distance de blocage » et en obtenir, le cas échéant, une estimation et enfin en tirer quelques conclusions socio-économiques, si possible.

II.1 - CHOIX DU SITE EXPÉRIMENTAL : LA « MINE SANS NOM » ET SON CONTEXTE ARCHÉOLOGIQUE

Parce qu'elle est une mine sans puits, relativement accessible, et sans grand potentiel archéologique (*a priori*), nous avons choisi d'étudier l'aéragage naturel dans la mine « Sans Nom » (déjà nommée ainsi au XIXe s.). Elle se trouve près de St Pierre-sur-l'Hâte, dans la vallée de Sainte-Marie-aux-Mines (Haut-Rhin), au bord du ruisseau, à la cote 600 (coord. Lambert : $x=959,475$ $y=69,390$). Cette mine a été topographiée durant l'âge

d'or de la spéléologie par P. Fluck. La figure 2 donne sa localisation et sa topographie.

Cette mine est proche du complexe des «Mines de Plomb», au sud du massif de l'Altenberg qui fut principalement exploité dans la première moitié du XVI^e s. Elle n'est en réalité qu'une galerie de recherche creusée depuis la surface en direction du Nord-Est, suivant une fracture au faible pendage et très légèrement minéralisée, mais qui reste totalement stérile. Son origine est clairement établie au XVI^e s. du fait des traces de creusement à la pointerolle laissées tout le long du conduit souterrain, sur les parois et au plafond. Elles restent encore très visibles mais ne montrent pas de trace de l'existence d'un faux plafond. En effet aucune petite encoche creusée dans les parois, à une vingtaine de centimètres du plafond et symétriquement opposée l'une à l'autre, n'a été observée. Une petite reprise de creusement a été remarquée sans doute au XVII^e ou XVIII^e s. lors d'une période où de nombreuses galeries sont prospectées et certaines remises en chantier. En effet les quelques traces de «coup de fleuret» laissées notamment au fond et sur un nouveau front de taille, suite à l'utilisation de l'explosif comme méthode de progression, en témoignent. Mais cette retouche ne semble pas avoir donné d'espoir aux chercheurs d'argent qui laissèrent vite la galerie à l'abandon. L'embouchure de la galerie se situe au bord et dans le lit de la rivière. La halde a été très probablement lessivée en grande partie par le même cours d'eau et les nombreuses crues qu'il a connu jusqu'à nos jours.

Avant d'entreprendre l'expérimentation, divers travaux ont été effectués afin de restituer à la mine sa configuration initiale. L'entrée de la mine était encombrée par du tout venant issu des colluvions sus-jacentes. Ces colluvions formaient un bouchon provoquant l'inondation de la galerie. Le nettoyage fut effectué sous contrôle archéologique. Une ancienne voie de roulage a été découverte, dont l'étude fut consignée dans le rapport remis au SRA Alsace (Florsch *et al.*, 1998). Par ailleurs, à une vingtaine de mètres de l'entrée, un éboulement en cloche d'une hauteur de 1,7 m venait obstruer la mine. Cet éboulement, dont on n'a pu établir l'importance qu'une fois la mine vidée de son eau, eût été un sérieux inconvénient pour l'étude de l'aéragé. Un boisage a été donc mis en place, passant cet éboulement et redonnant à la galerie sa section d'origine.

Lors de la fouille de la tranchée d'accès de la galerie, l'essentiel des résultats a été la découverte et la mise au jour de plusieurs morceaux de bois. Dans un premier temps, ils ont été laissés en place pour permettre une observation d'ensemble et pour en effectuer le relevé. Une pièce de jonction de la voie de roulage a pu être datée par dendrochronologie. Le laboratoire ARCHEOLABS indique qu'il s'agit de sapin, la séquence atteignant 87 années et la date de coupe remonte à l'automne-hiver 1567-1568.

La découverte des filons du Neuenberg eût lieu à partir de 1549, c'est-à-dire près de 16 ans avant le creusement probable de cette galerie. Si on estime fiable l'étude dendrochronologique, cette galerie de recherche «Sans Nom» est peut-être consécutive à l'essor engendré par cette fabuleuse découverte qui a sans doute provoqué toute une nouvelle vague de prospection durant la seconde moitié du XVI^e s., même dans des secteurs déjà bien exploités comme l'Altenberg.

II.2 - CONCEPTION ET MISE AU POINT DE L'INSTRUMENTATION

Les paramètres à mesurer sont les températures et les vitesses d'air en différents points de la mine. Il est donc nécessaire d'y installer des thermomètres et des anémomètres. Dans la mesure du possible, il faut éviter de séjourner dans la mine durant les mesures, afin de ne pas perturber les phénomènes, aussi adoptera-t-on un système déporté : sondes à l'intérieur, électronique de mesure à l'extérieur, les signaux étant acheminés par des câblages électriques. Nous disposons de 12 canaux d'acquisition, soit 6 anémomètres et 6 thermomètres. Nous avons choisi de les installer en ligne près du toit pour une première expérience (cela aurait pu être près du sol, mais le résultat de l'un détermine à peu de chose près le résultat de l'autre), soit verticalement dans une section de la galerie. Dans le premier cas, on étudie l'évolution des vitesses et des températures en fonction de l'enfoncement dans la mine (avec l'espoir d'y rencontrer la « distance de blocage »), dans le deuxième, qu'illustre la figure 3, on observe le flux instantané sur une section proprement dite, sans regarder les variations en fonction de la température extérieure.

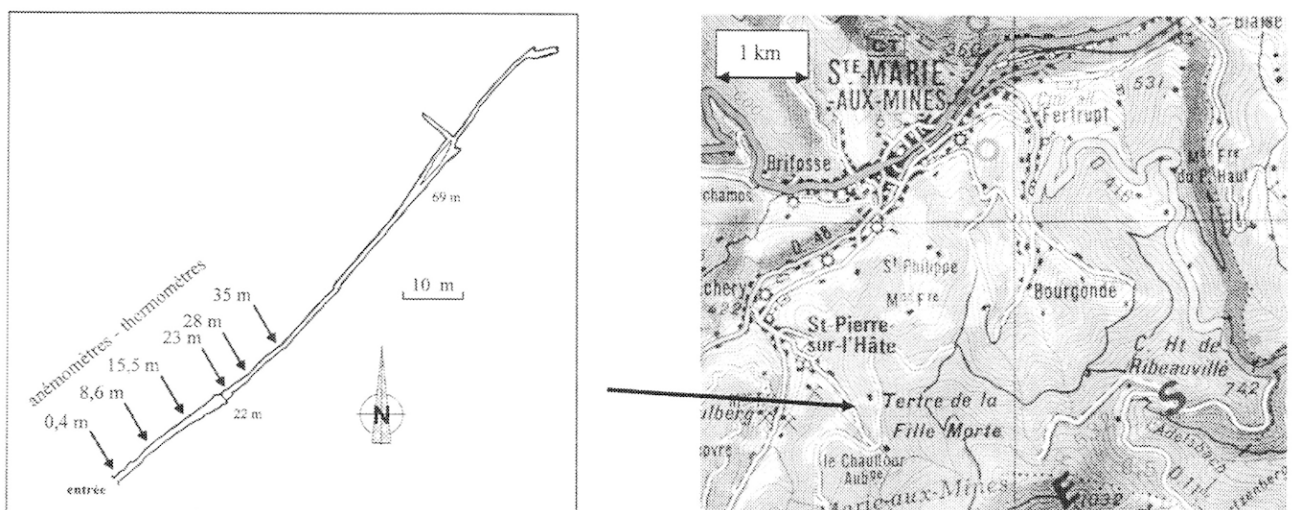
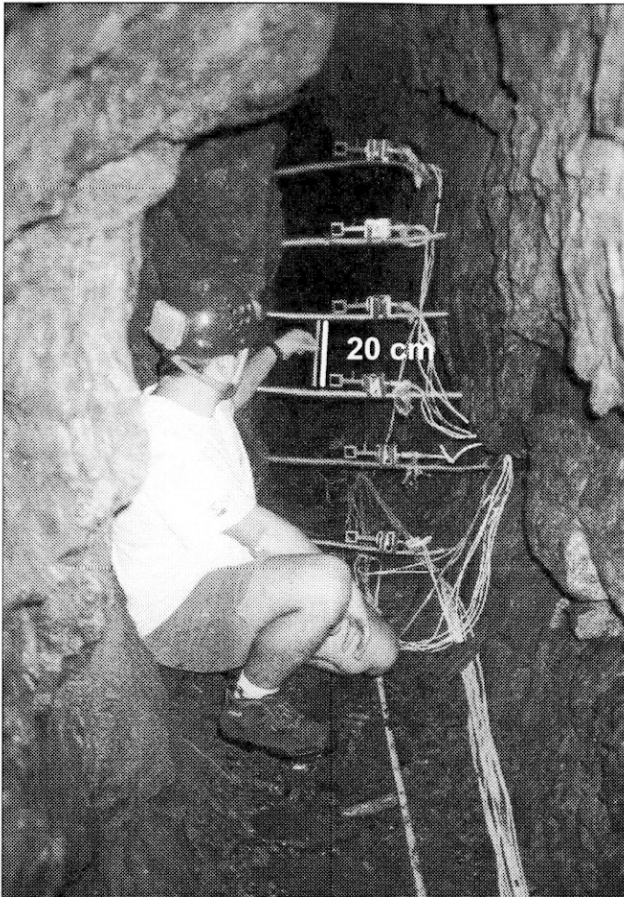


Fig. 2 : Localisation et topographie de la mine « Sans Nom », avec les positions des capteurs utilisés lors de la phase expérimentale de l'étude.



En ce qui concerne les anémomètres, un rapide survol des technologies existantes nous a orienté vers le système « à fil chaud ». Le principe consiste à mesurer le refroidissement d'un fil (platine) sous l'effet du courant d'air. Une étude bibliographique (Asch *et al.*, 1991) et sur Internet nous fournissent les principes techniques de ces appareils. Les thermomètres ont été construits en utilisant des thermistances. Le lecteur trouvera en annexe une brève description de ces instruments, conçus pour cette occasion.

II.3 - IMPLANTATION DES CAPTEURS

Il s'agit avant tout d'étudier les flux d'air à différentes « profondeurs » (distance à l'entrée) dans la mine. Une première implantation des capteurs, jusqu'à 70 m, montre qu'il n'existe pratiquement plus de mouvements d'air à cette profondeur. En tenant compte des possibilités de fixation des capteurs entre les parois, et compte tenu de cette première expérience, les capteurs sont finalement disposés à 0.4 m de l'entrée (pratiquement, c'est l'entrée), 8.6 m, 15.5 m, 23 m, 28 m et 35 m (fig. 2)

L'irrégularité de la galerie ne permet pas un réel contrôle de l'homogénéisation aérodynamique des emplacements de ces capteurs (il faudrait pour cela disposer d'une modélisation qui tiendrait compte de toutes les irrégularités des parois). Autour des anémomètres, on souligne le contour de la paroi d'un trait de craie, ceci afin de pouvoir en estimer la section et de conserver l'allure de cette dernière. Une baguette de bois, de 20 cm de longueur, donne l'échelle. Des photographies, superposées à une grille, permettent alors l'estimation de la section à probablement mieux que 10% près, qui valent, à partir de l'entrée : 1.33, 1.27, 1.57, 1.01, 0.96 et 1.37 m².

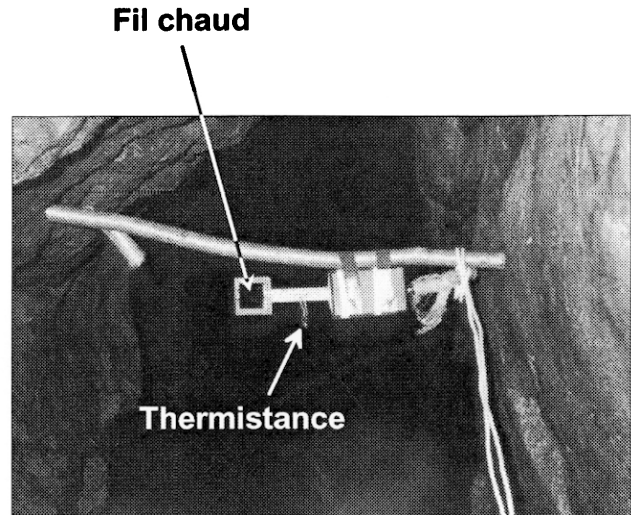


Fig. 3 : Illustration de la mise en place des capteurs dans une section de la galerie et détail. Le bâton donne l'échelle : 20 cm.

