

# CO<sub>2</sub> et aérologie de la grotte de Milandre

Eric Weber<sup>1</sup>, Pierre-Yves Jeannin<sup>1</sup>, Baudoin Lismonde<sup>2</sup>, Pierre-Xavier Meury<sup>3</sup>, Philipp Häuselmann<sup>1</sup>

**Résumé :** Située dans le Jura suisse et explorée dès la fin des années 60 par le Spéléo-Club Jura, la grotte de Milandre abrite la rivière de la Milandrine qui s'écoule sous terre sur près de 4 km. Les variations des concentrations en CO<sub>2</sub> mesurées dans l'air de la grotte en 2011 sont discutées et mises en relation avec les circulations d'air dans les galeries. Les résultats montrent que les concentrations en CO<sub>2</sub> ne sont pas homogènes dans toutes les galeries. Il apparaît que la ventilation de la cavité est déterminante dans le mélange et le transit de ce gaz dans la grotte. Les processus de production, de mise en solution ou de dégazage et de transport du CO<sub>2</sub> sont cependant très complexes et encore en partie mal compris. Le transport étant lié à l'aérologie, des mesures de vitesses et de sens du courant sont effectuées ponctuellement dans la grotte depuis plusieurs années. Depuis 2011, un anémomètre enregistre en continu la vitesse et le sens du courant d'air toutes les 30 minutes. Ces données inédites montrent que la température extérieure est le principal moteur des variations de vitesse et de sens du vent dans la grotte de Milandre. Les premiers modèles suggèrent qu'il existe d'autres entrées que les deux entrées actuellement connues.

## Introduction

La grotte de Milandre, joyaux karstique en terre jurassienne, représente un patrimoine important qui se doit d'être protégé de l'influence humaine tout en restant accessible. Les mesures de protection mises en place

lors de la construction de l'autoroute A16 au-dessus de la cavité ont été efficaces, mais ont également permis d'acquérir de nombreuses données dans divers domaines et d'approfondir notre connaissance de cette grotte. Une partie des dispositifs de mesure sera maintenue durant les premières années de mise en service de l'autoroute.

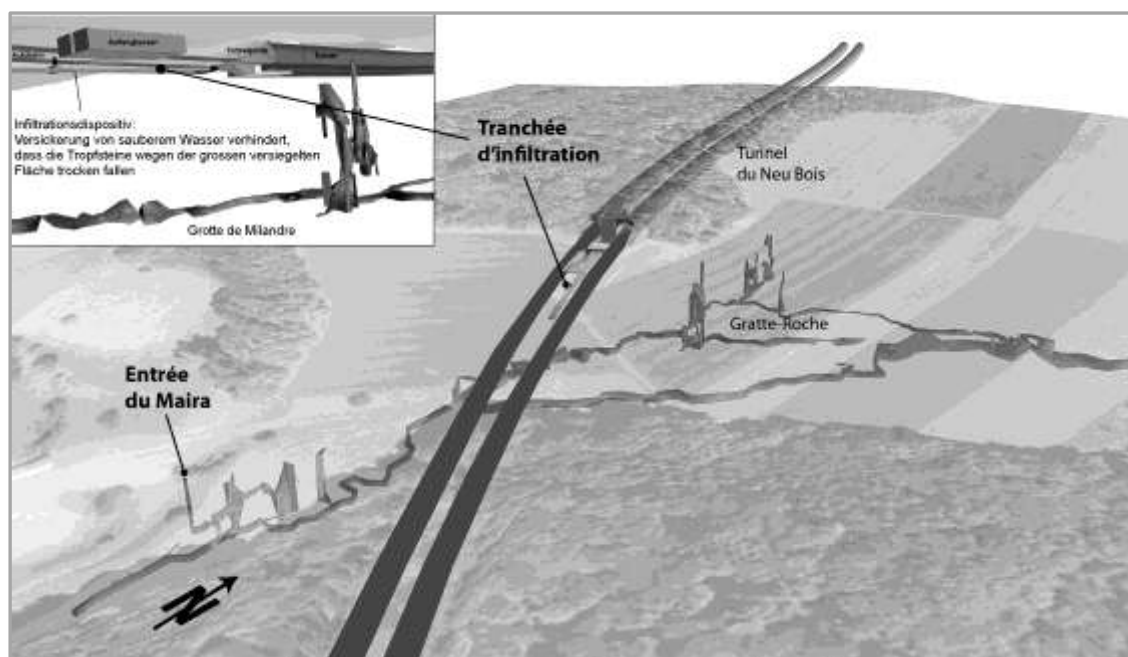


Fig. 1: Vue 3D du passage de l'autoroute au-dessus de la partie amont de la grotte de Milandre.

