



de Chablis

SIRET 447 617 291 00011
APE 9312Z

SPELEO-CLUB DE CHABLIS

Association loi 1901 – Statuts déposés à la Préfecture d'Auxerre n°4300 le 21 janvier 1971

Affilié à la Fédération Française de Spéléologie n°B-89-002 depuis 1971

Agrément Jeunesse et Sports n°89S83 du 10 décembre 1973

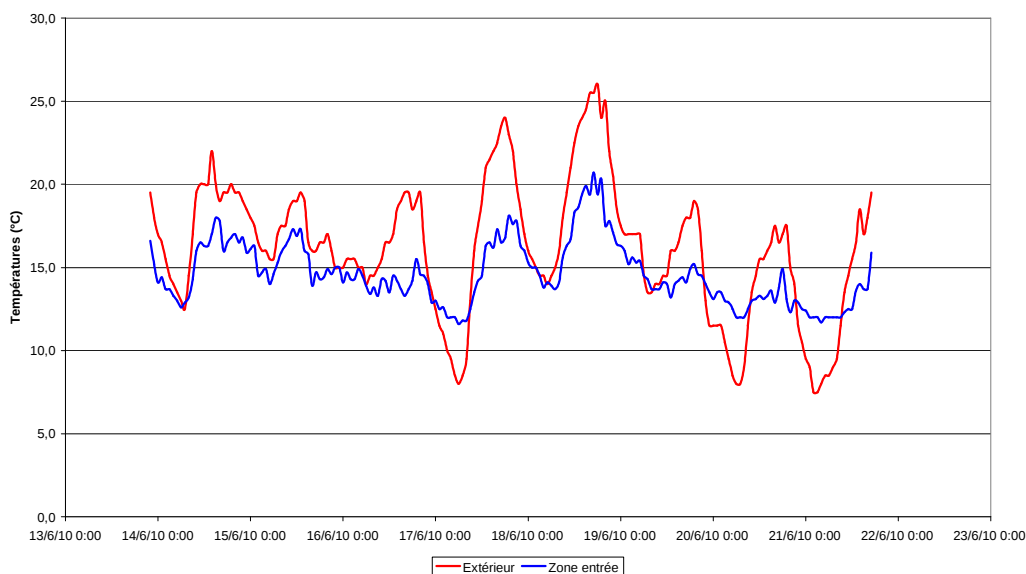
Déclaration Etablissement d'Activités Physiques et Sportives n°ET00160 du 25 avril 2001

Site Internet : www.scchablis.com

ANALYSE ET INTERPRETATION DES VARIATIONS DE LA TEMPERATURE DANS UNE CAVITE SOUTERRAINE

GROTTE DE LA GRANDE FONTAINE

(Voutenay-sur-Cure – Yonne)



SOMMAIRE

1.	Introduction	5
2.	Rappels concernant la cavité et les expériences	5
3.	Précision des mesures	6
4.	Validation des mesures	8
4.1.	Moyennes et Amplitudes thermiques.....	8
4.2.	Les mesures dans la cavité	8
4.2.1.	Rappel : zonage climatique d'une cavité	8
4.2.2.	Zonage climatique de la grotte de la Grande Fontaine	9
4.3.	Validation des mesures extérieures à Voutenay	10
4.4.	L'influence du temps	12
4.4.1.	Influence de la température extérieure.....	13
4.4.2.	Influence de la pression.....	14
5.	Interprétations des mesures	15
5.1.	Distribution des températures.....	15
5.2.	Situation avec courant d'air aspirant.....	17
5.2.1.	Extrapolation par amortissement des variations de température en fonction de la distance de l'entrée	17
5.2.2.	La température de paroi	18
5.2.3.	Conclusion	20
5.3.	Situation avec courant d'air soufflant.....	20
5.3.1.	Calcul de la température en situation de courant d'air soufflant	21
5.3.2.	Conclusion	21
6.	Application sur la période du 13 au 20 juin 2009	22
7.	Conclusion	26
8.	Bibliographie	27

1. Introduction

Au cours du printemps 2009, le Spéléo-Club de Chablis a conduit deux campagnes de mesures de températures dans la grotte de la Grande Fontaine située sur la commune de Voutenay-sur-Cure (RANNINGER N. et D., 2009 – BOUCHARD et AL., 2010). La démarche visait à comprendre le régime dynamique de la cavité, à savoir les périodes où celle-ci aspirait ou soufflait, et ce dans le but de déterminer l'intérêt ou non de continuer les efforts de désobstruction jusque là entrepris. Ces mesures faisaient suite à une autre expérience tentée en décembre 2007, de ventilation forcée de la cavité (WILLEFERT, 2008).

L'analyse rapide des premiers résultats n'ont pas permis de conclure de façon déterminante sur le fonctionnement des courants d'air de la cavité. En première approche, on constate que la température de la zone d'entrée de la cavité se réchauffe en même temps que celle de l'air extérieur atteint son maximum, ce qui laisse supposer une aspiration en période chaude. Mais l'enregistrement de variations rapides de températures fait penser à une forme de « respiration » de la grotte. Ces constatations ont été faites uniquement par examen visuel des courbes de températures. Or les résultats sont d'autant plus difficiles à analyser que, de par son inertie thermique, la mesure de température de l'air est facilement brouillée par une turbulence thermique naturelle, mesurable à l'échelle de la minute.

C'est pourquoi l'étude suivante a pour ambition d'analyser plus finement l'ensemble des enregistrements obtenus. En effet, les pas de temps des mesures – toutes les heures ou toutes les deux minutes – présentent une richesse d'informations que notre curiosité pousse à investiguer, et ce, dans l'espoir de mieux cerner et comprendre les phénomènes constatés.

2. Rappels concernant la cavité et les expériences

La grotte de la grande Fontaine se situe à Voutenay-sur-Cure dans le département de l'Yonne. Cette cavité, longue de 78 m pour une profondeur de 8 m, a été découverte en avril 2004 par le Spéléo-Club de Chablis au cours d'une prospection. Elle se présentait alors comme un simple petit « trou » d'une vingtaine de centimètres de diamètre, s'ouvrant dans un talus herbeux et caractérisé par un courant d'air soufflant de façon très sensible. La présence de la source de la Grande Fontaine, située 60 m au nord-ouest et à moins de 10 m en contre bas a suscité l'intérêt des spéléologues qui ont alors entrepris une série de travaux de désobstruction.

Nous sommes dans le Bathonien, dans un calcaire peu compact à Oolithe blanche, sur un secteur très fissuré, correspondant à la zone de détente en flanc de la colline sus-jacente.

L'élargissement de l'accès a ouvert un petit puits, qui se désescalade facilement, et qui permet d'atteindre une galerie étroite et déclive, dans laquelle on se faufile pour aboutir sur une fissure horizontale. Cette première galerie part vers l'est et recoupe une nouvelle galerie qui se dirige plein nord, en direction de la source. Les nombreuses fissures que l'on croise, s'amenuisent toutes au point de devenir impénétrables, ou s'achèvent sur des trémies. Parfois, il faut se mettre à plat ventre, parfois on se tient aisément debout, mais c'est à quatre pattes que l'on parcourt le plus souvent la cavité.

Des traces d'eau se distinguent très nettement, et notamment des micro-méandres en certains plafonds. Il est probable qu'une période de crue, les parties basses de la cavité soient noyées. Toutefois, la relation avec la source de la Grande Fontaine n'a jamais pu être démontrée.

Si les efforts entrepris n'ont donc pas été récompensés, les mouvements d'air ressentis et ses variations n'ont pas cessé de nous interpeller tout au long des travaux de désobstruction. Ce courant d'air, parfois très sensible, est tour à tour soufflant, aspirant ou inexistant. Il a donc suscité beaucoup d'interrogations. Pour comprendre ces mouvements d'air et déterminer s'il était intéressant de continuer les travaux de recherches dans cette grotte, le Spéléo-Club de Chablis a tenté plusieurs expériences et mesures :

- En 2007, une expérience de ventilation forcée n'a pas permis de détecter une zone particulière d'absorption du courant d'air (WILLEFERT, 2008).
- En 2009, des mesures de températures réalisées entre le 30 mars et le 30 mai 2009, à l'entrée de la cavité, ont conclu à une « respiration » de la cavité avec des phases d'aspiration durant la nuit. Toutefois, l'enregistrement horaire des températures est apparu insuffisant pour interpréter finement le phénomène de respiration (RANNINGER, 2009).

- Une seconde campagne de mesures a été réalisée dès le mois de juin 2009. Avec des enregistrements plus fréquents (toutes les 2 minutes). Cette deuxième étude visait à obtenir un suivi plus fin des variations de températures, permettant une interprétation dans le but d'expliquer les modes aspirant, soufflant ou stable de la cavité. Cette étude a conclu que la cavité ne pouvait pas donner « *un accès facile à un gros volume, celui-ci, s'il existait, se caractérisant par une meilleure régularité des échanges entre la cavité et l'extérieur. Les variations de courant d'air s'expliqueraient alors par la fracturation importante de cette zone, qui se caractérise dans la cavité par un grand nombre de fissures certainement en contact avec l'extérieur, mais cachées par les éboulis.* » (Bouchard et al., 2010).

3. Précision des mesures

Quatre sondes ont été employées. Ce sont des sondes de type « boutons », plutôt utilisées dans le contrôle du suivi et de la qualité alimentaire, que dans la mesure météorologique. Elles sont conçues pour fonctionner sur une plage de température de -40°C à $+85^{\circ}\text{C}$, avec une précision de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ et une résolution de $0,1^{\circ}\text{C}$.



Sondes

La fréquence d'enregistrement peut être programmée de 1 seconde à 273 heures. La capacité mémoire étant fixe, plus les enregistrements sont nombreux, plus la période sur laquelle s'étend la mesure sera courte. Lors de la première campagne de mesures (avril et mai 2010), le pas de temps avait été fixé à 60 minutes, ce qui a permis de disposer de deux mois d'enregistrement. Lors de la seconde campagne, le pas de temps a été fixé à 2 minutes, et l'enregistrement continu s'est étalé sur une semaine.