II.4 - MISE EN FORME DES DONNÉES

Données de vitesse. Pour les deux capteurs les plus proches de l'entrée, les fluctuations dues à la turbulence se sont avérées importantes. Le flux d'air à 23 m de profondeur était plus important que celui à 15.5 m : cela nous a semblé tout d'abord anormal. Nous avons soupçonné lire là un effet de la section de la galerie : si celle-ci diminue, la vitesse augmente. Pour cette raison, nous avons normalisé les vitesses mesurées en les multipliant par la section de la galerie à l'endroit de la mesure. La grandeur obtenue est alors homogène à un débit. La figure 4 montre les données ainsi corrigées, mais également filtrées à travers un filtre passe-bas de coupure fixée à une heure de période, filtrage qui facilite à la fois la visualisation et l'exploitation ultérieure des données.

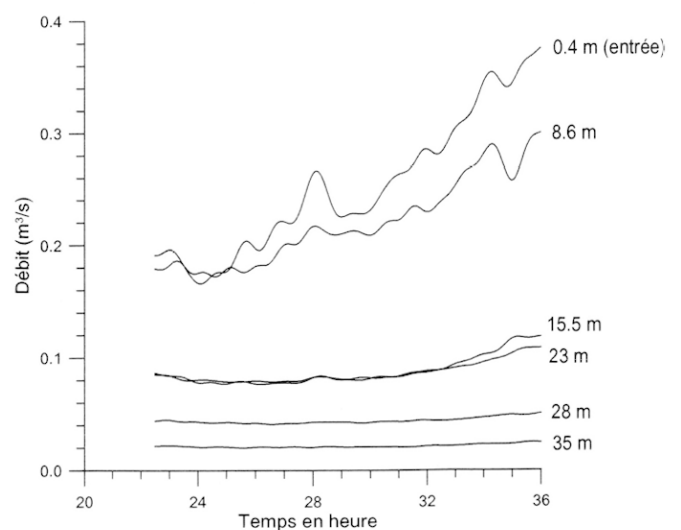


Fig. 4 : Débits relatifs d'air pour différents enfoncements dans la mine. Ils représentent sur ce graphique la vitesse mesurée à environ 40 cm du plafond multipliée par la section de la galerie. Le débit réel vaut environ le quart de cette grandeur. La section étant toujours voisine de 1 m², le débit donné sur la figure représente aussi bien la vitesse réelle de l'air. Pour plus de lisibilité, les données ont été filtrées à l'aide d'un passe-bas de période de coupure d'une heure.

Notons qu'il ne s'agit pas là du débit réel. Pour obtenir ce dernier, il faut tenir compte du profil des vitesses sur l'ensemble de la section, ce qui suppose une maîtrise de ce profil dont on ne dispose pas d'emblée. On peut toutefois, sur la base d'une hypothèse élémentaire, considérer qu'il faut diviser les données obtenues par un facteur de l'ordre de 4 pour estimer ces débits réels. Ainsi, le débit maximum observé durant l'expérience est de l'ordre de $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ à l'entrée de la mine. Par ailleurs, quelques données ont été éliminées, comme lors du passage de visiteurs dans la galerie vers $t=35$ heures (soit environ 11h du matin du deuxième jour).

Données de température. Les données de températures brutes présentent quelques défauts de calibration (ou des effets de pertes le long des lignes ?) défauts qui tiennent dans une fourchette de l'ordre de 1 Kelvin, soit mieux que 0,3%, ce qui n'est pas mauvais compte tenu du caractère quelque peu artisanal de l'expérience. On a, pour les réduire, opéré à une nouvelle inter-calibration en faisant l'hypothèse que les moyennes de la température pour un capteur devaient être proportionnelles aux écarts types de ces signaux. Après filtrage passe-bas à une heure, ces données sont représentées sur la figure 5.

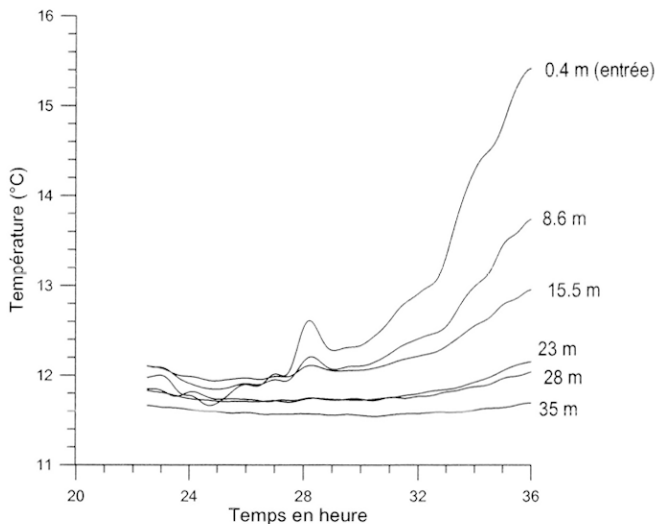


Fig. 5 : Températures pour différents enfoncements dans la mine, filtrées passe-bas à une heure.

II.5 - EXPLOITATION DES RÉSULTATS

Notre objectif est d'obtenir, à partir des données expérimentales, une loi donnant le débit (ou la vitesse de l'air) en fonction du forçage et de l'enfoncement dans la mine. Le protocole expérimental échantillonne honnêtement ces deux variables.

Le forçage F est obtenu par différence entre la température extérieure (pratiquement, celle à 0.4 m) et celle mesurée en fond de mine qui est de l'ordre de $11,5^\circ\text{C}$. A partir des données de débits, que l'on retrace en fonction de F , on obtient une première correspondance entre ces grandeurs, correspondance qui semble montrer que le débit varie comme la racine du forçage. Théoriquement, les courbes obtenues devraient passer par l'origine, car le débit doit s'annuler pour un forçage nul. De fait, on observe que ce n'est pas tout à fait le cas, mais ce n'est pas étonnant : près de l'entrée de la mine, les turbulences sont fortes. Or, par construction, les anémomètres sont

sensibles aux flux aléatoires sans en indiquer la direction. Si bien que des fluctuations qui seraient à moyenne nulle (pas de mouvement d'ensemble de l'air, mais seulement des mouvements locaux) produisent un signal non nul. Finalement, il est légitime, pour atteindre les débits moyens et s'affranchir dans les données des fluctuations instantanées, de supposer que les débits seraient nuls si on avait $F=0$. Cela revient à considérer que les turbulences locales ne contribuent pas au transport macroscopique de l'air dans la galerie.

A partir des couples de valeurs (F, D_x) (D_x représentant le débit à la profondeur x et F toujours la différence $F=T_{\text{extérieur}}-T_{\text{fond de mine}}$), on ajuste pour chaque courbe une loi de la forme :

$$D_x = \alpha_x \sqrt{F} + \beta_x$$

puis on « recalibre » en retirant le terme constant aux lois (une par valeur de x), ce qui revient à conserver des relations de la forme :

$$D_x = \alpha_x \sqrt{F}$$

Sur la figure 6a, on a retracé ces dépendances de D en fonction de F , qui possèdent effectivement une remarquable forme en racine (alors que les courbes d'origine n'ont été que translattées parallèlement à l'axe des y), relations qui se vérifient tout aussi bien en diagramme log-log, toujours filtrées à une heure (fig. 6b). En effet, sur ces derniers, on observe une pente de $1/2$, bien caractéristique d'une loi en racine (insistons sur le fait que cette hypothèse n'a été faite que pour éliminer β_x de l'ajustement ; il n'y a pas là un « retour d'hypothèse », si ce n'est celle qui affirme que l'échange entre l'intérieur et l'extérieur de la mine ne participe pas des effets locaux de la turbulence).

La corrélation $D_x = \alpha_x \sqrt{F}$ s'applique pour toutes les profondeurs, aux fluctuations près. Pour la courbe du fond, les données de débit inférieures à $0,001 \text{ m}^3/\text{s}$ (correspondant approximativement à des vitesses de 1 mm/s puisque les sections sont proches de 1 m^2) ont été éliminées volontairement, même si l'on peut considérer que ces résultats valident les anémomètres au-delà de cette limite inférieure.

Si la loi en racine est globalement bien vérifiée, le système présente des fluctuations et surtout une hystérésis évidente. La figure 7 présente un détail de ce phénomène sur le capteur situé à 23 m. Cette hystérésis décrit l'imperfection de la linéarité entre le débit et la racine du forçage. Le débit est plus important que celui donné par la loi linéaire lorsque la température externe chute, et vice-versa. Au début de l'expérience, la nuit tombant, la température décroît et le débit va de même. Lors de l'inversion de tendance (qui a lieu vers 1 à 2 heures du matin, soit 25 à 26 h dans la graduation linéaire du temps), on note d'une part que la température continue de décroître au fond de la mine, mais également que la remise en régime se fait avec retard : le débit est plus faible qu'à la descente de température (pour un même écart).

Cette hystérésis est indicateur d'un temps de réponse du système naturel d'aéragage, qui atteint quelques heures. En ce référant à l'ensemble des courbes de la figure 6, on constate que, pour les 4 capteurs du fond, il est exprimé dans le même sens : il s'agit d'un retard de la mise en régime. Pour le premier capteur, c'est l'inverse, le débit étant plus fort à la remontée en température qu'à la descente !

L'interprétation de ces phénomènes d'hystérésis est relativement aisée si on la rapporte au temps de séjour et de parcours de l'air dans la mine. En effet, l'air au fond

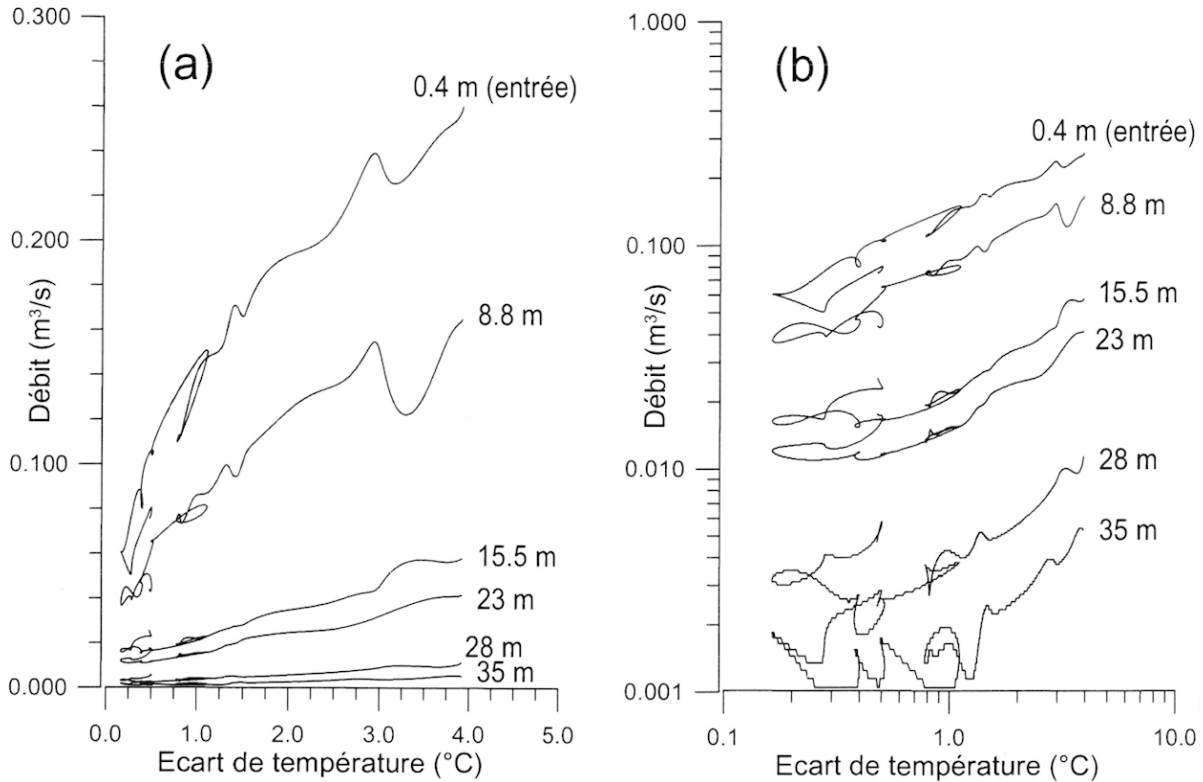


Fig. 6 : Débits (ou vitesse) pour différents enfoncements dans la mine, en fonction de l'écart de température extérieur-fond de mine. En (a), en échelle linéaire, on observe bien une relation en racine. En (b), en échelle log-log, les courbes sont proches de droites de pentes 1/2 (aux fluctuations près), ce qui confirme la dépendance en racine. On observe également l'hystérésis (retard de réponse) qui affecte la circulation de l'air.