<sup>1</sup> Swiss Institute for Speleology and Karst studies,  
La Chaux-de-Fonds, eric.weber@isska.ch

<sup>2</sup> Univ. Grenoble I

<sup>3</sup> Géo et environnement sàrl, Delémont

Afin de limiter l'impact de l'étanchéification du terrain au droit de la galerie fortement concrétionnée du Gratte-Roche, il a été décidé d'infiltrer de l'eau enrichie artificiellement en CO<sub>2</sub> sous la chaussée (GROUPE KARST, 2003), ou plus précisément entre les deux voies (fig. 1, « tranchée d'infiltration »). Pour garantir le dépôt de calcite dans la grotte, il est indispensable que l'eau injectée ait une pression partielle de CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>) supérieure à celle de la grotte (GROUPE KARST, 2004). C'est pourquoi des mesures de CO<sub>2</sub> dans la grotte étaient nécessaires pour y caractériser les teneurs ainsi que leurs variations, et pouvoir ajuster la pCO<sub>2</sub> de l'eau injectée (GROUPE KARST, 2007, 2009, 2010). Ces données ont également permis d'améliorer notre compréhension du climat de la cavité et de son fonctionnement en relation avec les courants d'air. C'est précisément l'objet de cet article.

## Mesure en continu du CO<sub>2</sub> pour l'année 2011

### Evolution annuelle

Deux appareils de mesures du CO<sub>2</sub> et de la température de l'air ont été installés dans la grotte aux emplacements présentés à la figure 3. La figure 2 présente les données enregistrées.

Des fluctuations saisonnières de la teneur en CO<sub>2</sub> sont clairement visibles sur ce graphique. Comme cela avait déjà été montré dans de précédents rapports (GROUPE

KARST, 2009, 2010), les teneurs en CO<sub>2</sub> maximales (>2.5 %) et minimales (<0.2 %) sont mesurées en hiver. Pourquoi? Car c'est en hiver que les crues sont les plus fréquentes et donc le dégazage de CO<sub>2</sub> le plus fort, mais c'est aussi en hiver que la ventilation depuis l'aval crée un appel d'air frais dans la grotte par fort contraste de température. Par rapport à 2010, on remarque que le CO<sub>2</sub> au Gratte-Roche subit des variations journalières importantes entre avril et septembre. Ce phénomène avait déjà été observé en 2009, mais pas en 2010.

Concernant les températures intérieures, des oscillations journalières similaires à celles du CO<sub>2</sub> sont visibles au Gratte-Roche avec une amplitude de l'ordre de 0.02 °C. Cependant, la température à long terme au Gratte-Roche reste très stable - aux alentours de 10.2 °C. A l'affluent de Bure la température est légèrement croissante jusqu'au début de l'hiver. Vers la fin de l'année, de soudaines arrivées d'air frais dans la cavité font redescendre la température d'environ 0.04 °C.

Si globalement les deux courbes de CO<sub>2</sub> ont une évolution similaire, une anti-corrélation est ponctuellement visible sur les chroniques. A deux reprises au début de l'hiver 2011, le CO<sub>2</sub> à l'affluent de Bure augmente alors qu'il diminue au Gratte-Roche et inversement. A deux reprises entre mars et avril et à deux reprises en décembre c'est le CO<sub>2</sub> au Gratte-Roche qui augmente alors que le CO<sub>2</sub> à l'affluent de Bure baisse. Le reste de l'année les deux courbes fluctuent de manière assez semblable si l'on écarte les variations journalières observées au Gratte-Roche.