Emplacement des sondes



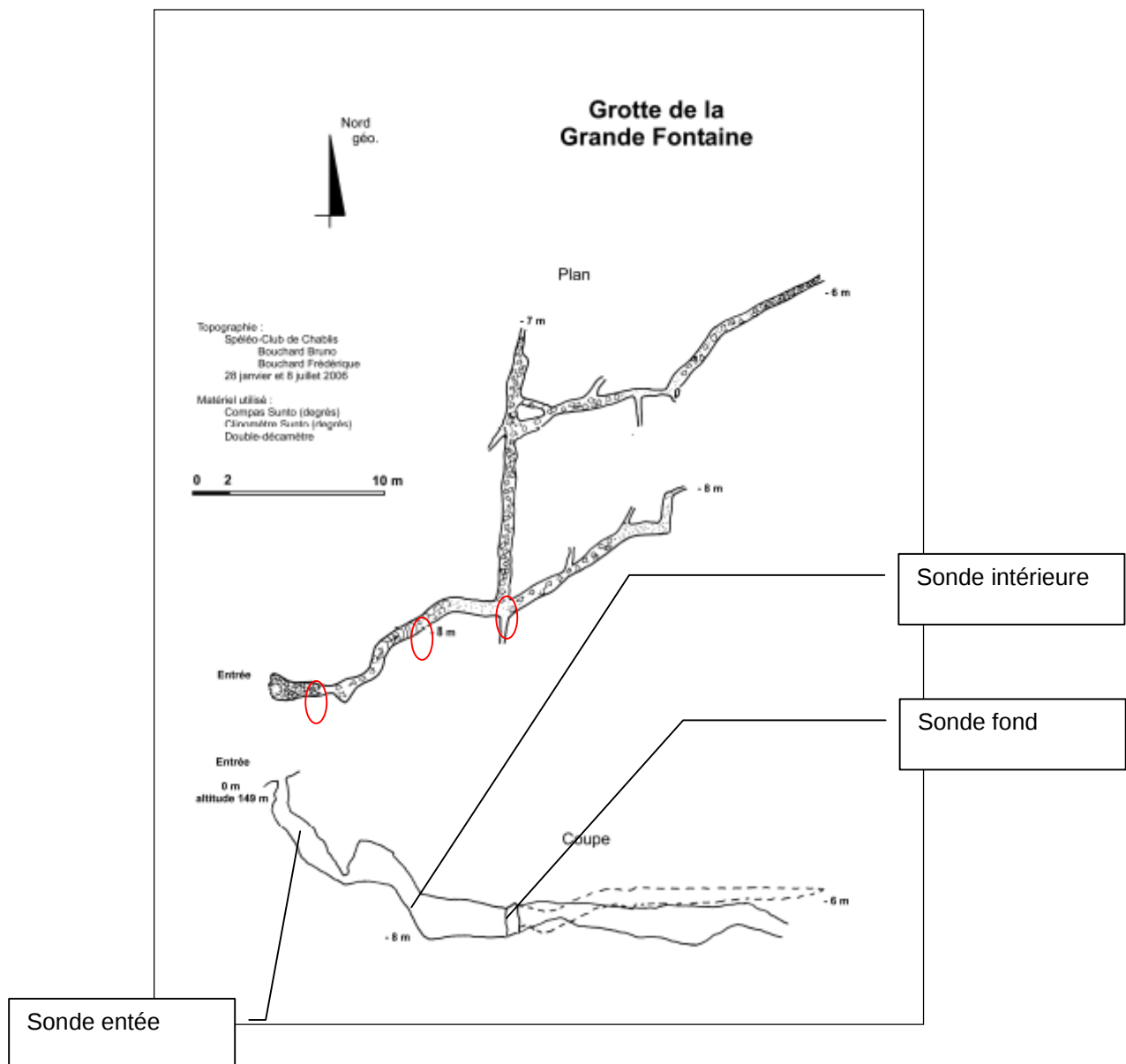
Sonde du fond, à proximité du plafond

Du 1^{er} avril au 31 mai 2009, deux sondes ont été installées, programmées pour réaliser une mesure toutes les 60 minutes :

- **Sonde extérieure** : à environ 20 m de l'entrée de la cavité et attachée à un arbre à 2 m au-dessus du sol.
- **Sonde entrée** : à l'intérieur de la cavité, à 2 m de l'entrée dans le puits d'accès, sous le porche du boyau horizontal.

Du 13 au 20 juin 2009, quatre sondes ont été installées, programmées pour réaliser une mesure toutes les 2 minutes :

- **Sonde extérieure** : à environ 10 m de l'entrée de la cavité et attachée à un arbre, face nord, à 2 m au-dessus du sol.
- **Sonde entrée** : à l'intérieur de la cavité, à 2 m de l'entrée dans le puits d'accès, sous le porche du boyau horizontal, exactement au même endroit que lors des mesures précédentes.
- **Sonde intérieure** : à l'intérieur de la cavité, approximativement à 7 m en profondeur et à 10 m de l'entrée.
- **Sonde fond** : à l'intérieur de la cavité, à 8 m de profondeur et à environ 15 m de l'entrée.



Graphique 1 : plan de la cavité et position des sondes températures

4. Validation des mesures

Météo-France dispose d'un poste de mesures pluvio-thermométriques automatiques à Saint-André-en Terre-Plaine, avec des mesures horaires, et qui sera considéré par la suite et pour comparaison comme le poste de référence météorologique. Il se situe à 300 m d'altitude et à 21 km au sud-est de la cavité. La grotte de la Grande Fontaine s'ouvre à l'altitude 149 m.

4.1. Moyennes et Amplitudes thermiques

Le **tableau 1** résume l'ensemble des mesures réalisées.

En comparaison avec le poste de référence, ce tableau montre pour avril et mai une moyenne comparable entre celle du site de la cavité et le poste de référence, avec une différence de seulement 0,06°C. Par contre l'amplitude est plus forte sur le site de la cavité (+3,7°C). En juin, la moyenne sur le site de la cavité est légèrement plus froide que celle du poste de référence (-0,77°C) mais l'amplitude est exactement la même. On notera que la sonde de température placée à proximité de la cavité n'a pas été positionnée au même endroit au cours des deux campagnes de mesures. Lors de la seconde campagne, la sonde a été positionnée de sorte à être protégée du rayonnement solaire. Ce qui suffit à expliquer les différences constatées sur les moyennes et amplitudes.

		Températures (°C)				
		Extérieures		Cavité (Voutenay)		
		Voutenay	St-André	Entrée	Intérieur	Fond
1 ^{er} avril au 31 mai 2009	Moyennes	13,01	12,95	11,39		
	Amplitudes	33,5	29,8	13,0		
14 au 20 juin 2009	Moyennes	16,54	17,31	14,81	10,0	10,0
	Amplitudes	18,0	18,0	9,1	0,0	0,0

Moyennes : les moyennes sont calculées à partir des 24 valeurs horaires.

Amplitude : l'amplitude représente l'écart entre la valeur maximale horaire et la valeur minimale horaire sur la période considérée.

Tableau 1 : moyennes et amplitudes des mesures

Concernant les températures mesurées dans les zones dites « intérieur » et « fond » de la grotte, on notera la constance des valeurs mesurées caractérisées par une amplitude nulle.

Concernant la température mesurée dans la zone d'entrée, sa moyenne est plus basse que celle mesurée en extérieure.

Concernant les amplitudes, celle mesurée en juin dans la zone d'entrée est nettement plus faible que celle obtenue lors de la première campagne de mesures, ce qui est cohérent avec les amplitudes des mesures extérieures également plus faibles. (Rappelons ici que la première campagne de mesures se fait sur 60 jours et la seconde sur seulement 7 jours).

4.2. Les mesures dans la cavité

4.2.1. Rappel : zonage climatique d'une cavité

La cavité présente un faible développement (78 m) et est peu profonde (-8 m).

Le **tableau 1** montre des différences de températures dans la cavité, réalisées dans des zones que nous avons défini comme « entrée », « intérieur » et « fond ».

Dans différentes études faites dans des grottes de par le monde, certains auteurs déterminent trois « zones » où la température évolue de façon différente. Toutefois, ces études concernent des grottes de dimensions autrement plus importantes que celle de la grotte de la Grande Fontaine décrite ici. En conséquence, il peut être hasardeux de vouloir y reporter de telles analyses.

Nous nous contenterons de rappeler ici deux de ces définitions. Elles présentent certaines analogies, notamment par un découpage en trois régions climatiques d'une grotte.

a) Définition de Choppy

CHOPPY (1984) définit trois grandes régions :

- Une région de transition « qui débute à l'entrée de la cavité » dans laquelle les caractéristiques climatiques sont essentiellement dépendantes de celles de l'extérieur ».
- Une région profonde où « les auteurs ont constatés que les variations de température sont très faibles, et seulement saisonnières »
- Une région confinée, où « par définition même, l'influence des facteurs climatiques externes y est faible ou négligeable vis à vis des processus internes ».