de la mine, à l'instant (t), y est rentré bien avant, à l'instant (t-T). Le temps T, qui représente donc le temps que met l'air pour arriver à une profondeur donnée, peut être calculé par intégration une fois que l'on a la loi de vitesse en fonction de la profondeur. On a en effet, pour un forçage typique de l'ordre de 2°C, une loi de vitesse V(x) en fonction de la profondeur x proche de (en assimilant

vitesse à débit) : $V(x) = 0.19e^{-0.123x}$ (cette loi est établie plus loin). Le temps infinitésimal mis pour parcourir la distance infinitésimale dx est, en première approche :

$$dt = \frac{dx}{V} = 5.3e^{0.123x} dx = Ae^{Bx}$$

Le temps pour aller jusqu'à la profondeur x est alors :

$$T = \int_0^x Ae^{Bu} du = \frac{A}{B} [e^{Bx} - 1] = 43 \cdot [e^{0.123x} - 1]$$

Le graphique de la figure 8 décrit ce temps en fonction de l'enfoncement dans la mine (x).

Ce résultat montre que pour atteindre 10 m, il faut un peu plus d'une minute et demi ; à 20 m, il faut environ 8 minutes, puis il faut 30 minutes pour que l'air atteigne la profondeur de 30 mètres, et environ 100 minutes pour atteindre 40 mètres. Ce graphe important sera interprété à nouveau plus loin dans notre analyse, mais en échelle linéaire, lors de la discussion sur la « distance de blocage ».

Nous pouvons finalement résumer le phénomène d'hystérésis comme suit : en milieu et fond de mine (ici, en fait, au-delà de 10 m environ), on a une hystérésis « normale ». Dans l'exemple accessible grâce aux données, lors de la chute de température, l'air est encore chaud, et comme toute la mine participe au moteur de l'aéragé, le débit reste important. Mais après quelques heures, tandis que la température externe remonte doucement, il y a encore de l'air froid dans la mine. Le moteur est alors peu efficace à l'intérieur. A l'entrée de la mine, le flux n'est pas déterminé par la seule différence entre la température extérieure et celle « de fond de mine » (cette dernière étant supposée invariable), mais bien par la différence

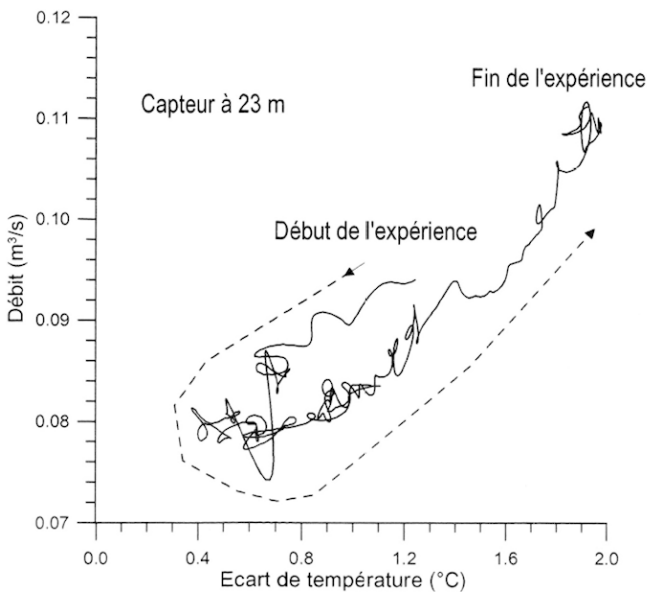


Fig. 7 : Détail, au niveau du capteur à 23 m, du phénomène d'hystérésis. Ce dernier implique un fonctionnement dissymétrique selon que l'on est en période de réchauffement ou de refroidissement à l'extérieur de la mine.

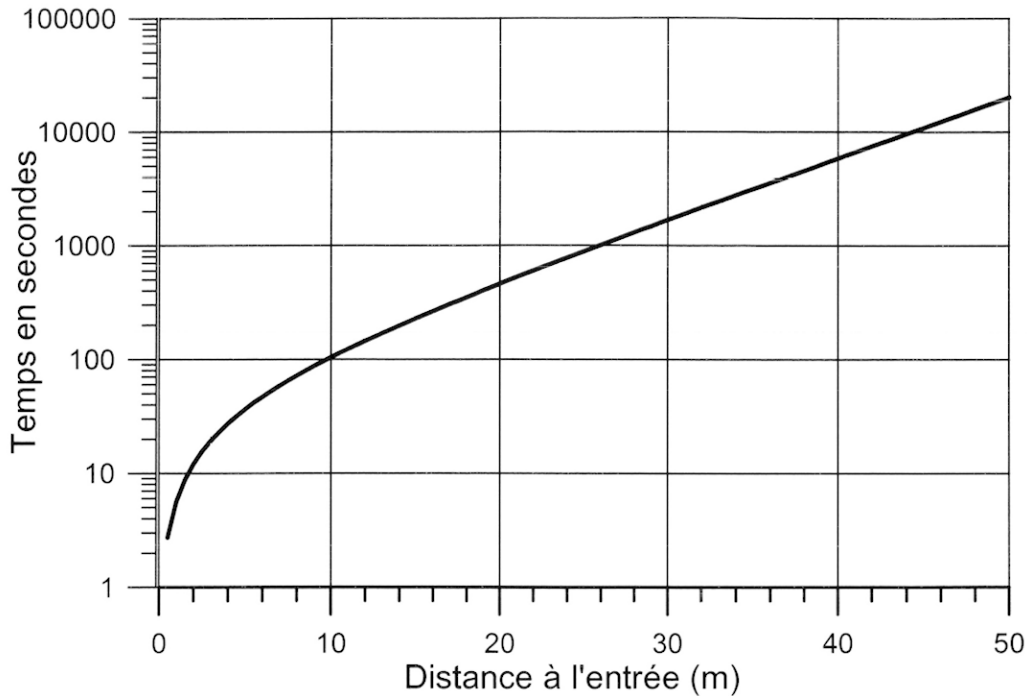


Fig. 8 : Temps mis pour l'air pour parvenir à une profondeur donnée. Cette durée est de l'ordre du quart d'heure pour atteindre 25 mètres, mais dépasse cinq heures pour atteindre la cinquantaine de mètres.

entre la température extérieure et une moyenne pondérée des températures dans l'ensemble du conduit minier. Si bien que juste après l'inversion de température à l'extérieur, l'air froid resté dans la mine force la ventilation plus qu'à la descente en température. L'hystérésis est inversée. Cette hystérésis est en quelque sorte la mémoire à court terme de la mine.

Pour revenir à notre objectif initial, il reste à exprimer le débit, pour un forçage donné, en fonction de la profondeur, ce qui est relaté sur la figure 9. Nous avons utilisé les données au moment du maximum d'écart (croix) et les moyennes globales (points). Sur l'échelle logarithmique utilisée, des droites de pentes négatives quasi iden-

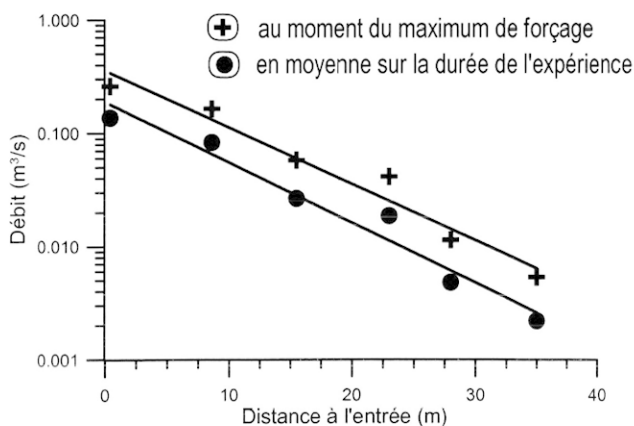


Fig. 9 : Ajustement d'une loi linéaire entre le logarithme du débit et la distance à l'entrée de la mine pour les forçages moyen et maximum observés au cours de l'expérience.

tiques conviennent bien pour les ajustements. Par conséquent, la loi du débit en fonction de la profondeur dans la mine est exponentielle décroissante. Les lois ajustées sur la figure 9 ont plus précisément pour expression :

- à l'écart maximum de température (à la fin de la période d'expérimentation) : $V(x) = 0.385 * e^{-0.115x}$
- pour l'écart de température moyen (et vitesses moyennes) : $V(x) = 0.189 * e^{-0.123x}$.

Les débits étant très proches des vitesses (les sections étant de l'ordre du m^2), on les prendra aussi pour loi de vitesse (en m/s) en fonction de la profondeur x (en mètre). La différence entre les deux exposants n'est pratiquement pas significative. Par ailleurs, on dispose de la loi du premier coefficient (le facteur de l'exponentielle), puisqu'il s'agit de la vitesse à l'entrée de la mine, dont on connaît la dépendance en température. On obtient donc une expression « unifiée » du débit, pour une section normalisée à $1m^2$, de la forme :

$$D(x, F) = \lambda \sqrt{F} e^{-Bx},$$

où, toujours, $F = T_{\text{extérieur}} - T_{\text{fond de mine}}$. A partir de cette loi supposée, on a la relation logarithmique :

$$\log[D(x, F)] - \frac{1}{2} \log(F) = \Lambda - Bx.$$

On peut donc effectuer un nouvel ajustement, cette fois-ci global, de ces nouvelles constantes Λ et B . On obtient $\Lambda = \log(\lambda) = -1.683$ et $B = 0.123$, ce qui est illustré sur la figure 10, où les barres d'erreur sont données à 2σ .

On obtient finalement l'expression empirique de la vitesse en fonction de la température extérieure T_{ext} et de celle du fond de la mine T_{fond} sous la forme finale :

$$V(x, T_{\text{ext}}, T_{\text{fond}}) = 0.185\sqrt{T_{\text{ext}} - T_{\text{fond}}} e^{-0.123x}$$

Cette expression condense l'essentiel des résultats de ce travail expérimental, hormis les phénomènes d'hystérésis qui n'ont pas de signification majeure en terme archéologique. L'approche théorique donnée plus loin explicitera davantage les constantes de cette loi.

II.6 - DISCUSSION SUR LA NOTION DE « DISTANCE DE BLOCAGE »

La loi exponentielle devrait pouvoir se prolonger théoriquement au-delà des distances où nos limites, en terme de capacité de mesure, ont été atteintes (soit, par réalisme, 1 mm/s de vitesse d'air). Par conséquent, il n'y a pas, mathématiquement ou même physiquement parlant, de distance de blocage.

Toutefois, il est utile de revenir, comme on l'a annoncé, à la loi du temps nécessaire pour atteindre une profondeur donnée. Le cycle jour/nuit constitue le moteur circadien de l'aérage, tandis que la saison détermine un fonctionnement moyen. Mais même si un régime thermique stable s'installe, comment l'air parvient-il au mineur ?