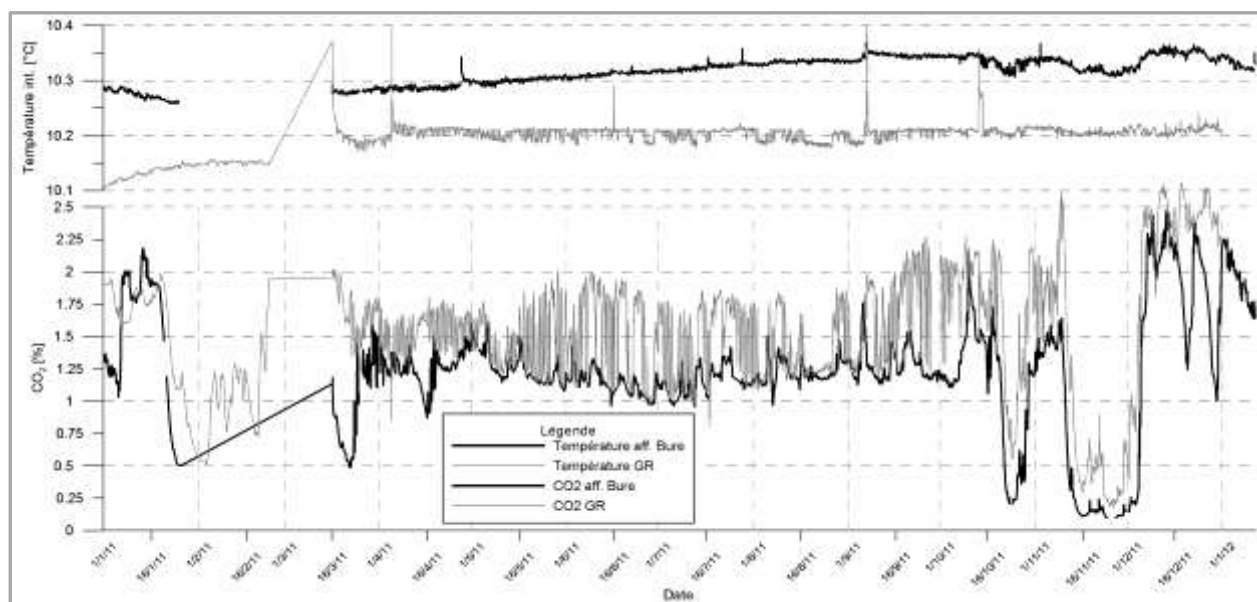


Fig. 2: En gris: CO<sub>2</sub> et température mesurés dans la galerie du Gratte-Roche (GR) en 2011.

En noir: CO<sub>2</sub> et température mesurées vers l'Affluent de Bure.

D'importantes variations journalières de CO<sub>2</sub> sont visibles au Gratte-Roche alors qu'elles sont nettement plus faibles à l'Affluent de Bure.

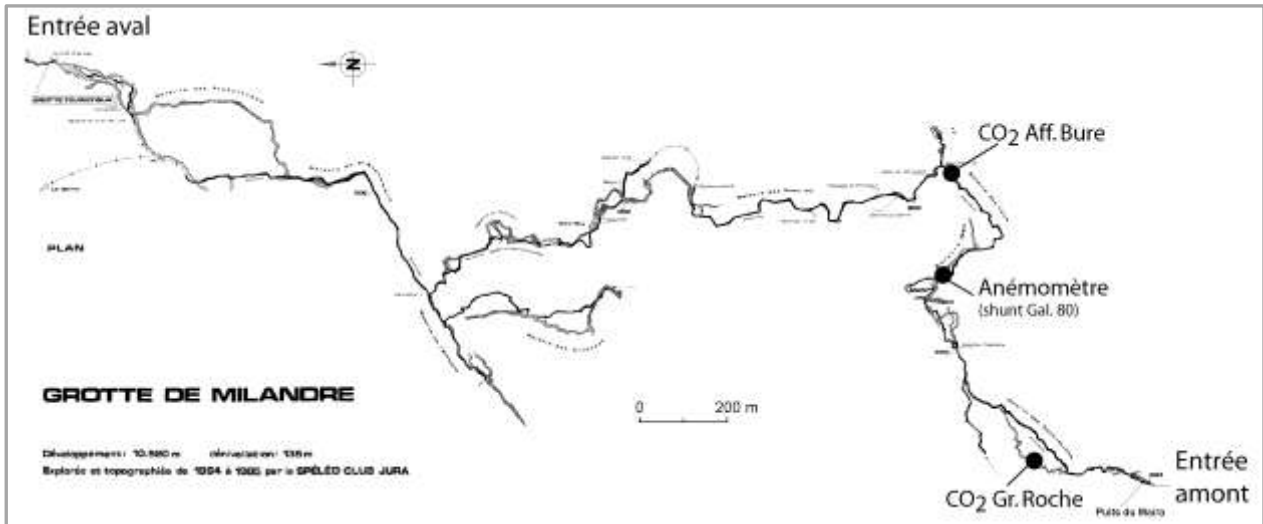


Fig. 3: Situation des appareils de mesure en continu de la teneur en CO<sub>2</sub>.