b) Définition de Ginet et Decou

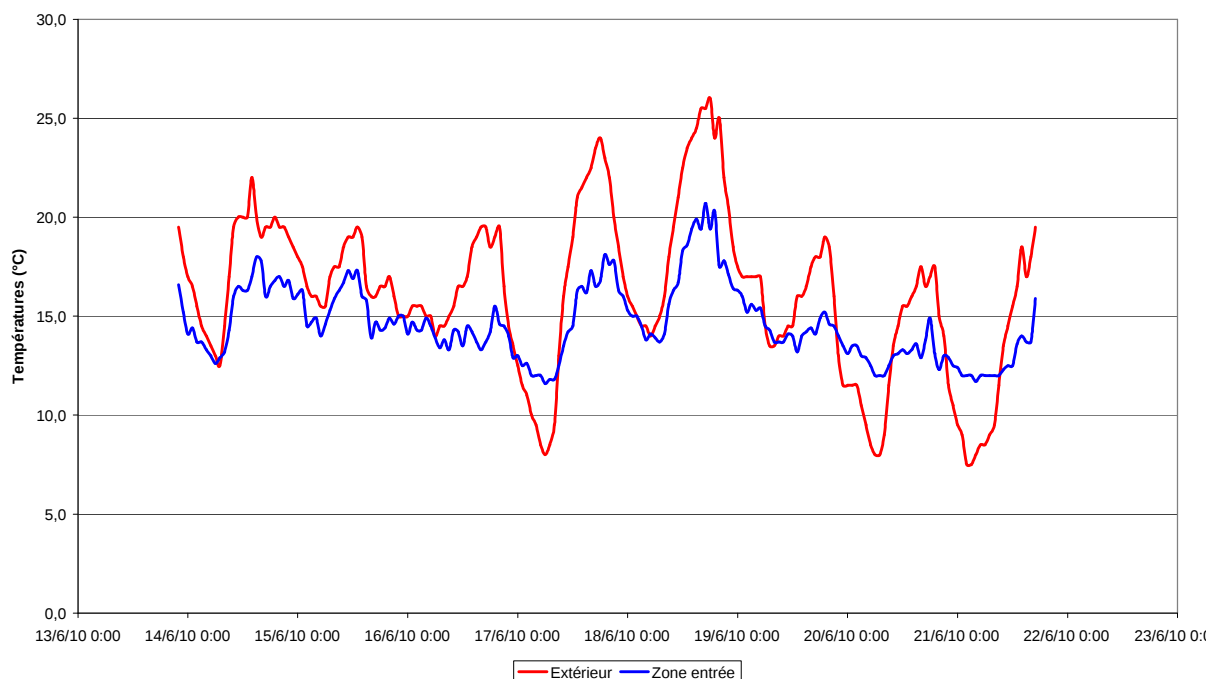
Chez GINET et DECOU (1977), on trouve également un découpage en trois zones dans une cavité dite de type « statique (c'est à dire sans circulation d'air violente) » :

- La zone d'entrée où la température reste sous influence des variations thermiques extérieures à courte période. Cette zone est plus ou moins longue selon la morphologie de la cavité, et peut varier selon la saison.
- La zone tampon où la température ne varie pratiquement pas. Elle marque la frontière entre l'atmosphère extérieure et l'atmosphère de la cavité. Ses dimensions ou sa position peuvent légèrement varier au cours des saisons.
- La zone profonde où la température peut ou baisser ou augmenter très légèrement. Ces variations se mesurent dans des cavités avec un développement important. Elles peuvent être de nature géothermique, mais sont également liées à la circulation de l'air.

Certains auteurs proposent de subdiviser encore ces régions, notamment la première. Cette subdivision dans la région proche de l'entrée s'explique en partie par sa facilité d'accès qui a permis d'y réaliser des mesures plus détaillées et plus fréquentes que dans des zones plus profondes, et donc, de la décrire plus finement.

Pour cette étude, nous préférons les définitions de Ginet et Decou. Remarquons que la définition de la « zone d'entrée » donnée par ces auteurs diffère peu de celle de la « région de transition » établie par Choppy.

4.2.2. Zonage climatique de la grotte de la Grande Fontaine



Graphique 2 : comparaison des températures horaires en juin

- La température de la zone d'entrée passe par des maxima, corrélativement avec ceux de l'extérieur, ce qui est illustré par le **graphique 2**. Si, comme on le verra par la suite, il existe des périodes où la température mesurée dans la zone d'entrée ne semble subir aucunement les variations thermiques extérieures, la température dite de l'« Entrée » semble malgré tout subir l'influence de la température extérieure. Elle se situe donc dans la « zone d'entrée » de la cavité, telle qu'elle est définie ci-dessus.
- Les sondes dites « Intérieur » et « Fond » donnent une même température, 10°C, sans aucune variation décelée sur la période des 8 jours de la mesure. Elles peuvent être autant caractéristiques de la « zone profonde » que de la « zone tampon ». Compte tenu de notre connaissance de la cavité et de son faible développement, on considèrera que la mesure concerne la même zone que l'on appellera désormais la « zone tampon ».

Notons que la température donnée par ces sondes « intérieur » et « fond » est à rapprocher de la température moyenne de la région :

- De janvier 2008 à décembre 2009 (24 mois incluant la campagne de mesures), elle est de 10,7 °C¹ au poste météorologique de référence le plus proche, à savoir celui de Saint-André-en-Terre-Plaine.
- De juillet 2008 à juin 2009 (12 mois précédent et incluant la campagne de mesures), elle est de 10,1°C¹ au même poste de mesure à Saint-André-en-Terre-Plaine.
- De janvier à décembre, sur la période 1971/2000, la température moyenne reconstituée sur le site pluviométrique de Saint-Moré est de 10,8°C¹. Cette température reconstituée, site proche de la cavité, utilise la méthode AURELHY² de Météo-France. Le site concerné, à l'altitude de 130 m, est à 1500 m au nord-ouest de la cavité.

Ce constat rejoint celui qui est fait généralement par divers auteurs, à savoir que la température des grottes est proche de la température moyenne du lieu où elles se situent (voir également CHOPPY, 1984 ; LISMONDE, 2002a).

4.3. Validation des mesures extérieures à Voutenay

La température est le résultat de différents échanges d'énergie qui affectent tous les corps. Elle est une des grandeurs physiques de l'air, et se mesure grâce à un capteur (thermomètre, sonde thermométrique) en un point particulier de l'espace. L'atmosphère étant constamment en mouvement, la température lue par le capteur sera non pas celle d'une particule d'air déterminée, mais celle de toutes les particules qui le balaieront pendant la durée de l'observation. Or l'air étant un très mauvais conducteur de la chaleur, deux points très rapprochés peuvent présenter des écarts de températures. Du fait de sa faible capacité thermique, les caractéristiques radiatives de l'environnement vont influencer sur l'air et accentuer de façon très perceptible sa température.

La température subit ainsi de fortes fluctuations, traduisant une turbulence thermique visible à l'échelle de la minute, avec des écarts pouvant atteindre 3°C. En conséquence, l'interprétation d'une mesure ponctuelle ne doit être considérée que seulement représentative de l'instant. Par ailleurs, l'inertie des capteurs limite ces variations et il faut donc analyser avec précaution des mesures de températures réalisées à courte échelle et ne chercher à donner une signification climatologique à une précision de la mesure de température qu'au-delà de 0,2 ou 0,3°C.

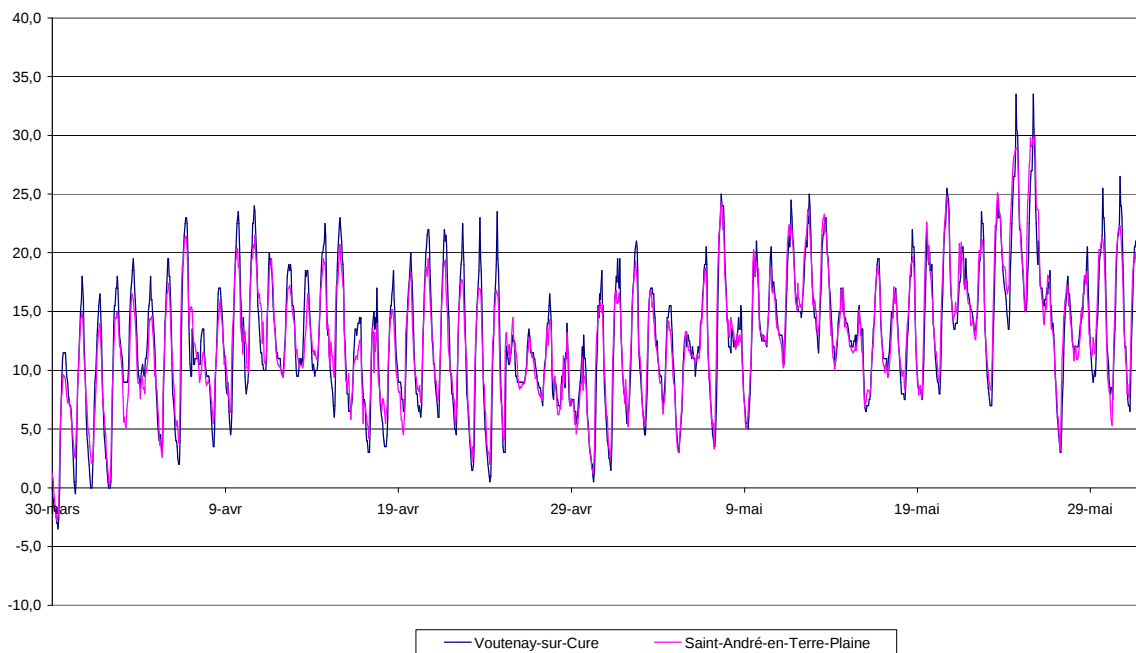
Rappelons également que, en météorologie, la température de l'air est mesurée à 1,50 m au-dessus du sol, dans un abri blanc, permettant une ventilation naturelle, et ce en particulier dans le but de protéger les capteurs du rayonnement direct du soleil. Par ailleurs, la mesure répond à des normes liés à son environnement. En effet, « *La nature et l'état du sol qu'ont peut définir par de nombreuses*