On peut se fonder sur la consommation d'un exercice physique relativement important (exercice du marteau et de la pointerolle), soit un régime d'air respiré de l'ordre de 1.8 m³/heure, ou, pour fixer un ordre de grandeur de renouvellement nécessaire et moyen, environ 0.0005 m³/s. La loi obtenue précédemment peut être utilisée, à la condition d'y appliquer un facteur qui tienne compte du profil de vitesse dans la galerie (et du fait que l'air rentre et sort), facteur que l'on peut prendre de l'ordre de ¼ pour avoir des débits réels donc « respirables ». On prendra, en arrondissant le coefficient :

$$\text{Débit}_{\text{réel}}(x, T_{\text{ext}}, T_{\text{fond}}) = 0.05\sqrt{T_{\text{ext}} - T_{\text{fond}}} e^{-0.123x}$$

ou encore, si on travaille avec le « forçage » F :

$$\text{Débit}_{\text{réel}}(x, F) = 0.05\sqrt{F}e^{-0.123x}$$

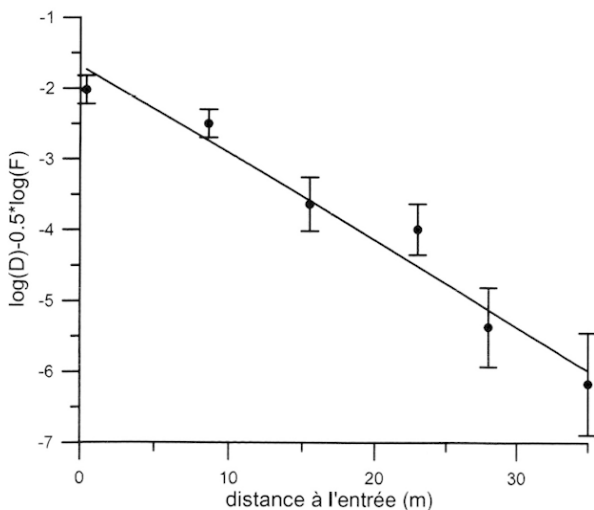


Fig. 10 : Ajustement d'une loi générale que l'on observe linéaire entre une quantité composée du débit et du forçage (log(D)-1/2log(F)) en fonction de la distance à l'entrée. Cet ajustement synthétise le phénomène sur le plan expérimental.

Remarquons que la résolution en x de l'équation 0.0005=D(x,F) donne la distance maximum ventilée. On obtient tout d'abord une condition d'existence de solution qui est que l'on doit avoir

$$F \geq \frac{1}{10000},$$

sinon ce très faible débit n'est atteint pour aucune valeur de x. Cette condition est sans intérêt pratique. Mais en la respectant, on trouve pour cette « distance maximum » que nous notons X : $X = 37.4 + 4.06\ln(F)$.

Le graphe de cette fonction, sur la figure 11, est éloquent. En effet, cette figure révèle que l'air est pratiquement toujours renouvelé jusqu'à une quarantaine de mètres de l'entrée. Par contre, quelle que soit la force du « moteur de l'aérage », à savoir l'écart de température avec l'extérieur, on ne dépasse pas la cinquantaine de mètre environ. Notons que ce résultat est certainement « robuste ». Autrement dit, en faisant varier la section de la galerie dans les limites propres aux mines du XVIe s. (donc peu), ou la quantité d'air nécessaire au mineur, la variation de ce seuil à 40 m sera faible.

Une autre manière de voir les choses consiste à calculer le temps nécessaire pour l'air, étant donné un forçage donné F, de parvenir en fond de mine. Avec la loi complète, on peut estimer ce temps plus précisément. En effet, on a maintenant :

$$T = \frac{1}{0.185\sqrt{F}} \int_0^x e^{Bu} du = \frac{44}{\sqrt{F}} [e^{0.123x} - 1].$$

La figure 12 montre le résultat T obtenu en fonction de la distance à l'entrée et du forçage F : le temps devient vraiment prohibitif au-delà de 40 à 50 m.

II.7 - MESURE DES VITESSES SUR UNE SECTION

C'est par curiosité que nous avons entrepris cette série de mesure. Les capteurs ont été placés, à 3.2 m de l'entrée, sur une même verticale, comme l'illustre la figure 3. Les vitesses obtenues, sans corrections (rendues inutiles compte tenu des ordres de grandeur en jeu), sont données sur la figure 13. (Les points aux extrémités, où la vitesse est nécessairement nulle, ont été rajoutés). Ce graphe ne révèle pas de surprise. On a compté positivement les

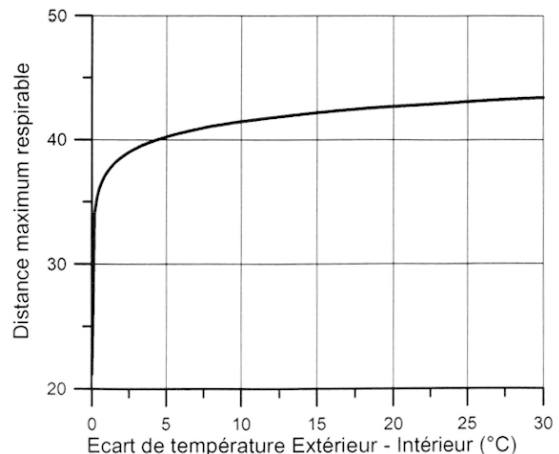


Fig. 11 : Distance maximum « respirable » en fonction du forçage thermique, montrant un seuil autour de 40 mètres, peu dépendant du contraste de température.

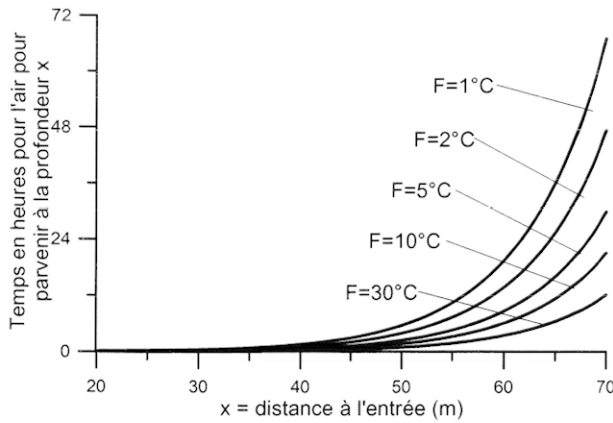


Fig. 12 : Sur une échelle linéaire et pour différents forçages thermiques, temps en heure pour que l'air arrive à une profondeur donnée.

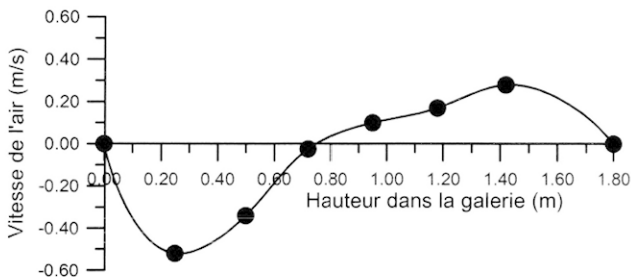


Fig. 13 : Vitesse de l'air dans une section verticale de la galerie, proche de l'entrée (voir aussi la fig. 3). Pour le signe, le sens a été observé à l'aide de fumée. On observe une dissymétrie dans la répartition spatiale de l'air chaud qui rentre (hauteur > 0,7 m) et l'air froid qui ressort et présente un flux plus ramassé. Ce résultat expérimental est compatible avec le résultat obtenu par modélisation numérique (fig. 16 b).

vitesse de l'air entrant et négativement celles qui correspondent à l'air sortant. L'irrégularité de la courbe est peut-être imputable aux irrégularités de la section elle-même, très importantes à ce niveau dans la galerie. Il est possible toutefois qu'une véritable accumulation d'air froid s'opère au voisinage du sol, si bien que la couche d'air froid serait à la fois plus vélocité et moins épaisse que celle de l'air chaud qui rentre dans la galerie en « léchant » le plafond. Il se produit un véritable écoulement du fluide refroidi, conforme au reste aux résultats des modélisations numériques qui ont succédé à l'étude expérimentale.

C'est grâce à cette courbe, enfin, que l'on justifie le facteur $\frac{1}{4}$ appliqué au « faux débit » (produit de la vitesse mesurée à un maximum de vitesse par la section totale) pour obtenir un débit réel. On considère en effet, que pour une demi-section supérieure ou inférieure, le débit moyen est proche de la moitié de la vitesse maximum multipliée par la surface de cette demi-section, d'où le facteur $\frac{1}{4} = \frac{1}{2}$ fois $\frac{1}{2}$.

III - ÉTUDE THÉORIQUE – RECHERCHE D'UNE SOLUTION ANALYTIQUE

Une première question concerne le régime à l'intérieur de la mine : est-il turbulent ou laminaire ? Le critère habituellement retenu repose sur l'estimation du nombre de Reynolds : on estime avoir turbulence si ce nombre

dépasse 2000. Cette limite est celle considérée comme valide pour des conduits industriels, de section circulaire. Dans le cas d'une galerie de mine, on prendra un diamètre équivalent de 1 m, représentatif en moyenne de la hauteur de la galerie (2 m) et de sa largeur (50 cm). Par ailleurs, des parois rugueuses favorisent la turbulence, aussi prendra-t-on comme limite 1000 au lieu de 2000. Le nombre de Reynolds est donné par :

$$Re = \frac{VgD}{\nu}$$

où V est la vitesse, D le diamètre du conduit et

$$\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ Pl}$$

est la viscosité cinématique de l'air. Avec ces valeurs, on trouve que le régime est turbulent dès lors que la vitesse dépasse 15 mm/s, ce qui est pratiquement toujours le cas dans la galerie sauf dans la partie finale. Toutefois, dans cette dernière, le changement de régime n'a pas d'implication sur les raisonnements tenus : c'est une zone peu déterminante pour le phénomène de circulation, l'essentiel de l'inversion du courant d'air se faisant, au fil de la galerie, plus fortement vers l'entrée.

Revenons maintenant à la relation empirique trouvée précédemment,

$$V(x, T_{\text{ext}}, T_{\text{fond}}) = 0.185 \sqrt{T_{\text{ext}} - T_{\text{fond}}} e^{-0.123x},$$

qui peut s'écrire sous la forme :

$$V = V_0 \exp\left(-\frac{x}{x_0}\right),$$

avec $V_0 = 0.185$ et $x_0 = 1/_{0.123} = 8.13$ m.

Il s'agit de retrouver cette loi par quelques considérations physiques fondées sur l'analyse dimensionnelle.

Dans un premier temps, on s'intéresse à la vitesse caractéristique V_0 , dont une estimation peut être obtenue en remarquant qu'il s'agit d'un phénomène de convection naturelle avec de l'air, gaz à peu près parfait. Le moteur étant la pesanteur, la formule de Torricelli, qui exprime simplement la conversion de l'énergie de gravité en énergie cinétique, permet d'écrire :

$$V_0 = \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} 2gH'}$$

où ρ est la densité de l'air et $\Delta\rho$ le contraste de densité qui résulte de l'écart de température et H' la dimension d'une hauteur caractéristique de l'espace où opère la poussée d'Archimède et correspond à la dénivellation parcourue par une particule fluide dans son mouvement convectif. La loi des gaz parfait donne alors :

$$V_0 = \sqrt{\frac{T_{\text{ext}} - T_{\text{fond}}}{T_{\text{fond}}} 2gH'}$$

Par identification numérique de cette expression avec la loi empirique, on obtient une valeur pour H' : 0.49 m. C'est à peu de choses près le quart de la hauteur $H=2$ m de la mine. On en déduit une relation générale approchée, valable pour la vitesse à l'entrée de la mine :

$$V_0 = \sqrt{\frac{T_{\text{ext}} - T_{\text{fond}}}{T_{\text{fond}}} \frac{gH}{2}}$$

La détermination de la distance d'amortissement x_0 est plus délicate. Au fur et à mesure que l'air chaud pénètre dans la galerie au plafond, cet air se refroidit. L'écart de température entre le bas et le haut diminue et on pourrait imaginer que la vitesse diminue dans les mêmes proportions. Il n'en est rien, car l'écoulement n'est pas du tout à force d'inertie négligeable, le nombre de Reynolds étant grand. L'écoulement pourra continuer même si l'écart de température s'est annulé localement entre le haut et le bas. Le ralentissement de l'écoulement est dû à deux facteurs. D'une part, la paroi ralentit le fluide et au voisinage de la ligne médiane, il y a un échange de quantité de mouvement par le frottement turbulent entre le fluide du bas et le fluide du haut ; d'autre part le fluide rencontre un gradient de pression adverse comme on va le démontrer plus loin. La fuite d'air du haut vers le bas est assurée par un léger gradient de pression (la pression motrice $P + \rho_0gz$ est un peu plus grande en haut qu'en bas).