### Evolution à court terme

Des variations journalières de la teneur en CO<sub>2</sub>, de l'ordre de 1 %, ont été mesurées entre avril et octobre 2011 dans la galerie du Gratte-Roche. A partir de mesures effectuées en 2009 (GROUPE KARST, 2009), il avait été montré que ces fluctuations sont présentes lorsque le temps est particulièrement chaud, ce qui fut le cas de l'année 2011. La figure 4 montre que les augmentations de la température extérieure (T<sub>ext</sub>) induisent une diminution de CO<sub>2</sub> et inversement. Lorsque T<sub>ext</sub> augmente la ventilation augmente et le CO<sub>2</sub> baisse. C'est donc la température extérieure qui régule le flux de CO<sub>2</sub> produit dans le sol au-dessus de la galerie du Gratte-Roche.

Quelques cas particuliers méritent des commentaires complémentaires.

#### Cas 1: Arrêt des variations journalières malgré des températures extérieures élevées.

La figure 5 montre qu'entre le 17.08.2011 et le 26.08.2011 les variations journalières de CO<sub>2</sub> au Gratte Roche se sont brusquement estompées. Le taux de CO<sub>2</sub> s'est stabilisé à 1.2 % pendant 9 jours malgré une température extérieure élevée avec des minima nocturnes proche de 20 °C. La vitesse du courant d'air dans la galerie principale était également élevée avec des valeurs comprises entre 0.4 et 1 m/s circulant de l'amont vers l'aval (voir fig. 7).

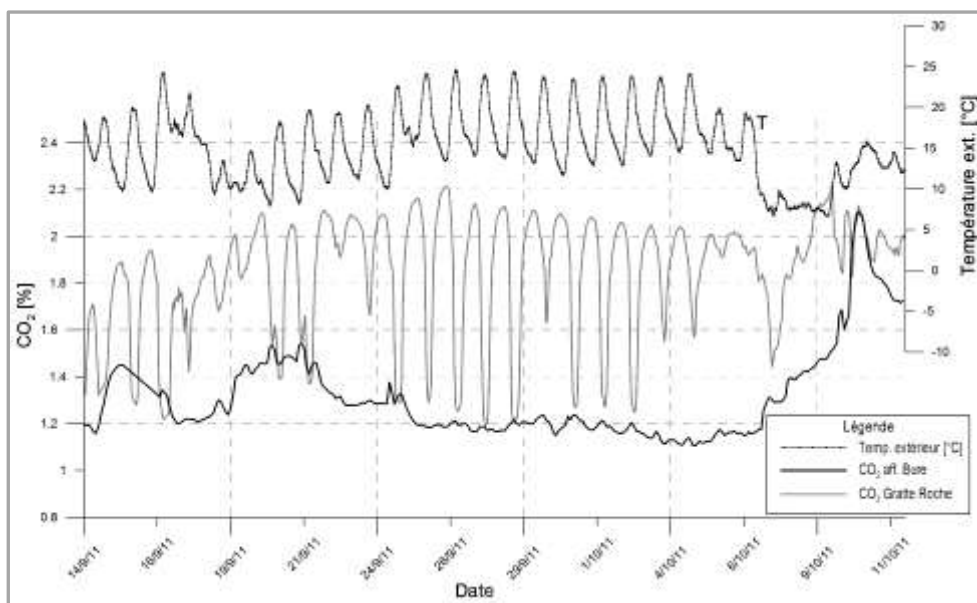


Fig. 4: Evolution du CO<sub>2</sub> au Gratte-Roche (gris) et à l'affluent de Bure (noir) ainsi que de la température extérieure (courbe du haut) entre le 14/9/11 et le 11/10/11. La relation entre la température extérieure et les variations de CO<sub>2</sub> au Gratte Roche est ici bien visible.