¹ Source : Base de données OKAPI de Météo-France

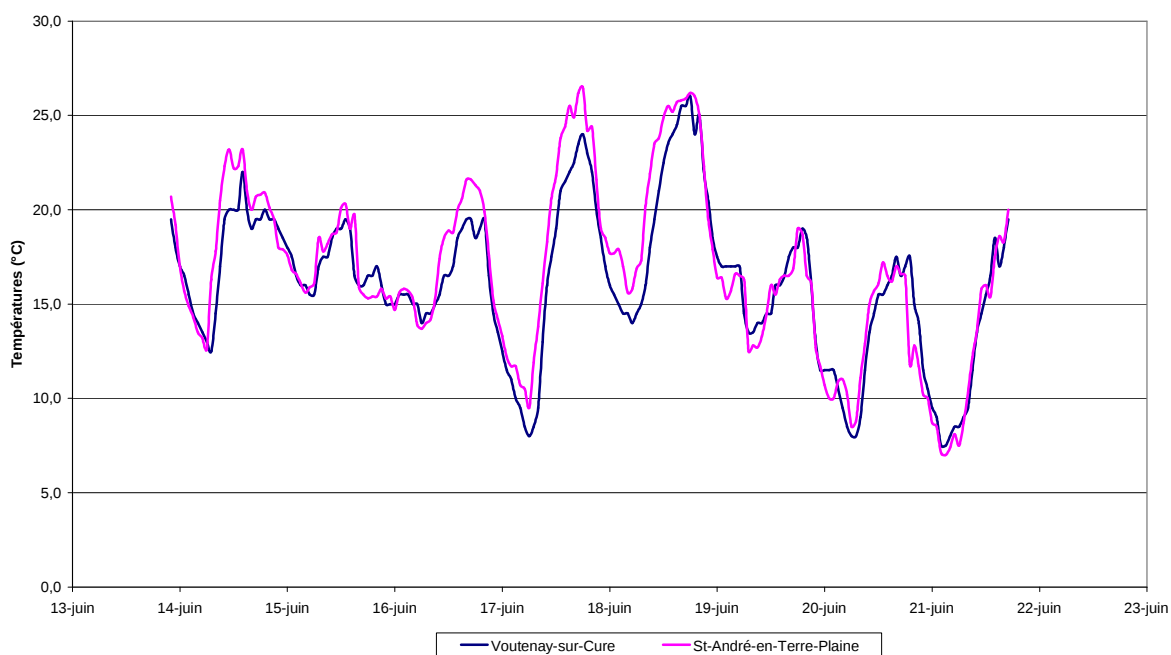
² La méthode AURELHY a pour but de répondre au problème d'estimation d'un paramètre à partir de mesures ponctuelles environnantes disposées de manière quelconque. La plupart des méthodes existantes évaluent les variations dans l'espace de divers paramètres, mais en estimant ce paramètre à partir d'une combinaison linéaire des valeurs des paramètres environnants. La méthode AURELHY est une méthode statistique d'interpolation de différents champs climatologiques qui a la particularité de prendre en compte la topographie du domaine étudié. Pour plus de détails, on se référera à l'article « Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques de Patrick Bénichou et Odile Le Breton (Météo-France, Prix Norbert Gerbier 1986, numéro 19 de la revue La Météorologie, octobre 1987).

caractéristiques : albédo, capacité calorifique, degré d'humidité et de perméabilité, densité apparente, couleur, absence ou présence d'un revêtement végétal, sont des éléments qui interviennent de manière prépondérante dans les échanges d'énergie calorifique et d'humidité entre l'atmosphère et la surface terrestre. A cela s'ajoutent celles de l'exposition, de l'orientation et de la forme des surfaces » (ARLERY, et AL., 1973). C'est pourquoi, une mesure de température doit également répondre à des exigences environnementales, à savoir :

- Pente inférieure à 19°.
- Végétation basse environnante représentative de la région.
- Absence d'ombre portée, quelque soit la hauteur du soleil.
- Absence de sources de chaleur artificielle ou d'étendue d'eau à proximité.



Période avril à mai 2009 : mesures toutes les heures



Période 13 au 20 juin 2009 : mesures toutes les 2 mn

Graphique 3 : comparaison des températures de Voutenay et du poste météorologique de référence.

Il est évident que dans le cadre de cette étude, aucune de ces contraintes ne peut être respectées, et que les mesures n'ont d'intérêt que dans le cadre d'une comparaison entre capteur sur le site considéré. Ce qui reste la finalité de l'expérience.

Malgré ces limites, la comparaison entre la température dite « extérieure » sur le site de la cavité et la température du poste météorologique de référence à Saint-André-en-Terre-Plaine, montre une réelle analogie, comme on peut le constater sur le **graphique 3**. Les courbes présentent les variations horaires de la température sur la période allant du 1^{er} avril au 31 mai 2009, et toutes les deux minutes du 13 au 21 juin 2009.

Toutefois, sur la période avril et mai 2009, les maxima de températures sur le site de la grotte sont plus élevés que ceux du poste de référence, alors que ce n'est pas le cas lorsque l'on compare les mesures réalisées au cours du mois de juin.

	1 ^{er} avril au 31 mai 2009		14 au 20 juin 2009	
	T° max.	T° min.	T° max.	T° min.
Ecart max.	6,7°C	3,9°C	0,6°C	0,5°C
Ecart moyen	1,93°C	-0,43°C	-0,94°C	-0,41°C
Ecart min.	-1,5°C	-3,4°C	-2,6°C	-1,5°C

Avril et mai : les extrêmes sont calculées à partir des valeurs horaires

Juin : les extrêmes à Voutenay sont obtenus à partir des mesures toutes les 2 minutes ; ceux de St-André sont les extrêmes mesurés.

Tableau 2 : Ecarts entre les extrêmes (T° Voutenay – T° St-André)

Ceci s'explique par le fait que « la sonde extérieure était probablement soumise au rayonnement solaire » (RANNINGER N. et D., 2009). La sonde a été « mieux » positionnée durant la seconde campagne de mesures, tout du moins a t'elle été protégée naturellement du rayonnement solaire direct. C'est ainsi que les températures maximales mesurées sur le site de la cavité sont généralement supérieures à celles de Saint-André-en-Terre-Plaine en avril et mai alors que ce n'est le cas qu'une seule fois en juin (le 19, avec 20,0°C sur le site de la cavité et 19,4°C au poste météorologique). Les écarts entre les valeurs minimales (refroidissement nocturne) calculés à partir des enregistrements des deux campagnes de mesures sont par contre comparables, légèrement plus froides sur le site de la cavité. Pour ces mesures, le rayonnement solaire n'a plus d'influence directe ; il est par ailleurs naturel que la température dans la petite vallée où s'ouvre la grotte soit plus froide que sur le Plateau de Saint-André-en-Terre-Plaine, phénomène que l'on constate dans toutes les vallées lors de nuit sans nuage ou peu nuageuse et pas ou peu ventée.

Par la suite, sur la période allant 1^{er} avril au 31 mai, les températures horaires du poste de référence, à savoir Saint-André-en-Terre-Plaine, seront préférées aux mesures de températures extérieures prises sur le site. En effet, les valeurs sont faussées par l'exposition de la sonde de mesures au rayonnement solaire.

Pour des raisons de cohérence, et quand il s'agira de mener des études sur l'ensemble des mesures, nous utiliserons également les températures horaires du poste de référence sur la période allant du 13 au 20 juin.

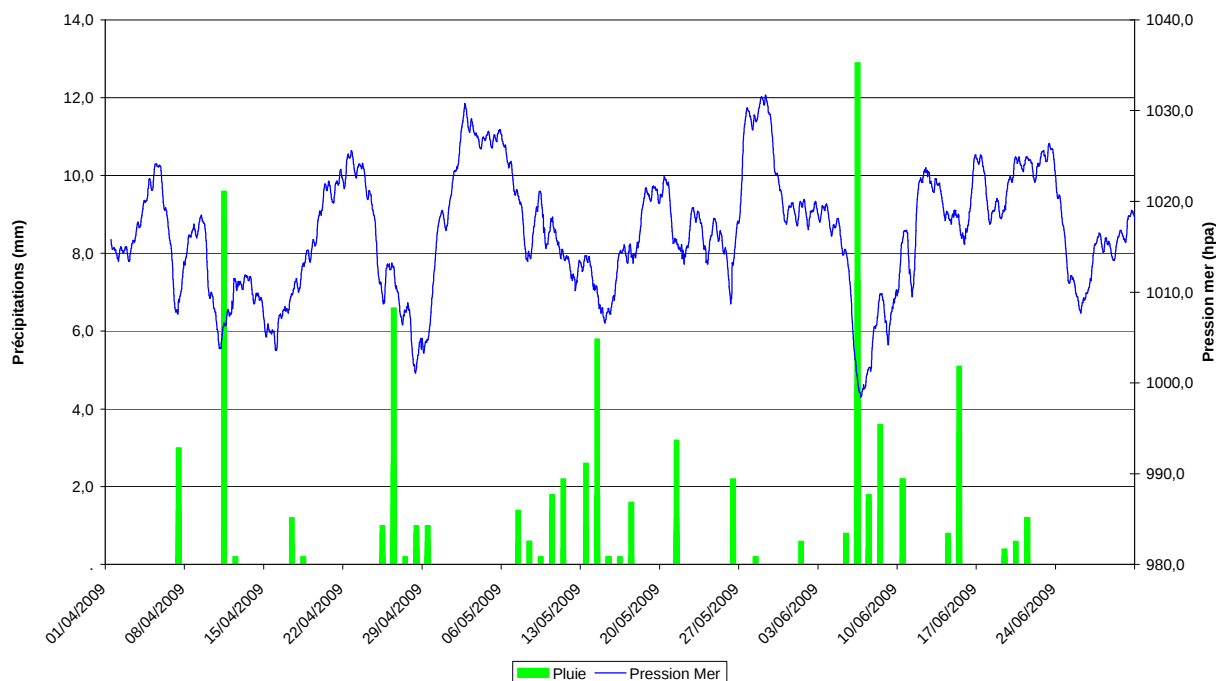
Pour une étude plus fine des mesures du 13 au 20 juin, les mesures au pas de temps 2 mn, enregistrées sur le site, seront conservées.

4.4. L'influence du temps

Le mois d'avril 2009 est un mois plutôt sec, et ce jusqu'au 25, à l'exception du 11 où des pluies orageuses arrosent la région. Le soleil est excédentaire (15%) et les températures matinales restent au-dessus des normales saisonnières. Des pluies orageuses plus fréquentes accompagnent le mois de mai, avec des températures douces et des vents faibles.