La figure 14 illustre ce contexte. Comme l'écoulement est turbulent rugueux, la perte de charge est proportionnelle au carré de la vitesse. En haut, l'écoulement se présente globalement comme un divergent, la pression augmente donc, mais les frottements visqueux et les échanges de quantité de mouvement par les tourbillons turbulents font diminuer cette pression. Indécision, donc. En revanche, en bas l'écoulement vers la gauche est globalement un convergent, la pression diminue donc vers la gauche. Et par ailleurs, les frottements visqueux ont aussi tendance à diminuer la pression. On en déduit qu'en bas la pression diminue vers la gauche.

Examinons maintenant plus précisément la pression motrice (pression modifiée) $P + \rho_0gz$. Nous avons, sur la figure 14, représentée deux sections droites d'une manière qualitative. L'équation de la statique sur une verticale nous indiquerait une pression motrice constante si la température était constante, et en diminution vers le haut du fait de l'augmentation de température. Mais, au-delà de cette formulation statique, il faut bien qu'il y ait un léger gradient de pression motrice négatif vers le bas pour que le fluide descende. Le profil de pression motrice doit donc ressembler à un S symétrique, dessiné en DA. Dans la section à droite, elle augmente un peu lorsque l'on monte car le fluide doit être aspiré vers le bas et la température n'est pas assez différente pour contrecarrer cet effet. A droite, la pression motrice est plus grande qu'à gauche. Globalement dans la galerie, la pression augmente vers la droite. L'hypothèse que le gradient de pression motrice vertical est nettement plus petit que le gradient de pression horizontal est un des ingrédients de

la théorie de la couche limite, et cette hypothèse sera vraie ici si les distances horizontales sont nettement plus grandes que les distances verticales. On trouve donc par continuité que la pression motrice dans la partie haute est croissante vers la droite comme dans la partie basse. L'indécision de la partie supérieure a été levée.

Ecrivons alors le théorème de Bernoulli sur une ligne de courant AB en haut de la galerie (le membre de gauche représente la variation de la charge, celui de droite la perte de charge et résulte de l'hypothèse turbulente pour les pertes de charge linéiques) :

$$d\left(p + \frac{1}{2}\rho V^2\right) = -\frac{1}{2}\rho V^2 \frac{\lambda}{H/2} dx \Rightarrow dp + \rho dV = -\rho V^2 \frac{\lambda}{H} dx.$$

Dans cette relation, on a pas tenu compte du coefficient d'énergie cinétique, mais on verrait facilement que cela n'influe pas sur le résultat. Appliquons cette relation deux fois, en haut et en bas, en remarquant que la variation de la pression est à peu près la même :

$$dp = -\rho V_1 dV_1 - \rho V_1 |V_1| \frac{\lambda}{H} dx = -\rho V_2 dV_2 - \rho V_2 |V_2| \frac{\lambda}{H} dx.$$

La conservation des débits conduit à la relation entre les vitesses V_1 et V_2 (S_1 et S_2 étant les sections de passage respectivement en haut et en bas) :

$$V_2 = -V_1 \frac{S_1}{S_2} = -\beta V_1.$$

D'où la relation sur les vitesses :

$$-\rho V_1 dV_1 - \rho V_1^2 \frac{\lambda}{H} dx = -\rho V_1 \beta^2 dV_1 + \rho V_1^2 \beta \frac{\lambda}{H} dx ;$$

$$d'où : \frac{dV_1}{V_1} = -\frac{1+\beta^2}{1-\beta^2} \frac{\lambda}{H} dx$$

soit encore :

$$\frac{dV}{V} = -\lambda \frac{1+\beta^2}{1-\beta^2} \frac{dx}{H} \Rightarrow V = V_0 \exp\left(-\lambda \frac{1+\beta^2}{1-\beta^2} \frac{x}{H}\right).$$

L'intégration de la vitesse comme on l'a faite suppose que λ est indépendant de V , ce qui est la caractéristique d'un écoulement turbulent bien développé avec paroi rugueuse. Cette intégration suppose aussi que le coefficient β ne varie pas le long de l'écoulement, ce qui ne peut être vrai aux extrémités.

Cette formule a été établie théoriquement. Elle donne

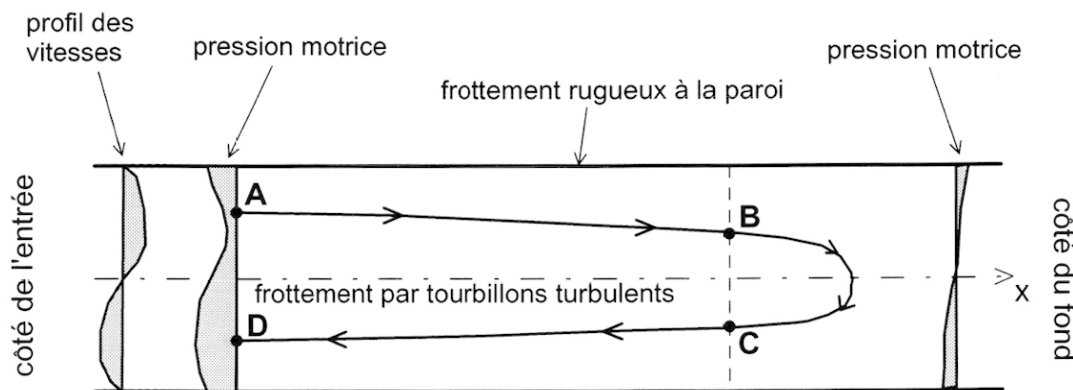


Fig. 14 : Schéma soutenant l'approche théorique du phénomène, où l'on a représenté dans une section verticale le profil de vitesse et la pression motrice de l'aéragé, ainsi qu'une ligne de courant.

l'expression de x_0 , longueur caractéristique de l'amortissement du mouvement suivant x , en fonction du coefficient de perte de charge linéique équivalent λ , du rapport des vitesses β et de la hauteur H :

$$x_0 = \frac{H}{\lambda} \frac{1 - \beta^2}{1 + \beta^2}.$$

En la comparant avec la relation empirique issue de l'étude expérimentale, on en déduit une valeur numérique du coefficient de frottement corrigé. On a en effet :

$$x_0 = 8.13 \text{ m pour } H = 2 \text{ m, d'où } \lambda \frac{1 + \beta^2}{1 - \beta^2} = 0.25.$$

Finalement, il semble que l'on puisse étendre la relation trouvée empiriquement d'abord à toute une gamme de galeries horizontales, en tout cas en restant dans les ordres de grandeurs des dimensions de la Mine Sans Nom :

$$V = \sqrt{\frac{T_{\text{ext}} - T_{\text{fond}}}{T_{\text{fond}}} g \frac{H}{2}} \exp\left(-\frac{x}{4H}\right).$$

Mais cette formule n'est valable qu'en été, car il faut dans cette expression que la température externe excède la température du fond. Pour le régime d'hiver, le moteur est inversé. L'intégralité du raisonnement s'applique de manière symétrique, et la relation peut être généralisée sous la forme finale valable quelque soit la saison :

$$V = \sqrt{\frac{|T_{\text{ext}} - T_{\text{fond}}|}{T_{\text{fond}}} g \frac{H}{2}} \exp\left(-\frac{x}{4H}\right).$$

Toutefois, il ne faut pas se leurrer sur la précision de cette relation. L'étude des écoulements stratifiés révèle la grande complexité des phénomènes, en particulier le blocage sur la dimension des grandes structures turbulentes qui apparaît pour un nombre de Richardson un peu grand. Or nous n'avons pas tenu compte de ce nombre. Les règles de similitude que nous avons établies ont sûrement une validité limitée quand on fait fortement varier H .

Il n'est pas inutile, pour finir, de discuter l'effet d'une légère inclinaison de la mine. En effet, afin de faciliter l'exhaure, les galeries sont légèrement montantes. Cette situation semble impliquer une dissymétrie du fonctionnement été/hiver. En été, l'air externe étant refroidi dans la galerie, les analyses faites ci-dessus restent valables. Par contre, en hiver, c'est la galerie qui est plus chaude, et l'air réchauffé peut rester piégé dans les parties de la galerie situées plus haut que le bord supérieur de l'entrée de la mine. On s'attend donc à un fonctionnement moins efficace en hiver, dont la quantification mériterait une étude ultérieure.

IV - MODÉLISATION NUMÉRIQUE

L'approche numérique revient à simuler les phénomènes physiques sur ordinateur, en partant non d'équations synthétiques (théorèmes généraux etc.), mais bien des équations physiques locales qui gouvernent les phénomènes. Toutefois, les équations de Navier-Stokes qui s'appliquent sont si complexes à résoudre qu'il est tout de même nécessaire de les réduire sur la base d'hypothèses

validées par ailleurs en mécanique de fluides. Ces hypothèses reviennent à intégrer des termes semi-macroscopiques de la turbulence, destinés à représenter cette dernière. Nous avons fait reposer le calcul fin des caractéristiques de l'écoulement (vitesses, températures, caractéristiques turbulentes), en tout point de la mine sur un code de champs (logiciel FLUENT, fondé sur la méthode des éléments finis). Il nécessite la mise en œuvre d'un maillage de l'écoulement en tout point duquel on obtiendra ensuite les caractéristiques dynamiques et thermiques.

Le calcul est possible en deux ou trois dimensions spatiales (« 2-D » ou « 3-D »), plus le temps. Le calcul 3-D nécessite un temps considérable (plusieurs semaines sur station de travail). Si le calcul 2-D est plus praticable et sans doute représentatif des phénomènes qualitatifs, il conduit à une certaine frustration : il suppose que la galerie est de largeur infinie, et on se posera toujours la question, en l'effectuant seul, de savoir quel facteur correctif il convient d'appliquer pour tenir compte de la largeur réelle de la mine, qui est de l'ordre de 50 à 80 cm. L'estimation de l'épaisseur de la couche limite, épaisseur qui assure un découplage notable des parois avec l'air le plus mobile, permet néanmoins de justifier, au moins partiellement et *a priori*, l'approche 2-D, pour laquelle la largeur de la mine est infinie, mais les résultats obtenus montrent finalement la pertinence de ce questionnement. Pour estimer l'épaisseur de la couche limite, on peut utiliser la formule :

$$\partial_N = H g R a^{-\frac{1}{3}},$$

où Ra est le nombre de Rayleigh, qui est lui-même donné par

$$Ra = \frac{g \Delta T H^3}{T \mu_{\text{air}} \alpha_{\text{air}}},$$

où $g=9.81\text{ms}^{-2}$ est l'accélération de la pesanteur, T la température moyenne en Kelvin (prise ici à 283 K), ΔT l'écart de température (forçage), $H=2$ m la hauteur de la galerie, $\mu_{\text{air}} = 1.57 \times 10^{-5}$ Pa.s la viscosité dynamique, et $\alpha_{\text{air}} = 2.22 \times 10^{-5}$ m²/s la diffusivité thermique de l'air. On trouve alors pour l'épaisseur de la couche limite :

Ecart ΔT	Epaisseur couche limite ∂_N
30 K (ou °C)	1 mm
6 K	1.5 mm
2 K	1.7 mm

Ces résultats laissent à penser que malgré la longueur importante de la galerie, sa largeur de 50 cm n'a pratiquement pas d'influence sur la circulation de l'air. Comme nous l'avons déjà dit, l'expérience numérique va contredire cette assertion. En effet, par précaution, avons-nous travaillé tout d'abord en deux dimensions, puis en trois dimensions ; même si ce dernier cas s'avère *a priori* plus réaliste, il est toutefois moins réalisable en terme de temps calcul.