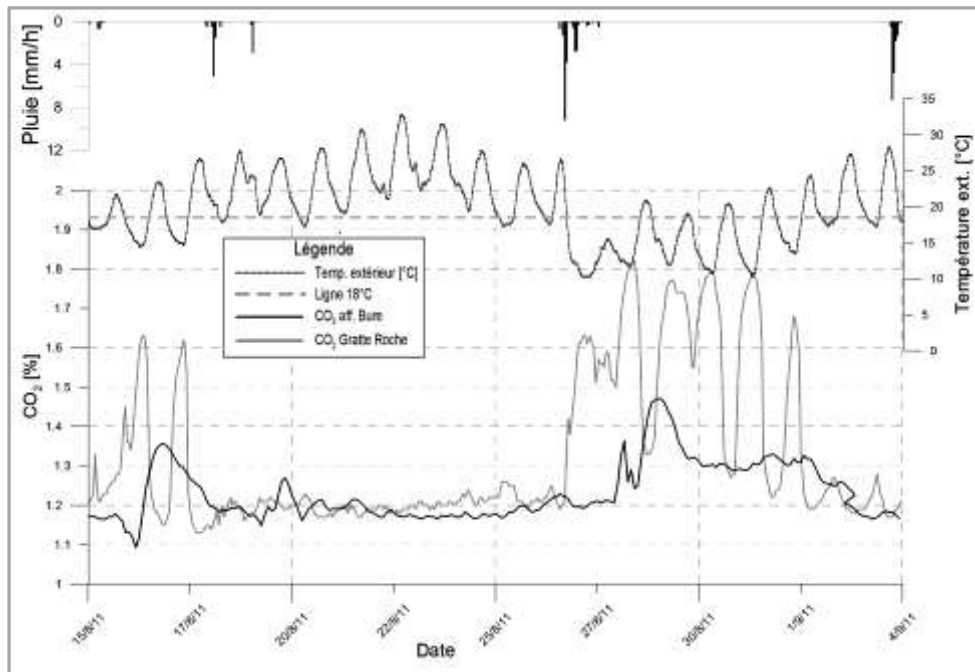


Fig. 5: Arrêt des variations journalières de CO<sub>2</sub> au Gratte-Roche entre le 17 et le 26.08.2011. La ligne en tireté marque la limite de 18 °C. Lorsque la température extérieure reste au-dessus de cette limite, les fluctuations journalières s'arrêtent.

Une rapide analyse montre que lorsque la température extérieure dépasse 18.5 °C, le Gratte Roche est fortement ventilé et le taux de CO<sub>2</sub> correspond alors au taux mesuré à l'affluent de Bure dans le conduit principal. En dessous de 18.5 °C la ventilation diminue et le taux de CO<sub>2</sub> augmente - probablement en raison d'un fort dégazage dans cette galerie très concrétionnée.

Ce cas particulier semble montrer que le courant d'air au Gratte-Roche ne fonctionne pas de la même manière que dans le conduit principal. Dans ce dernier, le courant circule de l'amont vers l'aval si  $T_{ext}$  est supérieur à 10 °C et dans le sens contraire lorsque  $T_{ext}$  est inférieur à 10 °C (fonctionnement d'un *tube à vent*). Il semble que dans le Gratte-Roche le courant est pratiquement nul dès que  $T_{ext}$  est inférieure à 18.5 °C.

**Cas 2:** *Anti-corrélation entre le CO<sub>2</sub> du Gratte-Roche et de l'Affluent de Bure.*

A quelques reprises, il apparaît que l'évolution du CO<sub>2</sub> dans le Gratte-Roche est contraire à celle de l'Affluent de Bure. Entre le 12 et le 17 avril 2011 le CO<sub>2</sub> a subi une hausse de 0.2 % au Gratte-Roche alors qu'il a baissé de 0.3 % à l'Affluent de Bure. Pour l'Affluent de Bure ce phénomène est expliqué par le fait que pour des températures extérieures inférieure à 10 °C l'air frais (extérieur) est aspiré par l'entrée inférieure de la grotte et fait baisser le taux de CO<sub>2</sub>; c'est le principe d'un tube à vent simple. Au Gratte-Roche, il est difficile d'expliquer cette hausse. On remarque en effet que durant

d'autres périodes froides, le CO<sub>2</sub> au Gratte-Roche diminue en même temps qu'à l'Affluent de Bure. Pour le moment, aucun élément ne permet de comprendre ce phénomène d'anti corrélation.

**Vitesse et sens du courant d'air**

En 2011, un anémomètre mesurant vitesse et sens du courant d'air toutes les 30 minutes a été installé. Ces données sont stockées par l'appareil et récupérées lors des tournées de maintenance. La figure 3 montre la position de l'appareil dans la cavité. Cet emplacement a été choisi, car c'est un des seuls endroits où tout le courant d'air passe dans une galerie dont la section est assez petite pour que le courant soit perceptible et mesurable. Dans la galerie principale de la Milandrine le courant d'air n'est pas mesurable, car plus la section est grande plus le courant est faible

La figure 6 présente les mesures de la vitesse et du sens du vent enregistrées au shunt de la galerie 80. Les valeurs extrêmes sont comprises entre +0.9 et -0.7 m/s. La section de la galerie à cet endroit étant d'environ 2.5 m<sup>2</sup>, le débit d'air varie entre 0 et 2 m<sup>3</sup>/s, dans un sens comme dans l'autre. Lorsque les valeurs sont positives le courant circule de l'amont vers l'aval et lorsqu'elles sont négatives le courant s'inverse et circule de l'aval vers l'amont. Dans cette galerie, le fonctionnement est donc typique d'un tube à vent avec une entrée inférieure et une entrée supérieure. A partir de décembre 2011, l'appareil a cessé de fonctionner correctement et a été ressorti de la cavité.