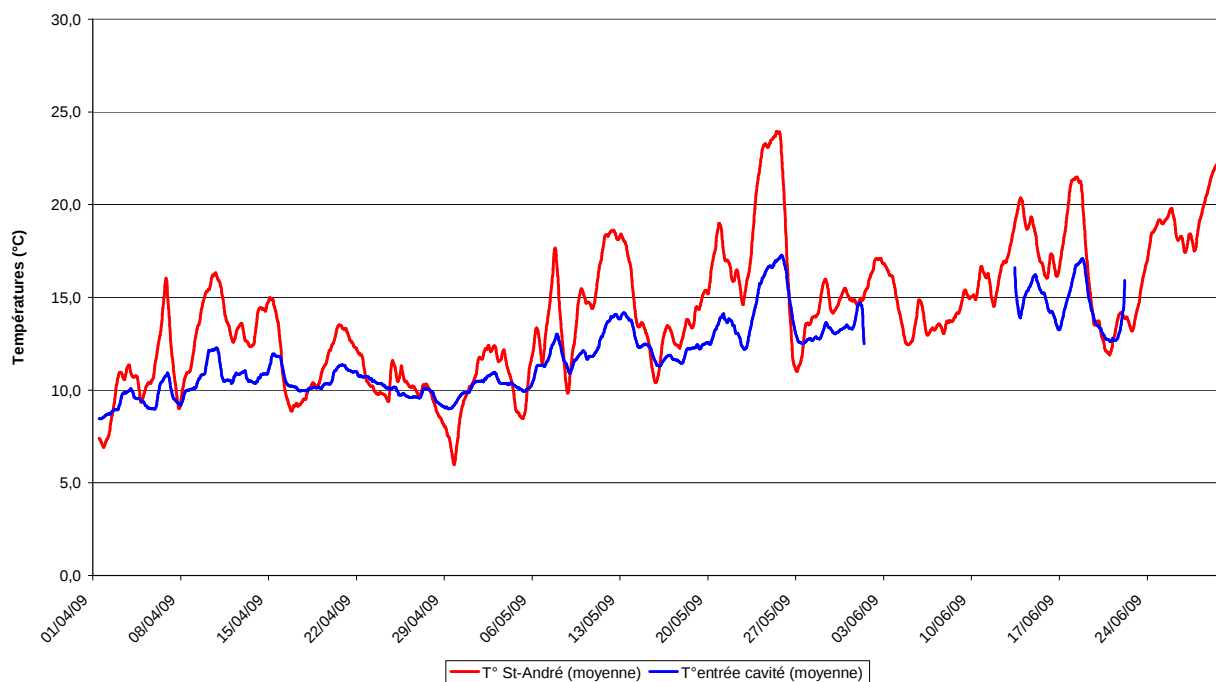
Du 13 au 21 juin 2009, le temps se résume par une alternance de passages nuageux accompagnés de quelques ondées (faibles précipitations), et parfois de belles périodes ensoleillées. Lors des nuits claires (17 au 18 juin par exemple), la température peut chuter rapidement. Le vent reste faible à modéré, avec 10 km/h en moyenne sauf le 15 où il atteint les 20 km/h.

L'évolution de la pression marquent le passage de dépressions et de hautes pressions. Autour des 5/6 juin et de la fin mai, les pressions sont au plus hautes avec 1030 hPa. Une dépression, avec des valeurs descendant en-dessous de 1000 hPa se produit en fin de première décade de juin, mais nous ne disposons pas de mesures dans la cavité à cette période.



Graphique 4 : Précipitations et Pression mer

4.4.1. Influence de la température extérieure



Graphique 5 : Evolutions des températures extérieures et de l'entrée de la cavité (moyennes glissantes sur 24h00)

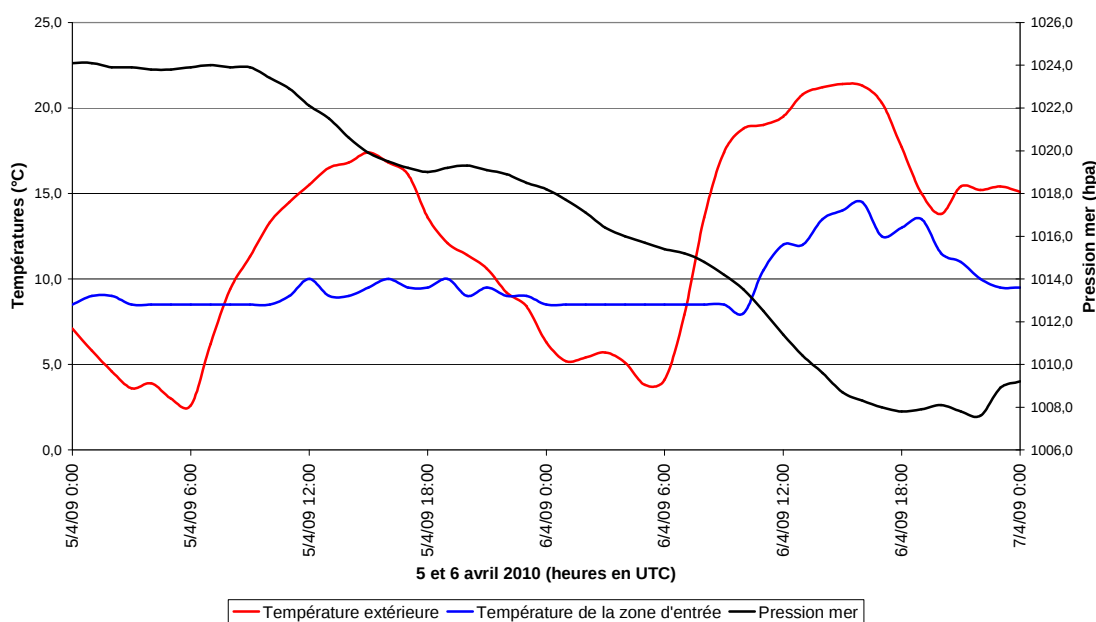
La température extérieure présente une variabilité naturelle, représentative du climat en général, et qui reste directement dépendante de la rotation de la terre autour du soleil (cycle saisonnier) et de la rotation de la terre sur elle même (cycle diurne). Cette variabilité va se traduire par une évolution quasiment sinusoïdale de la température, qui sera brouillée par les déplacements des masses d'air, génératrices de perturbation et caractérisées par l'alternance de nuages et de précipitations, de périodes ensoleillées, de hausse et de baisse de la pression. Mais elle est également directement liée au bilan thermique de la surface, soumise aux échanges radiatifs dans lesquels le soleil reste la source d'énergie essentielle. L'influence de la nature de la surface du sol et de son revêtement est ainsi particulièrement important, les caractéristiques de celui-ci pouvant être modifiées par le taux d'humidité, les précipitations ou le gel et dégel par exemple.

En faisant abstraction des échanges thermiques liés aux éventuelles phénomènes de condensation ou d'évaporation, la température de la zone d'entrée dans la cavité sera influencée par la température extérieure lorsque le courant d'air sera aspirant. A faible profondeur, la température dans le sol influera également celle de la cavité. Ces influences se constatent à la lecture du **graphique 5** où les maxima des deux sondes se produisent en phase.

4.4.2. Influence de la pression

« Si les variations [de pression] sont très rapides dans le temps (orage, lignes de grain...) un courant d'air violent pourra apparaître à l'entrée du trou » (LISMONDE, 2002). Dans ces cas-là, le constat est généralement celui d'une baisse de pression assez brutale, qui peut entraîner un courant d'air soufflant sensible. Durant ces situations particulières, l'évolution de la température mesurée dans la cavité, à proximité de l'entrée ne suit plus celle de la température extérieure, car elle est alors soumise aux conditions de l'atmosphère de la zone profonde de la cavité où la température est plus constante. Un tel phénomène explique peut être l'absence de variation de la température dans la zone d'entrée constatée certains jours, notamment les 5 avril et autour du 26 avril 2010, et ce, dans des situations où la variation de pression n'est, pourtant, pas extrêmement brutale.

a) Situation du 5 et 6 avril



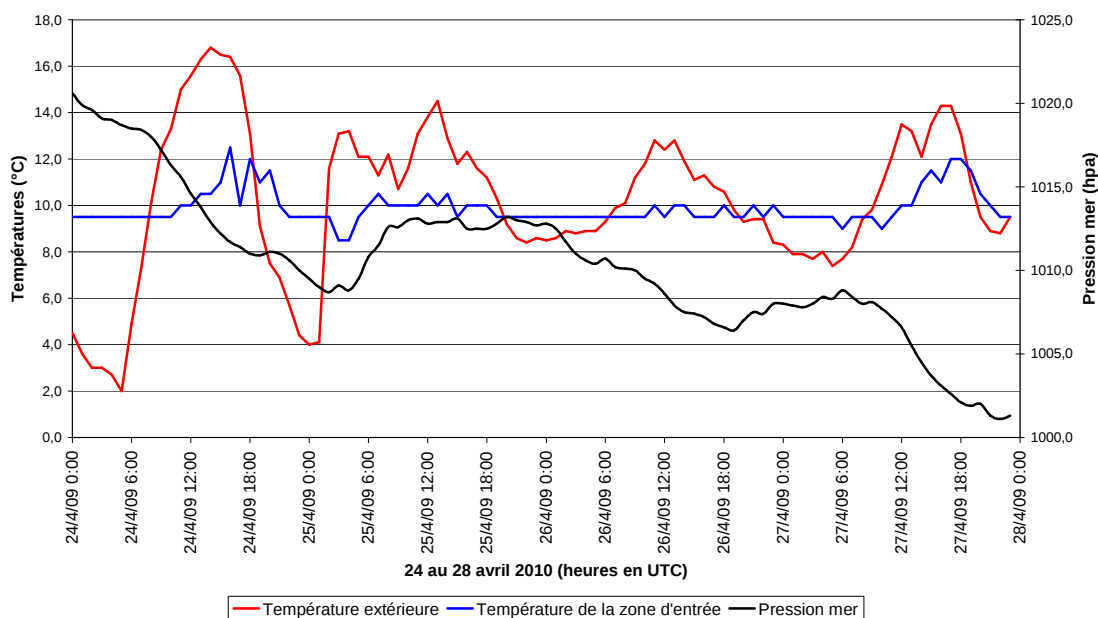
Graphique 6 : comparaison de l'évolution des températures et de la pression

Le 5 avril, la température de la zone d'entrée stagne autour de 8,5°C lorsque la température extérieure se trouve sous la valeur 10°C. Or, alors que celle-ci remonte en atteignant un maximum à 17,4°C à 15h00 UTC le 5 avril, la température de la zone d'entrée ne dépasse pas 10°C. Le 6 avril, ce phénomène ne se reproduit pas, avec une température de la zone d'entrée qui évolue parallèlement avec la température extérieure, en atteignant un maximum proche de 15°C. Sur cette

période, la pression atmosphérique a régulièrement baissé, passant de 1023,9 hPa à 9h00 UTC le 5 avril, à 1007,8 hPa à 18h00 le 6 avril³.