Pour la mise en place d'un maillage adapté, la géométrie de la mine est simplifiée. Nous avons considéré

qu'elle possède une section constante rectangulaire, de hauteur 2 m, de largeur 0.8 m (pour le cas 3-D), et que sa longueur est de 50 m. Ne connaissant pas les conditions limites en vitesses, caractéristiques turbulentes et températures d'air à l'entrée de la mine, nous avons choisi de modéliser le volume d'air autour de l'entrée de la mine, en formant un « volume de réserve » représentant l'atmosphère. Celui-ci a une hauteur de 5 m et une largeur de 5 m pour le cas 3-D. De l'air à la température atmosphérique est doucement injecté (1mm/s) sur la partie supérieure de cette réserve, tandis que l'air froid produit par la mine peut s'échapper par un long conduit sortant en bas de la réserve, cette option facilitant finalement l'annulation des gradients aux limites du domaine. La pente de la colline où entre la mine est de 60°. De plus, le nombre de mailles de discrétisation étant une contrainte au niveau du calcul (temps calcul et place mémoire), nous avons supposé pour le cas 3-D que l'écoulement d'air dans la mine est symétrique par rapport à une section verticale, ce qui permet de diviser le domaine de calcul par 2. Le domaine de calcul est représenté sur la figure 15 pour le cas 3-D.

Les équations résolues en tout point de l'écoulement sont l'équation de continuité, les équations de conservation des quantités de mouvement suivant les 2 ou 3 directions d'espace, l'équation de conservation de l'énergie, ainsi que les équations de conservation des caractéristiques turbulentes. Pour modéliser le phénomène de convection naturelle, on utilise pour le cas 3-D l'approximation de Boussinesq qui est valable pour de faibles différences de température (<10°C) et qui suppose que les variations de masse volumique du fluide ne doivent être prises en compte que dans le terme de poussée. Les phénomènes turbulents sont modélisés selon une approche en moyennes temporelles, et plus particulièrement au moyen d'un modèle k-ε (k : énergie cinétique turbulente, ε : taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente) ; c'est cette dernière approche, qui revient à une prise en

compte séparée mais non découplée de la turbulence, qui opère une simplification des équations de Navier-Stokes.

Ces diverses équations sont les suivantes (en notation tensorielle) :

- Continuité

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

- Conservation des quantités de mouvement

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \nu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \nu_t) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] + \delta_{i2} g \beta_T (T - T_0) - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x_i}$$

- Conservation de l'énergie

$$u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(a + \frac{\nu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right]$$

- Conservation de l'énergie cinétique turbulente (k-ε standard)

$$u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + G_k - \epsilon$$

- Conservation du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente (k-ε standard)

$$u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{3\epsilon} G_k) - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k}$$

- Viscosité turbulente (k-ε standard)

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

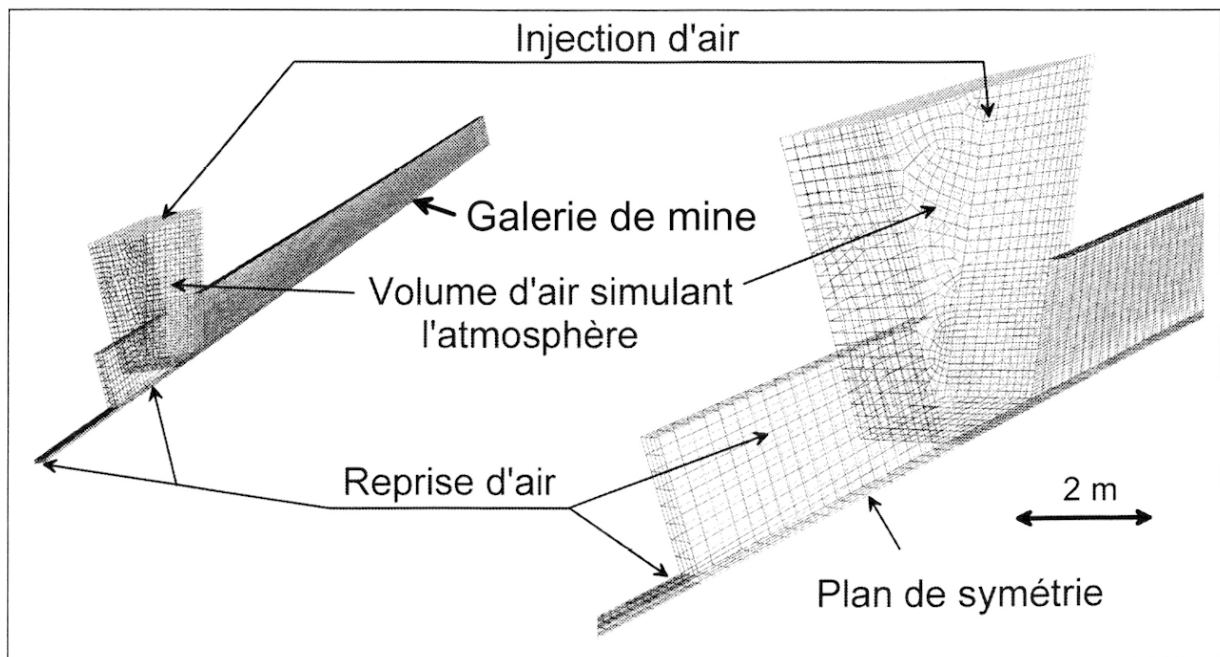


Fig. 15 : Maillage utilisé pour la modélisation numérique par éléments finis.

Avec :

$$P_k = \frac{v_i}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2; G_k = -g \frac{v_i}{\sigma_T} \beta_T \frac{\partial T}{\partial x_j} \delta_{j2};$$

$$\sigma_T = 0.9, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3; C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09$$

$\rho, \nu, a, \beta_T, T_0, \delta_{12}$ sont respectivement la masse volumique de l'air, sa viscosité cinématique, sa diffusivité thermique, son coefficient d'expansion thermique à 12.5°C, la température de référence prise à l'injection d'air et le symbole de Kronecker.

Il existe deux manières de conduire les calculs. Premièrement, on peut résoudre les équations d'évolution, c'est-à-dire partir d'un temps initial où sont définies des conditions initiales, et laisser le système évoluer dans le temps. Cette approche est très voisine du processus physique et représente donc le système avec sa « mise en route ». Nous l'avons adoptée pour le calcul à 2-dimensions, mais, pour une raison de temps calcul (bien plus long que le temps physique !), la durée de l'expérience fut limitée à trois minutes de temps physique. Deuxièmement, le calcul peut être conduit en mode quasi-stationnaire. Dans ce cas, on recherche directement une solution stable des équations, représentative de l'état atteint au bout d'un temps infini. Mais cette recherche se fait par itérations successives, si bien que le temps de calcul peut être rapidement prohibitif. La vitesse de convergence suit du reste le phénomène physique lui-même, qui prend du temps pour se stabiliser. Les équations sont d'autant plus mal conditionnées que, affectées d'un découplage mathématique interne, ce dernier résulte logiquement du découplage physique qui existe entre l'extérieur et le fond de la mine.

IV.1 - RÉSULTATS EN DEUX DIMENSIONS

Pour la modélisation 2-D, nous avons adopté un forçage de 20 K, caractéristique du plein été. Le nombre de mailles est de 43000. La figure 16-a montre la température et la vitesse obtenues trois minutes après la mise en route du système. La pénétration de l'air est de l'ordre de 37 mètres. On peut comparer cette distance avec celle donnée figure 11, déduite de l'équation empirique donnée plus haut pour la distance maximum respirable, $X = 37.4 + 4.06 \ln(F)$. Avec $F=20$ °C, on obtient également une quarantaine de mètres, mais c'est probablement par hasard. En effet, rien n'indique que le régime stationnaire est atteint. D'ailleurs, si l'on applique la formule empirique qui donne le temps nécessaire pour atteindre une profondeur x , à savoir

$$T = \frac{44}{\sqrt{F}} \left[e^{0.123x} - 1 \right],$$

on obtient pour 37 mètres un temps de 15 minutes, qui n'est plus comparable aux trois minutes.

On en conclut que cette modélisation numérique 2-D (qui suppose une largeur infinie à la galerie) conduit à une ventilation bien plus forte que dans le cas naturel et de dimensions réelles. Au bout de trois minutes, l'équilibre est loin d'être atteint, et le temps calcul nécessaire pour poursuivre l'expérience étant prohibitif (au moins une semaine), cette approche est d'autant plus limitée que le réalisme en est restreint. Finalement, la largeur de la galerie joue un rôle effectif dans le freinage de l'air, en contradiction avec les espoirs déduits de l'épaisseur millimétrique de la couche limite. C'est, pour sûr, un effet du rapport longueur/largeur, élevé, de la galerie.

IV.2 - RÉSULTATS EN TROIS DIMENSIONS

Afin de pouvoir appliquer l'approximation de Boussinesq (intéressante pour réduire le temps calcul), le forçage a été limité à 5 K. Le nombre de mailles s'élève à 70000.

Nous donnons ici les vecteurs vitesses (fig. 16-b) au niveau du plan de symétrie. Sur cette figure, on remarque que même pour une faible différence de température (5°C), il existe une circulation d'air en partie haute et en partie basse de la mine, due au phénomène de convection naturelle. La vitesse de l'air augmente de manière significative au voisinage de l'entrée de la mine, où les gradients de température (entre l'air injecté et la paroi horizontale supérieure de la mine) sont les plus forts, et elle diminue au fur et à mesure que l'air pénètre dans la mine, se refroidit, et que les gradients de température entre l'air et les parois de la mine diminuent. Ces gradients thermiques se voient sur la figure 16-c, qui représentent les iso-valeurs de température. On y remarque aussi l'air chaud et plus léger qui reste en partie haute, et l'air froid et plus lourd qui tombe et circule le long du sol.

Sur la figure 17-a, nous avons tracé l'évolution du module des vecteurs vitesses dans le plan de symétrie, à 40 cm du plafond de la mine. Cette figure montre l'augmentation rapide du module du vecteur vitesse de l'air à l'entrée de la mine, puis sa décroissance, avec des pentes différentes selon la position dans la mine. Sur la figure 17-b nous représentons l'évolution de la température sur la même ligne. La température de l'air dans la mine semble décroître linéairement selon l'avancée dans la mine. Cependant, ces résultats quantitatifs sont à interpréter avec beaucoup de précautions car la résolution numérique des équations gouvernant l'écoulement d'air dans la mine est difficile. En effet, la mine est un très grand volume, et la discrétisation du volume d'air en 70000 nœuds n'est pas suffisante pour appréhender correctement les écoulements d'air dans les couches limites. Ceci se remarque notamment sur ces figures : on n'y voit pas la décroissance des vitesses au voisinage des parois. De plus, la convergence du processus itératif utilisé pour la résolution numérique des équations qui gouvernent l'écoulement n'a pas été obtenue avec des critères très satisfaisants. Encore une fois, on doit résoudre ici des phénomènes découplés les uns par rapport aux autres (à l'entrée et au fond de la mine), et même si l'écoulement à l'entrée de la mine est correctement résolu, il n'en est pas forcément de même au fond de la mine, et la convergence peut être très longue à obtenir car l'air circule de plus en plus lentement au fur et à mesure qu'il avance dans la mine.

On note que la vitesse à l'entrée de la mine ($x=0$) atteint environ 0.25ms^{-1} pour ce forçage de 5°C. La loi expérimentale (empirique) donne, elle, pour $x=0$:

$$V(0, T_{\text{ext}}, T_{\text{fond}}) = 0.185 \sqrt{T_{\text{ext}} - T_{\text{fond}}} e^{-0.123x} \Big|_{x=0; T_{\text{ext}} - T_{\text{fond}}=5}$$

$$= 0.185 \sqrt{5} = 0.41 \text{ms}^{-1},$$

ce qui est presque deux fois plus, et conforme à l'hypothèse que la convergence du processus numérique n'a pu être atteinte.