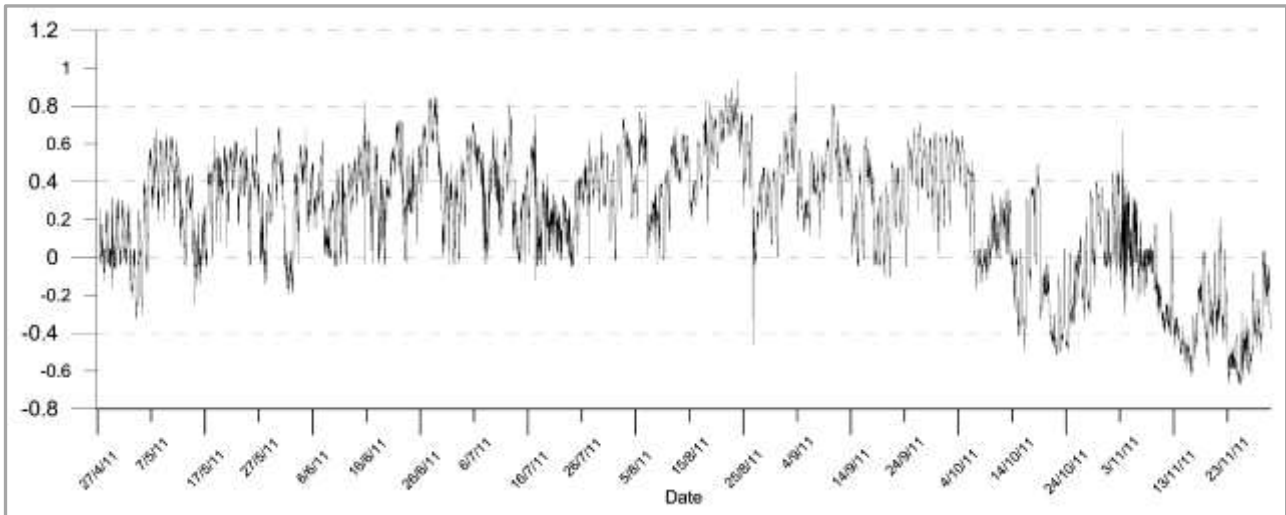


Fig. 6: Vitesse du vent mesurée dans le shunt de la galerie 80 entre mai et décembre 2011. A partir de décembre l'appareil ne semblait plus fonctionner correctement, il a été ressorti de la cavité. Les valeurs positives indiquent un courant d'air circulant de l'amont vers l'aval (aspirant au Maira), les valeurs négatives un courant de l'aval vers l'amont (soufflant au Maira).

La figure 7 compare les valeurs de vitesse du vent et de température extérieure sur une période de deux mois. La corrélation entre les deux courbes est bonne ( $R^2=0.84$ ). Ce résultat met en évidence l'effet de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de la cavité sur le courant d'air. En effet, dans le cas d'un tube à vent, ces deux paramètres interviennent directement dans le calcul de la différence de pression motrice, laquelle met en mouvement les masses d'air dans les vides souterrains [LISMONDE, 2002]. Ci-dessous la formule du calcul de la différence de pression motrice et la formule du calcul des masses volumiques de l'air. C'est dans cette seconde formule qu'intervient la température.

$$\Delta P = (\rho_i - \rho_e) \cdot g \cdot H$$

- Avec  $\Delta P$ : Différence de pression motrice  
 $\rho_i$ : Masse volumique de l'air intérieur  
 $\rho_e$ : Masse volumique de l'air extérieur  
 $g$ :  $9.81 \text{ m/s}^2$   
 $H$ : Différence d'altitude entre les entrées = 136 m pour Milandre

$$\rho_i = \rho_0 \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T}$$

- Avec  $T_0$ : Température à 0 °C en kelvin soit 273 k  
 $P_0$ : Pression atmosphérique en condition normal soit  $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$   
 $T$ : Température intérieure ou extérieure suivant si on calcule la masse vol. int. ou ext.  
 $P$ : Pression atmosphérique