Il est donc possible que la cavité ait soufflé toute la journée du 5 avril et jusqu'au 6 avril à 11h00 UTC, jusqu'à la mise en équilibre des pressions « extérieures » et « intérieures », ou jusqu'à ce que l'écart des températures entre l'extérieur et la cavité soit redevenu suffisant pour contrer l'influence due à la baisse de la pression : ici, on note que le phénomène s'arrête lorsque la température extérieure atteint 19°C.

b) Situation du 24 au 27 avril



Graphique 7 : comparaison de l'évolution des températures et de la pression

Entre le 25 et le 27 avril, il se produit un phénomène comparable.

Dans un premier temps, la pression atmosphérique décroît durant toute la journée du 24, de 10,6 hPa en 24 heures. Alors que la température extérieure remonte au-dessus de 10°C dès 8h00 UTC, la température à l'entrée de la cavité ne bouge pas jusque vers 12h00, puis elle va croître d'abord lentement et plus brusquement après 15h00. Le maximum extérieur est atteint vers 14h00 et celui de l'entrée de la cavité vers 16h00. La température redescend en soirée et nuit, et ne va pratiquement pas évoluer jusqu'au 27 à 12h00, alors que la tendance de la pression est toujours à la baisse. Le 27 avril, la température extérieure remonte, suivie par la température mesurée dans l'entrée de la cavité, avec un décalage temporelle qui va en s'atténuant. Là aussi, on peut penser que le courant d'air finit par s'inverser pour redevenir aspirant en journée malgré la baisse de pression.

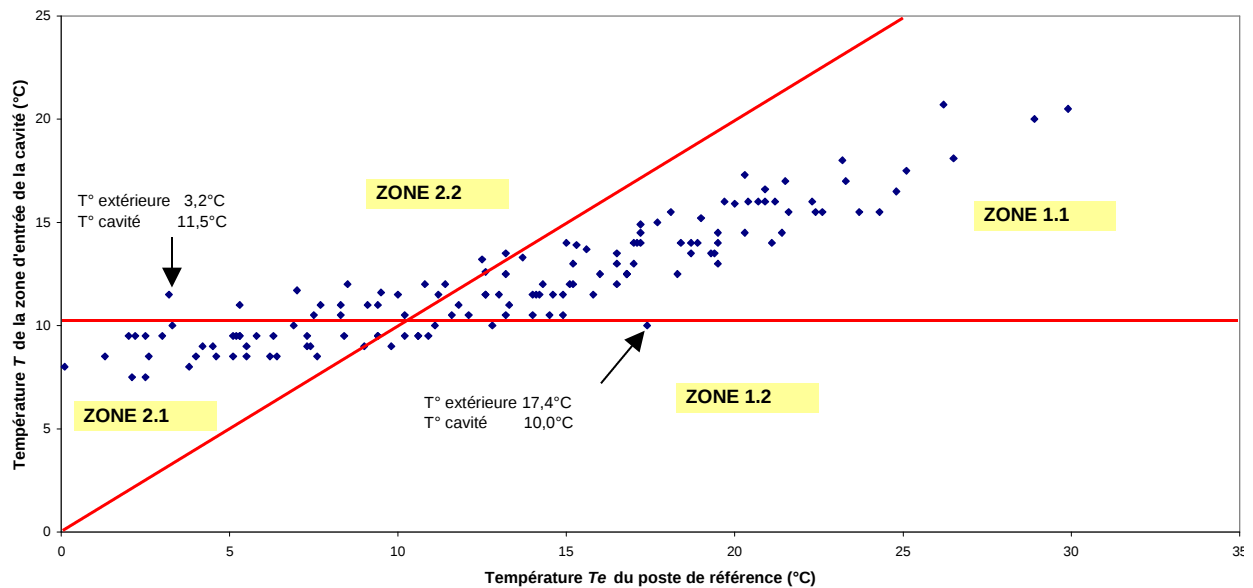
Toutefois, on ne peut pas exclure un équilibre qui conduit à l'absence de courant d'air et une évolution de la température dans l'entrée de la cavité qui serait alors uniquement soumise à l'influence de la température extérieure par rayonnement et non plus par convection.

5. Interprétations des mesures

5.1. Distribution des températures

Le **graphique 8** représente la distribution des températures extrêmes – minima et maxima – de la zone d'entrée, comparativement aux mesures effectuées au poste de référence à Saint-André-en-Terre-Plaine, sur la période allant du 1^{er} avril au 31 mai et du 14 au 21 juin.

³ Base de données OKAPI de Météo-France



Graphique 8 : distribution des températures

Ces températures extrêmes sont obtenues à partir des mesures horaires effectuées dans la zone d'entrée de la cavité et au poste de référence. Ce ne sont donc pas les vrais minima et maxima. Ils répondent toutefois à la définition météorologique à savoir que la température minimale du jour J a été recherchée sur la période allant de 18h01 UTC du jour J-1 à 18h00 UTC du jour J (en fait de 19h00 UTC à 18h00 UTC) et la températures maximales de 6h01 UTC du jour J à 6h00 UTC du jour J+1 (en fait de 7h00 UTC à 6h00 UTC).

Le choix des températures extrêmes s'impose plutôt que de considérer l'ensemble des mesures. En effet, il est peu probable que l'influence de la température extérieure sur la température de la zone d'entrée se fasse au même instant, et rien de nous permet d'affirmer que si décalage temporel il y a, nous puissions le négliger. Implicitement, nous admettons donc que la température de la zone d'entrée de la cavité puisse être influencée par celle de l'extérieure.

Rappelons par ailleurs que la température de la zone tampon est de 10°C, tout du moins dans la période durant laquelle elle a été mesurée (8 jours en juin).

Le **graphique 8**, réalisé à partir de 140 points, permet d'identifier quatre zones :

- La zone 1.1 détermine les moments où la température extérieure est toujours supérieure à la température de la zone d'entrée de la cavité et dans laquelle la température de la zone d'entrée est toujours supérieure à celle de la zone tampon (10°C). L'amplitude thermique est ici de 18,8°C pour la température extérieure, et de 11,1°C pour la température de la zone d'entrée. Cet ensemble de mesures rend compte d'une hausse des températures de la zone d'entrée en corrélation avec celles des températures extérieures. Cette zone contient les moments où le courant d'air est aspirant.
- La zone 1.2 est celle où la température extérieure est toujours supérieure à la température de la zone d'entrée de la cavité mais dans laquelle la température de la zone d'entrée est restée inférieure ou égale à la température de la zone tampon (10°C). L'amplitude thermique est de 8,4°C pour la température extérieure et de 1,0°C pour la température de la zone d'entrée. On note que la température de la zone d'entrée n'a pas dépassé 10°C, alors que l'on mesure des températures extérieures allant jusqu'à 17,4°C. Ce point extrême correspond à la journée du 5 avril, décrite plus haut et dans laquelle nous avons fait part de l'influence de la variation de pression extérieure. Cet ensemble de point comprend donc des situations météorologiques particulières.
- La zone 2.1 est celle où la température extérieure est inférieure à la température de la zone d'entrée de la cavité et dans laquelle la température de la zone d'entrée est restée inférieure à la température de la zone tampon (10°C). L'amplitude thermique est de 9,3°C pour la température extérieure et de seulement 2,5°C pour la température de la zone d'entrée. L'influence de la température extérieure est donc peu sensible ici et l'influence d'un courant

d'air soufflant doit vraisemblablement se retrouver dans ces mesures. Toutefois, il est probable que les températures « basses » (7,5°C) relevées dans la zone d'entrée montre une certaine influence de la température extérieure.

- La zone 2.2 est celle où la température extérieure est inférieure à la température de la zone d'entrée de la cavité et dans laquelle cette température de la zone d'entrée est supérieure à celle de la zone tampon (10°C). L'amplitude thermique est de 10,0°C pour la température extérieure, et de 3,0°C pour la température de la zone d'entrée. Cette partie du graphique contient notamment le point particulier du 27 mai, où la température extérieure atteint un minimum de 3,2°C alors que la température minimale de la zone d'entrée est de 11,5°C. Or, les 24 et 25 mai, la température maximale extérieure atteint les plus fortes valeurs de toute la campagne de mesures, à savoir, respectivement, 28,9°C et 29,9°C. La température de la zone d'entrée dépasse alors 20°C en après-midi et il est donc possible que cette zone ait subi un réchauffement. Le refroidissement nocturne ayant certainement entraîné un courant d'air soufflant, cette chaleur accumulée s'est répercuté ensuite sur la température de la zone d'entrée. Il est donc probable que la zone 2.2 soit, en fin de compte peu distincte de la zone 2.1.

5.2. Situation avec courant d'air aspirant

On considère que dans la zone 1.1, la température de la zone d'entrée est influencée par celle de l'extérieur. Nous ne tenons donc compte que des situations où la température extérieure est toujours supérieure à la température de la zone d'entrée de la cavité et dans laquelle la température de la zone d'entrée est toujours supérieure à celle de la zone tampon (10°C).