En conclusion de cette approche purement numérique, nous voyons que ce type de modélisation constitue certainement un bon moyen d'approcher les phénomènes de circulation d'air dans les mines. Néanmoins, elle nécessite un investissement considérable en temps calcul, actuellement difficile à atteindre au niveau d'une station

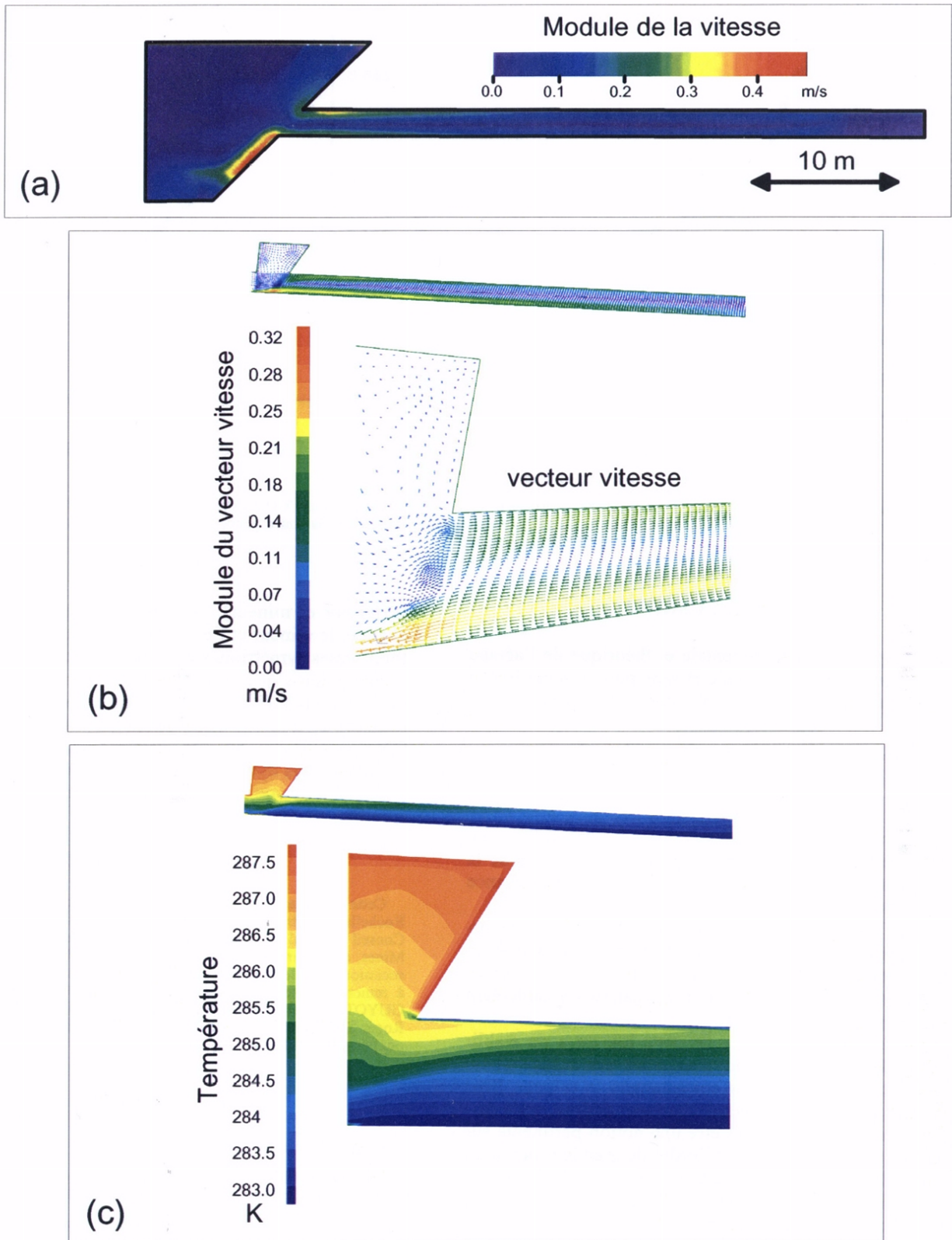


Fig. 16 : (a) Vitesse obtenue lors de la modélisation 2-D. Elle semble excessive par rapport à l'observation. (b) Vecteurs vitesse dans le plan de symétrie vertical lors de la modélisation 3-D ; ensemble de la mine (en haut) et détail sur l'entrée. L'aspect qualitatif est certainement correct, mais les valeurs obtenues sont relativisées par la figure 17. (c) Idem pour la température.

de travail qu'il faudrait mobiliser plusieurs mois en continu. Les résultats que nous avons obtenus correspondent à des solutions non abouties en terme de convergence, que ce soit temporellement avec l'approche évolutive mise en œuvre en 2-D ou sensu-stricto avec l'approche quasi-stationnaire tentée en 3-D. Toutefois, si les résultats numériques obtenus ici ne sont guère utilisables,

ces calculs montrent la faisabilité et l'intérêt de l'approche numérique, et on peut gager que l'évolution des calculateurs dans ces prochaines années permettra une approche plus routinière de ces simulations et la finalisation de ce type de calculs, même dans des cas plus complexes (prise en compte des dépilages, par exemple).

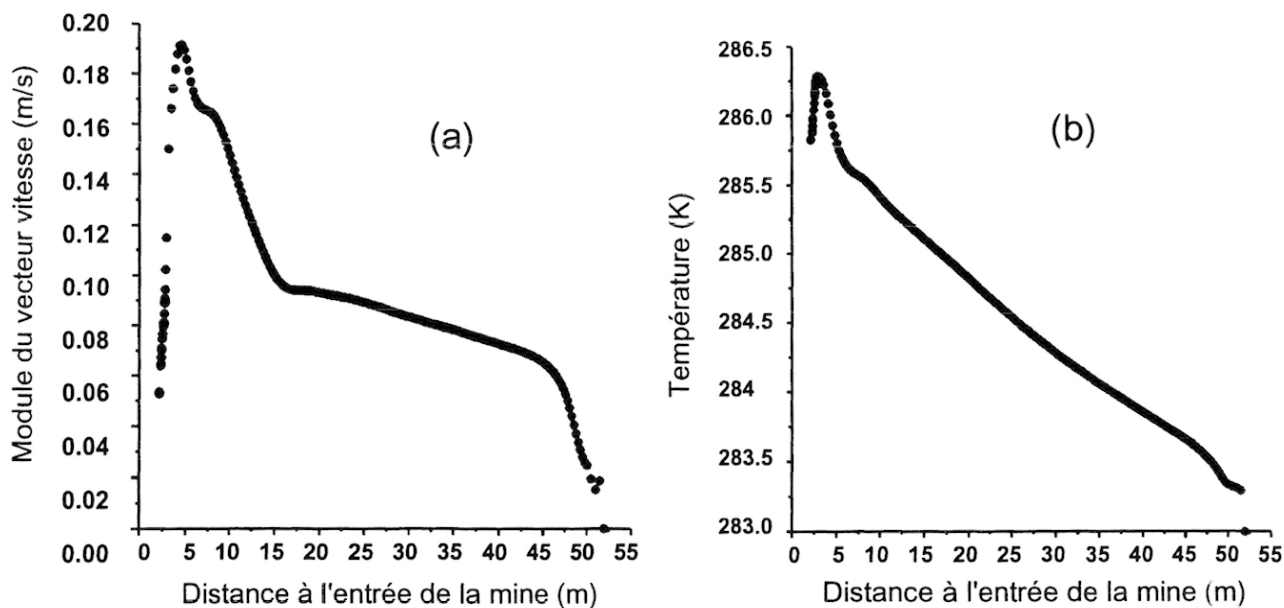


Fig. 17 : (a) Vitesse et (b) Température dans le plan de symétrie de la mine lors de la modélisation 3-D. Ces courbes ne sont ni conformes aux résultats de l'expérience ni compatibles avec l'approche théorique. Elles illustrent la difficulté à obtenir la convergence et les limites de la modélisation numérique dans sa forme actuelle (limites relatives à des contraintes de temps calcul).

CONCLUSION

Les approches expérimentale et théorique de l'aéragé dans une galerie horizontale et sans puits s'accordent et permettent d'établir une loi de vitesse de la forme :

$$V = \sqrt{\frac{T_{\text{ext}} - T_{\text{fond}}}{T_{\text{fond}}} g \frac{H}{2} \exp\left(-\frac{x}{4H}\right)},$$

où T_{ext} et T_{fond} sont les températures à l'extérieur et en fond de mine respectivement, g est l'accélération de la pesanteur, H la hauteur de la galerie et x la distance depuis son entrée.

Cette loi est au moins valable pour des galeries de largeur comprise entre 50 et 80 cm de large, la modélisation numérique 2-D semblant montrer que la vitesse serait sensiblement plus grande pour des galeries notablement plus large.

Parmi les conséquences de cette loi, on a pu établir qu'au-delà de 40 à 50 m, l'air n'est pas suffisamment renouvelé pour alimenter correctement le mineur. Bien qu'elle ne soit pas mathématiquement définie, cette distance de blocage apparaît être une notion pertinente sur le plan physique et bien de l'ordre de grandeur pressenti vers la fin des années 70 ou relaté par Agricola. Un résultat fondamental est que cette distance varie très peu avec la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur de la mine : d'un point de vue pratique, la distance à laquelle le mineur peut encore respirer sans difficulté n'est guère sensible aux effets saisonniers, même si le débit d'air, avant cette limite en dépend selon une loi en racine.

Il n'est pas exclu que la présence même du mineur, dont on n'a pas tenu compte ici, perturbant le système, confère quelques mètres de plus à la zone ventilée. Mais au-delà d'une certaine limite, cette source de chaleur supplémentaire n'est sans doute guère efficace, puisque, en tout état de cause, les distances en jeu impliquent un découplage des deux systèmes thermiques alors en jeu

(extérieur et mineur). Notons également qu'en période chaude, le mineur et l'extérieur constituent deux sources thermiques symétriques et donc antagonistes, si bien que l'aéragé doit s'avérer un tout petit peu moins efficace en été qu'en hiver (lorsque le mineur est présent). Enfin, et toujours du point de vue du bien-être du mineur, les hystérésis observées, qui sont certainement pertinents pour l'analyse de la dynamique de l'aéragé, ne constituent pas, d'un point de vue archéologique, des phénomènes déterminants.

REMERCIEMENTS

Cette étude a obtenu le soutien financier de l'Université de La Rochelle (crédits BQR), du District du Val d'Argent (Haut-Rhin), du Conseil Général du Haut-Rhin, de la commune de Ste-Marie-aux-Mines, de la Direction Régionale des Affaires Culturelles et de l'Association pour les Fouilles Archéologiques Nationales. Nous tenons à remercier Jean-François BOUVIER, Laurent BOUVIER, Isabelle GUYOT, Michel KAMMENTHALER, Robert LUOND, Gitta WOLF, Roger ZENNER et Philippe HENRY, qui, dans un bon esprit d'équipe, ont permis la réalisation expérimentale.

RÉFÉRENCES

Citée dans le texte :

- AGRICOLA, 1556 - *De Re Metallica*, Bâle. Traduction française d'Albert France-Lanord, Edts Klopp, Thionville, 1987, 508 p.
- ASCH, G., 1991 - *Les capteurs en instrumentation industrielle*, Edts Dunod.
- FLUCK, P., 1985 - *Éléments de climatologie du milieu souterrain minier d'autrefois. Spelunca Memoires*, 14, 97-99.
- GRANDEMANGE, J., 1988 - *L'aéragé dans les mines polymétalliques du massif Vosgien au XVIe s.* 113 Congr. Nat. Soc. Savantes, Strasbourg, *Techniques minières*, 407-420.
- FLORSCH, N., BEGHEIN, C., BOUVIER, J-F., CLERC, PATRICK, GUYOT, I., KAMMENTHALER, M., LUOND, R., WOLF, G. et ZENNER, R., 1998 - *Expérimentation sur l'aéragé des mines*, compte rendu de mission. Rapport et résultats scientifiques. Rapport remis au Service Régional de l'Archéologie, DRAC-Alsace.