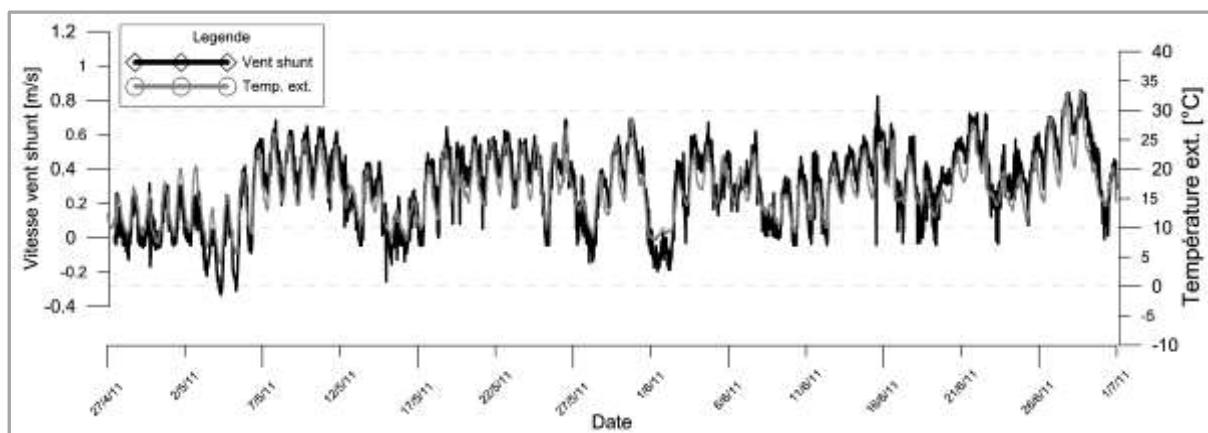


Fig. 7: Vitesse du vent à Milandre (gris clair) et température extérieure (gris foncé et points). La corrélation entre les deux courbes est excellente et montre que les variations de la température extérieure sont le principal moteur de la mise en mouvement de la masse d'air dans cette galerie.

## Circulations d'air dans la grotte

Les mesures de vent sont de très bonne qualité. Elles permettent de consolider nos hypothèses sur le fonctionnement aérologique de la cavité. Il ressort notamment que ce tronçon de galerie est représentatif du fonctionnement d'un tube à vent à deux entrées - d'altitude différente. Ceci ne veut pas dire que la grotte de Milandre ne possède que deux entrées, mais cela signifie que ce tronçon est situé entre une zone amont avec l'entrée la plus élevée de la grotte (Entrée S1) et éventuellement d'autres entrées (dont celle du Maira), et une zone aval avec l'entrée inférieure connue de la grotte et éventuellement d'autres entrées (S2). Comme le montre la figure 8, seule une partie du courant d'air circule par la galerie 80. Dans sa note sur la grotte de Milandre, LISMONDE (2011) montre que la grotte possède au moins quatre entrées, deux à l'amont et deux à l'aval. L'analyse du modèle numérique de terrain à 2 m montre que si une autre entrée amont existe entre le Maira et l'affluent de Bure, elle sera forcément plus élevée en altitude que l'entrée du Maira.

Le système de Milandre peut donc être schématisé par un tube à vent à 4 entrées tel que présenté sur la figure 8. En calculant le débit d'air sur le tronçon F-E à partir de la formule ci-dessous, on constate la galerie 80 où se trouve l'anémomètre doit se situer entre les points E et A, car le débit total calculé dans la grotte sur le tronçon F-E est nettement supérieur à celui mesuré dans la galerie 80 par l'appareil.

Sur la base de ce schéma, un petit modèle aéralgique a été construit afin de calculer les 3 résistances aéralgiques qui définissent ce système simplifié soit  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_p$ . Les calculs sont reproduits pour la période estivale et hivernale. Les résultats sont les suivants:

En été:	$R_p = 2.15 \text{ Pa m}^{-6} \text{ s}^2$	$R_1 = 6.19 \text{ Pa m}^{-6} \text{ s}^2$
	$R_2 = 6.08 \text{ Pa m}^{-6} \text{ s}^2$	
En hiver:	$R_p = 2.14 \text{ Pa m}^{-6} \text{ s}^2$	$R_1 = 4.38 \text{ Pa m}^{-6} \text{ s}^2$
	$R_2 = 5.72 \text{ Pa m}^{-6} \text{ s}^2$	

On voit que  $R_1$  varie entre hiver et été ce qui signifie que le modèle est imparfait. La résistance  $R_1$  ne représente pas la résistance aéralgique du conduit où se trouve l'anémomètre, mais la résistance globale des conduits A-E, C-E et E-F.