5.2.1. Extrapolation par amortissement des variations de température en fonction de la distance de l'entrée

« On sait qu'en théorie, lorsque de l'air extérieur pénètre dans une cavité, sa température s'éloigne de celle de l'air extérieur selon une loi exponentielle en fonction de la distance de l'entrée X » (CHOPPY, 1984). Cette affirmation reste valable en ne considérant que les seuls échanges de la température de l'air circulant dans une cavité avec les parois de celles-ci. La réalité est forcément plus complexe car il existe des interactions air/parois qui vont de ce fait influencer sur la température de cette paroi.

Ainsi, si T est la température de l'air dans la cavité, T_e la température extérieure, et T_p la température de la paroi, z la profondeur, k un coefficient d'échange entre l'air et la paroi, alors :

$$T = T_p + (T_e - T_p) \times \exp(-k \times z) \quad [5.1]$$

On peut simplifier l'écriture de la formule [5.1] sous la forme $T = A \times T_e + B$ avec :

$$A = \exp(-k \times z) \text{ et } B = T_p \times (1 - A).$$

Une régression linéaire effectuée sur les couples de points [température extérieure, température de la zone d'entrée] que l'on trouve dans la zone 1.1 définie ci-dessus permet d'approcher les valeurs de A et B .

On obtient le résultat suivant, pour un échantillon de 78 points :

$$T = 0,5349 \times T_e + 4,2534$$

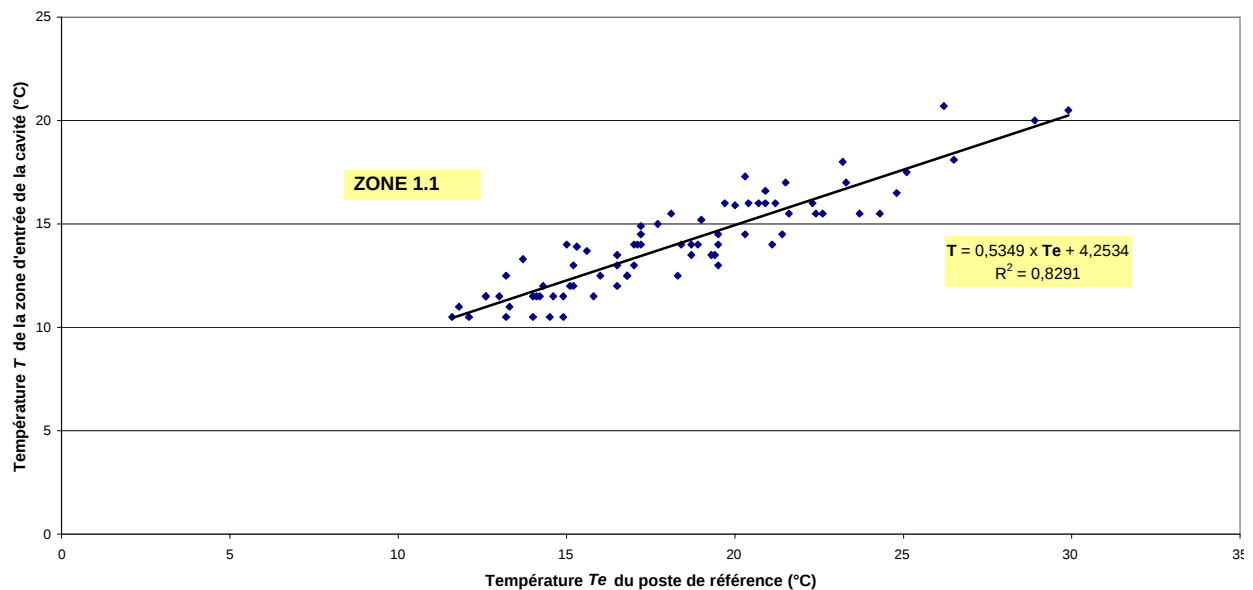
Coefficient de détermination : 0,829 (corrélation de 0,91 ce qui est une bonne performance).

Les mesures dans la zone d'entrée sont réalisées à 2 m de l'entrée. On peut donc en déduire les valeurs de T_p et de k :

$$T_p = 9,1^\circ\text{C} \quad k = 0,3128$$

Par comparaison, si la même méthodologie est appliquée avec les valeurs appartenant aux zones 2.1 et 2.2 confondues, le coefficient de détermination tombe à 0,534 (échantillon de 52 points – corrélation 0,73). En ne prenant en compte que la zone 2.1, il n'est plus que de 0,168 (échantillon de 32 points – corrélation 0,41) ; il est de 0,308 dans la zone 2.2 seule (échantillon de 18 points – corrélation 0,55). Il n'y a donc pas la même influence de la température extérieure sur la température de la zone d'entrée lorsque la température extérieure est inférieure à celle de la zone tampon.

Ce résultat va bien dans le sens d'une aspiration de l'air extérieur vers la cavité lorsque les températures extérieures dépassent celles de la zone tampon.



Graphique 9 : Régression linéaire

5.2.2. La température de paroi

Le calcul par régression linéaire réalisé ci-dessus permet de déterminer une température de paroi de 9,1°C et un coefficient d'échange entre l'air et la paroi de 0,3128.

Ce même calcul aurait pu être fait sur des périodes plus courtes ou des échantillons différents. Il est évident que plus l'échantillon est faible, plus les résultats devront être maniés avec prudence. En voici des exemples.

a) Calcul en tenant compte des valeurs extrêmes

- Calcul en prenant en compte les températures maximales uniquement. L'échantillon est alors composé de 67 points. Les résultats sont les suivants :

$$T = 0,5623 \times T_e + 3,6412$$

Coefficient de détermination : 0,836 (ce qui reste une bonne performance, légèrement supérieure à celle obtenue en tenant également compte des températures minimales).

Les valeurs de T_p et de k déduites de cette équation sont alors :

$$T_p = 8,3^\circ\text{C} \quad k = 0,2879$$

- Calcul en prenant en compte les températures minimales uniquement. L'échantillon comprend alors 11 points. Les résultats sont les suivants :

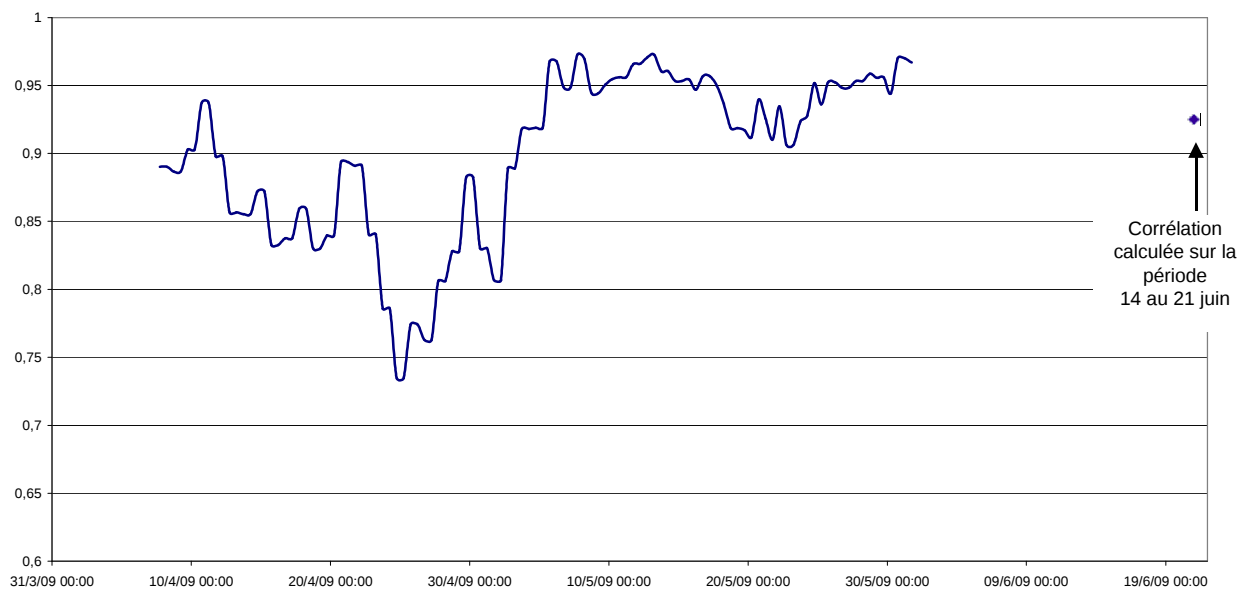
$$T = 0,6298 \times T_e + 3,4920$$

Coefficient de détermination : 0,606 (performance très moyenne, montrant que la relation est moins avérée pour les températures minimales, ici comprises entre 11,8°C et 16,5°C).