La revue « Pierres et Terre », éditée par la Fédération du Patrimoine Minier, Centre du Patrimoine Minier, 4 rue Weisgerber, 68160 Sainte Marie-aux-Mines, présente au fil de ses numéros de nombreuses topographies et études sur les anciennes mines du massif Vosgien, de sa naissance jusqu'au numéro 32.

Autres références d'intérêt :

DUCHENE, M., 1978 - *L'aéragé des mines*. Cours de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 33 p.

REBOUX, P., 1982 - Cours de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Mécanique des fluides, II. Ecoulements industriels.

Et un ouvrage très récemment paru :

LISMONDE, B., 2002 - Climatologie du monde souterrain. Tome 1 - Vent des Ténèbres, 168 p. Tome 2 - Aérologie des systèmes karstiques, 362 p. ISBN 2-902670-47-8 et 48-6.

ANNEXE : CONCEPTION DES ANÉMOMÈTRES ET DES THERMOMÈTRES

Nous utilisons, pour les anémomètres, un système à température asservie : le fil est maintenu à une résistance constante (donc à une température constante) grâce à une boucle de rétroaction sur un pont de Wheatstone dont il est l'une des branches. C'est alors le courant qui augmente lorsque la vitesse de l'air augmente : on compense exactement la puissance ainsi dissipée grâce à une modulation du courant injecté dans la branche correspondante du pont. Pratiquement, un fil résistif est chauffé par effet Joule. Il échange de la chaleur avec l'air ambiant. Lorsque cet air est animé d'une vitesse, cet échange augmente. En terme de puissance, l'échange dépend linéairement de la différence de température entre le fil et l'air : $P = k(T_f - T_a)$, où P est la puissance dissipée, k un coefficient dépendant de la vitesse de l'air, T_f la température du fil et T_a la température ambiante. En injectant un courant I dans un fil chaud, on dissipe, à l'équilibre, la puissance RI^2 . La mesure de la d.d.p. sur le fil permet alors la mesure de la puissance. La résistance du fil dépend elle-même de la température de ce dernier : $R = R_0[1 + \alpha(T_f - T_0)]$ où R_0 est la résistance à la température de référence T_0 (qui n'est pas T_a). En utilisant l'asservissement à température constante, la résistance du fil est également constante et seul I varie de sorte à maintenir l'équilibre dans l'échange d'énergie fil-air. La réponse en fréquence d'un tel système est bonne, car l'inertie thermique du fil n'est que faiblement mise en jeu. L'utilisation d'un pont de Wheatstone facilite la mise en œuvre. La tension délivrée au pont est asservie de sorte à maintenir l'équilibre du pont, et donc finalement la température du fil (via sa résistance). Le montage que nous avons adopté après quelques tests est donné sur la figure A1. Son amorçage nécessite une mise en route de l'alimentation dissymétrique : branchement du positif d'abord. Nous avons utilisé un fil de platine de 0.025 mm de diamètre et de 5 cm de longueur. Avec les valeurs de composants utilisés, il chauffe à environ 250°C pour $R_3=2k\Omega$ et la moitié environ pour $R_3=1,5k\Omega$. A chaud, il est asservi à 20Ω .

MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DES ANÉMOMÈTRES

Notations :

v : vitesse

T_a : température ambiante

T_f : température du fil à chaud

R_f : résistance du fil à chaud

U : tension de sortie

U_0 : tension sur le fil chaud

T_{ref} : température de référence pour la résistivité du platine

R_0 : résistance du platine à T_{ref}

α : coefficient d'accroissement de résistivité du platine

On a : $R_f = R_0[1 + \alpha(T_f - T_a)]$ et $\alpha = \frac{\partial R_f}{\partial T_f}$.

La loi empirique entre la vitesse de l'air et la puissance dissipée est donnée par la description de la constante $k = A + B\sqrt{v}$. On a donc :

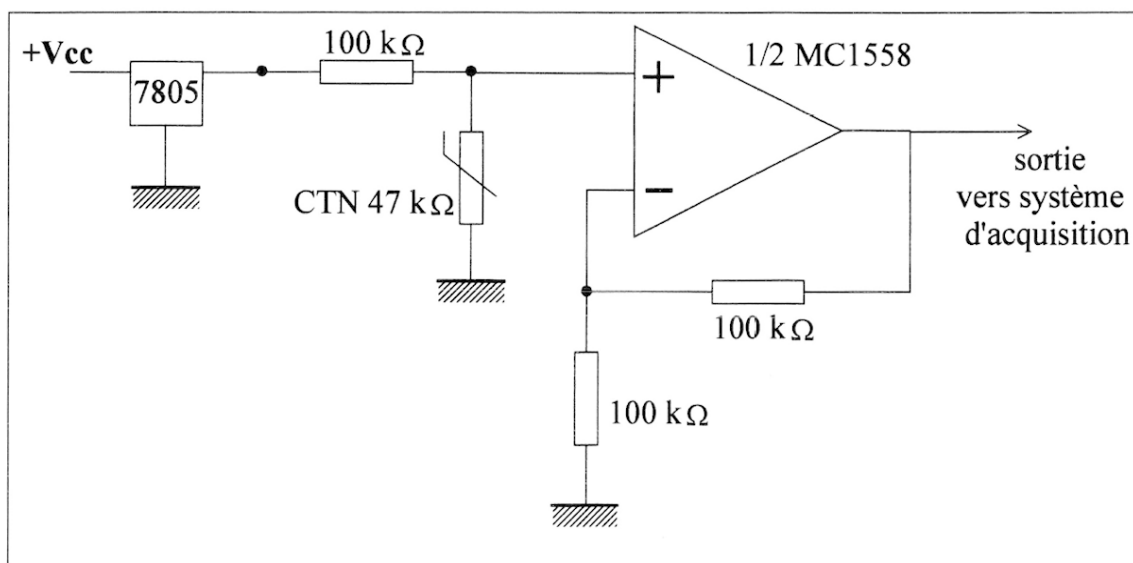
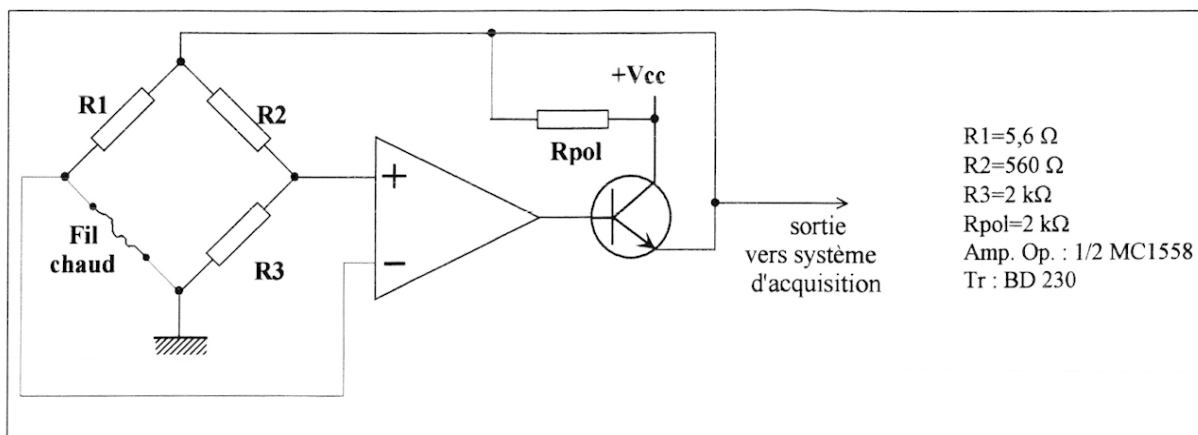
$$P = k(T_f - T_a) = \frac{U_0^2}{R_f}, \quad \text{avec } U_0 = U \frac{R_f}{R_1 + R_f} \quad \text{d'où } A + B\sqrt{v} = \frac{R_f}{(R_1 + R_f)^2} \frac{U^2}{(T_f - T_a)}.$$

$$\text{On en déduit : } \sqrt{v} = \frac{1}{B} \frac{R_f}{(R_1 + R_f)^2} \frac{U^2}{(T_f - T_a)} - \frac{A}{B}.$$

Le montage asservit R_f et non pas T_f . Si T_{ref} désigne température de référence pour la résistivité du platine, on va écrire :

$$T_f - T_a = (T_f - T_{ref}) + (T_{ref} - T_a) = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R_f}{R_0} - 1 \right) + (T_{ref} - T_a) = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R_1 R_3}{R_2 R_0} - 1 \right) + (T_{ref} - T_a),$$

ceci en tenant compte de l'équation d'équilibre du pont.



On a finalement une relation de la forme :
$$\sqrt{v} = a \left[\frac{U^2}{\frac{1}{\alpha} \left(\frac{R_1 R_3}{R_2 R_0} - 1 \right) + (T_{\text{réf}} - T_a)} \right] + b$$

On a intérêt à linéariser cette équation en posant : $x = \frac{U^2}{T_f - T_a}$ et $y = \sqrt{v}$,

car la relation est alors de la forme : $y = ax + b$. Les avantages de cette linéarisation sont multiples, entre le contrôle graphique de l'ajustement et la facilité numérique. Il est aussi plus facile d'introduire sous contrôle un terme non linéaire (ajustement d'une parabole ou même d'une cubique). Ceci dit, pour le problème qui nous intéresse ici, de tels perfectionnements n'ont pas forcément de sens.

On trouve pour le platine $\rho_{20^\circ\text{C}} = 10,58 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ et $\alpha = 0,00392\text{K}^{-1}$. Un fil de $25 \mu\text{m}$ de diamètre présente alors une résistance linéique de $200 \Omega/\text{m}$. On propose 5 cm de fil (éventuellement en plusieurs morceaux), si bien que R_0 est de l'ordre de 10Ω . A 275°C , on double cette résistance. Cette température est déjà importante : le fil se dilate, et il est nettement plus fragile. Avec le schéma donné ci-dessus, on obtient une bonne sensibilité. On peut préférer minimiser les risques d'auto-destruction en adoptant finalement une température moindre (environ 130°C), mais qui traumatise moins le fil chaud : on modifie les résistances en conséquence en repreneant les applications numériques. Ceci dit, la puissance dissipée reste difficile à chiffrer, car elle dépend de toutes les interactions fil/air. Aussi, on ne cherche pas ici à faire de calcul précis (ils sont toutefois assez bien décrits dans <http://www.flometrics.com/mhwa.htm>, où les nombres de Reynolds, Prandtl et Nusselt sont pris en compte). A l'expérimentation, on est arrivé à environ 200 mA de courant, ce qui dissipe à 130°C environ 1,5 W. Cela pose bien entendu la question de « l'auto-convection », du courant d'air créé par le fil lui-même. Cependant, ce paramètre est vraisemblablement « absorbé » par l'étalonnage.

CONCEPTION DES THERMOMÈTRES

La conception des thermomètres s'avère plus simple : on utilise pour cela des thermistances montées dans un diviseur de tension que l'on fait suivre d'un driver de ligne (en tension) constitué d'un amplificateur opérationnel (fig. A2).

CALIBRATION DES CAPTEURS

La calibration des anémomètres a été effectuée grâce un anémomètre commercial servant de référence et un simple thermomètre. Les ajustements se font par moindres carrés sur des bans de mesure construits pour l'occasion. Malheureusement, les conditions sont très différentes sur le terrain, en particulier du fait de la nécessité de longues lignes de signaux. Des petites chutes de tension sur les lignes (alimentation et signal proprement dit) dégradent certainement cette précision, et ce de manière inévitable (il eût fallu transmettre les données en numérique pour éviter cet écueil). Par exemple, une précision en température de $0,2^{\circ}\text{C}$ est à mettre en rapport avec la température *absolue*, soit environ 300 K, et représente donc $0,2/300 = 0,07\%$, donc mieux que le millième. Or même les convertisseurs 12 bit dont nous disposions, recevant un signal de l'ordre du volt, ne sauraient garantir une telle précision. Mais finalement, la tenue de ces instruments sur le terrain s'est avérée bonne malgré les conditions d'environnement et de transmission des signaux très différents de celles du laboratoire. Par prudence, on gardera à l'esprit les limites de ces calibrations et on préférera analyser les variations des signaux enregistrés plutôt que leurs valeurs absolues.