Etant donné que nous disposons maintenant des données de vitesse du vent dans le shunt de la galerie 80 pendant plusieurs mois, ainsi que de la température extérieure, il est possible de calculer la résistance aéralgique du conduit A-E, que nous appellerons  $R_3$ , selon la formule ci-dessous.

$$q_m = \sqrt{\frac{|\Delta P_M|}{R}}$$

En effet, la différence de pression motrice peut être calculée avec la formule ci-dessus et  $q_m$  peut être facilement déduit en multipliant la vitesse du vent mesurée en continu par la section qui est de  $2.5 \text{ m}^2$ . En ajustant  $R_3$  on essaie ensuite de retrouver les valeurs  $q_m$  mesurées. Le résultat montre que la valeur  $R_3$  est d'environ  $30 \text{ Pa m}^{-6} \text{ s}^2$ . Cette résistance est nettement plus élevée que les résistances  $R_p$ ,  $R_1$  et  $R_2$ . Le fait que l'entrée du Maira soit fermée par une bâche pourrait expliquer cette forte résistance. Il serait très intéressant de mesurer pendant 4 à 5 jours la vitesse du courant au shunt avec l'anémomètre en ouvrant l'entrée du Maira, puis en la refermant. En principe l'ouverture de l'entrée du Maira devrait modifier les résistances aéralgiques respectives des entrées A et C et, donc, les proportions d'air circulant par les entrées A et C.

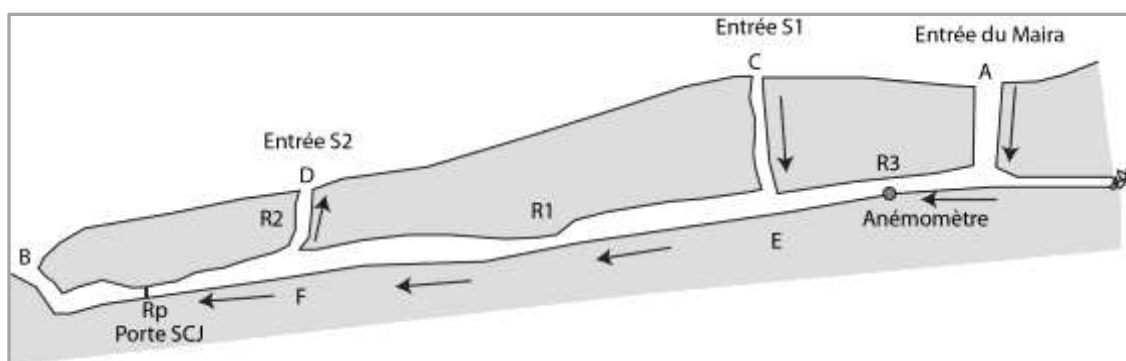


Fig. 8: Schéma du fonctionnement aérologique de la grotte de Milandre. L'anémomètre a été placé dans un resserrement entre l'entrée connue du Maira et une autre entrée supérieure supposée S1. La résistance aéralgique de ce conduit est définie par la résistance  $R_3$ .

## Conclusions

Les mesures en continu du courant d'air ouvrent de nouvelles perspectives pour la compréhension de l'aérogologie de la grotte de Milandre. Cette étape est importante, car l'évolution des concentrations en CO<sub>2</sub> dans la grotte sont influencées par les mouvements des masses d'air.

Grâce à de nouvelles mesures de CO<sub>2</sub> et de la vitesse du courant d'air, un premier modèle aérogologique développé

en 2011 ([LISMONDE, 2011]) a pu être validé et amélioré. Avec de nouvelles données il devrait être possible d'améliorer encore ce modèle. A terme, l'objectif serait de pouvoir simuler les mouvements de l'air dans la grotte à partir des mesures de température, et de pouvoir estimer les teneurs en CO<sub>2</sub> à différents endroits de la grotte. D'éventuelles anomalies pourront alors être interprétées comme des pollutions ou des effets du système d'injection d'eau mis en place pour limiter l'assèchement des concrétions de la grotte suite au recouvrement étanche de l'autoroute.

## Références

- GROUPE KARST (2003): A16-Section 2: Etude d'impact sur la grotte de Milandre. Rapport annuel 2003. *Technical report* : Canton du Jura
- GROUPE KARST (2004): A16-Section 2: Etude d'impact sur la grotte de Milandre. Rapport annuel 2004. *Technical report* : Canton du Jura
- GROUPE KARST (2009): A16-Section 2: Etude d'impact sur la grotte de Milandre. Rapport annuel 2009. *Technical report* : Canton du Jura
- GROUPE KARST (2010): A16-Section 2: Etude d'impact sur la grotte de Milandre. Rapport annuel 2010. *Technical report* : Canton du Jura
- LISMONDE, B., 2002: Aérogologie des systèmes karstiques. Climatologie du monde souterrain tome 2. CDS Isère.
- LISMONDE, B., 2011: Aérogologie de la Grotte de Milandre. Note interne.