Les valeurs de T_p et de k déduites de cette équation sont alors :

$$T_p = 9,4^\circ\text{C} \quad k = 0,2312$$

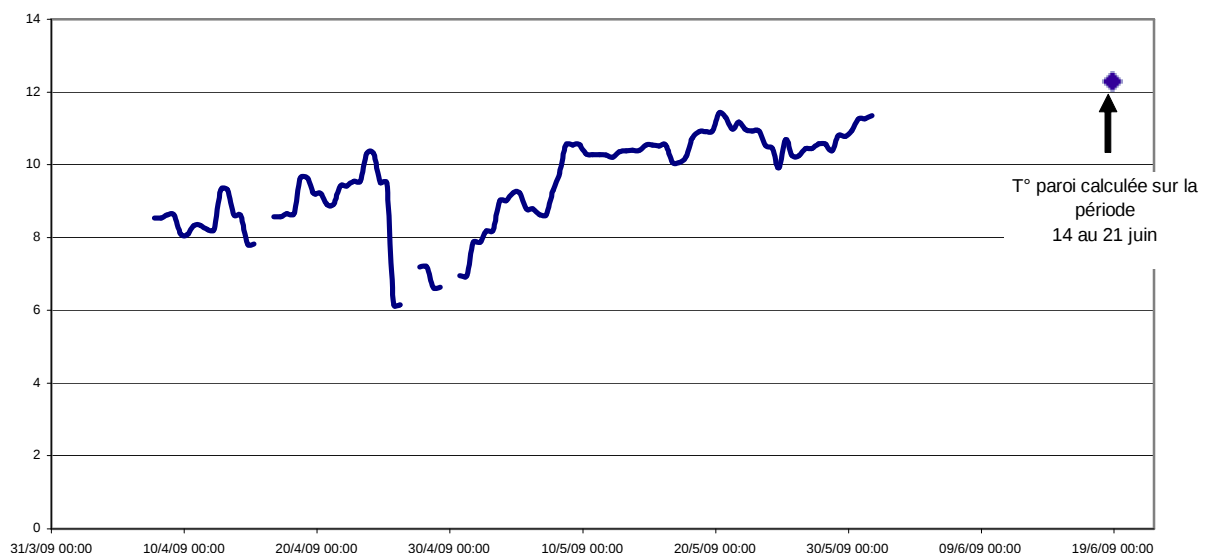
b) Calcul en moyenne glissante



Graphique 10 : Evolution de la corrélation (période glissante de 8 jours)

Sachant que nous ne disposons que de 8 jours de mesures en juin, ces mêmes calculs ont été réalisés sur toute la période et de façon glissante sur les valeurs prises sur 8 jours consécutifs. Du 1er avril au 31 mai, puis du 14 au 21 juin 2010, nous disposons donc, à chaque calcul, d'un échantillon de 16 points au maximum : une température minimale et une maximale par jour, si celles-ci répondent aux critères de définition de la zone 1.1.

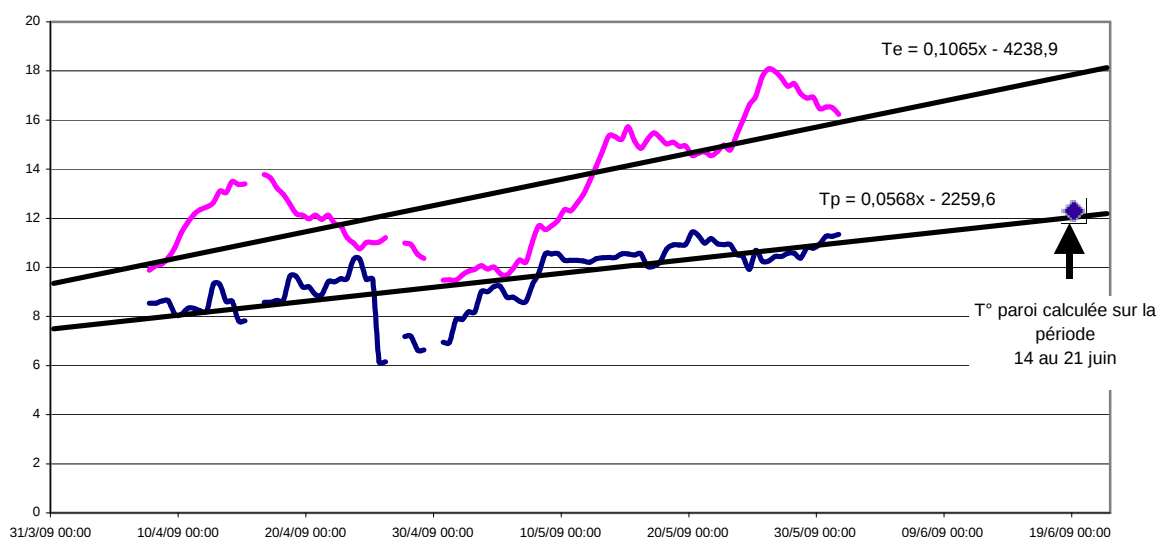
Nous constatons que le coefficient de corrélation varie alors de 0,73 à 0,97 (**graphique 10**). Le plus mauvais score (0,73) est obtenu pour la période allant du 17 au 25 avril, période que nous avons en partie décrite ci-dessus (paragraphe 4.4.2 – b). Globalement le coefficient de corrélation reste inférieur à 0,90 sur toute la période qui s'étend du 5 avril au 3 mai, période où la température extérieure présente une assez faible amplitude thermique, et reste proche de celles mesurées dans la cavité (voir **graphique 5**).



Graphique 11 : Evolution de la température de paroi

Nous constatons également que la « températures de paroi » augmente régulièrement sur la période, comme l'illustre le **graphique 11**.

A noter que, délibérément, nous n'avons pas tenu compte de quelques points non pertinents, où la température de paroi prend des valeurs trop basses, voire négatives.



Graphique 12 : Evolution de la température de paroi et de la température extérieure

Le **graphique 12** met en parallèle la courbe des températures de la paroi ainsi calculées, comparée à celle des températures de l'air, obtenue par calcul des moyennes glissantes sur les mêmes périodes sur les valeurs extrêmes mesurées à Saint-André-en-Terre-Plaine. Nous avons superposé sur chaque courbe les droites obtenues par régression linéaire.

La température de paroi semble suivre l'évolution de la température de l'air, mais sans y être franchement corrélée, tout du moins d'une façon simple. Au mieux, nous constatons qu'elle se réchauffe dans le même temps. Cette remarque va dans le sens de celle faite dans la description de la zone 2.2., c'est-à-dire que la zone d'entrée se réchauffe avec l'entrée d'air chaud aspiré par la cavité.

Calculée de cette façon, la température de paroi prend alors diverses valeurs qui évoluent au cours du temps, avec une moyenne de 9,52°C, une valeur minimale de 6,2°C et maximale de 12,4°C.

Notons que ces calculs donnent des valeurs de k, coefficient d'échange entre l'air et la paroi, se situant entre 0,25 et 0,51, avec une moyenne de 0,37 et une valeur médiane également de 0,37.

Nous retiendrons par la suite cette valeur de 0,37 comme valeur du coefficient d'échange entre l'air et la paroi de la cavité.

5.2.3. Conclusion

Nous avons constaté que la température de la paroi ainsi calculée subit l'influence de la température extérieure. Le fait que cette température extérieure augmente, que l'insolation soit également plus longue sur cette période de l'année, conduit naturellement à un réchauffement du sol. Mais cette chaleur se propage très mal dans la roche et la terre, et n'a donc certainement que très peu d'influence directe sur la température de paroi. C'est donc par introduction d'air chaud que la zone d'entrée de la cavité se réchauffe principalement.

Toutefois, l'ensemble de ces résultats, de par leurs variabilités liées à la faible taille de l'échantillon, montre qu'il faut rester très prudent dans l'analyse des mesures. Ils permettent de confirmer le rôle d'aspiration de la cavité lorsque la température extérieure est supérieure à la température de la zone tampon.

5.3. Situation avec courant d'air soufflant

On considère les couples de points de l'ensemble de la zone 2 (zones 2.1 et 2.2 confondues – graphique 8). Nous ne tenons donc compte que des situations où la température extérieure est

toujours inférieure à la température de la zone d'entrée de la cavité. Cette définition permet de retenir 52 situations (ou couples de mesures) dans lesquelles il est probable que la cavité ait « soufflé ».

La température moyenne de la zone d'entrée dans ces 52 situations est de 10,09°C avec une valeur minimale de 8,0°C et maximale de 13,5°C.

5.3.1. Calcul de la température en situation de courant d'air soufflant

Si ces situations correspondent à des phénomènes de courant d'air soufflant, alors la température de la zone d'entrée est influencée par celle de la zone tampon. En ce cas, l'air du fond de la cavité ressort et la température de la zone d'entrée doit en ressentir l'influence de la même façon que lorsque l'air extérieur rentre. En d'autres termes, l'équation [5.1] reste valable, mais avec $T_e = 10^\circ\text{C}$. Par contre, la distance « z », qui est la distance par rapport au point de mesures à laquelle débute la zone tampon de la cavité, n'est pas connue. Nous savons qu'elle se trouve comprise entre 0 et 8 m, 8 m étant la distance séparant la sonde située dans la zone d'entrée de la sonde la plus proche et située dans la zone tampon, et cela en supposant que la température de cette zone est restée stable sur toute la période considérée.

L'équation [5.1] devient donc : $T = T_p + (10 - T_p) \times \exp(-k \times z)$ (températures exprimées en °C).

Lorsque $z=0$, alors $T=10^\circ\text{C}$

Nous pouvons faire plusieurs considérations :

- La régression linéaire réalisée à partir de tous les points correspondant à la situation 1.1 (paragraphe 5.2.1) nous permet de calculer une température de paroi de 9,1°C et un coefficient d'échange de 0,3128.

Pour un courant d'air soufflant d'un point où la température T_e est de 10°C à une distance z allant de 0 à 8 m, la température calculée de la zone d'entrée est alors comprise entre 9,1°C et 9,2°C.

- La régression linéaire réalisée à partir des températures maximales correspondant à la situation 1.1 (paragraphe 5.2.2 a) nous a permis de calculer une température de paroi de 8,3°C et un coefficient d'échange de 0,2879.

Pour un courant d'air soufflant d'un point où la température T_e est de 10°C à une distance z allant de 0 à 8 m, la température calculée de la zone d'entrée est alors comprise entre 8,3°C et 8,5°C.

- La régression linéaire réalisée à partir des températures minimales correspondant à la situation 1.1 (paragraphe 5.2.2 a) nous permet de calculer une température de paroi de 9,4°C et un coefficient d'échange de 0,2312.

Pour un courant d'air soufflant d'un point où la température T_e est de 10°C à une distance z allant de 0 à 8 m, la température calculée de la zone d'entrée est alors comprise entre 9,4°C et 9,5°C.

- Les régressions linéaires réalisées sur des périodes glissantes de 8 jours correspondant à la situation 1.1 (paragraphe 5.2.2 b) nous donne un ensemble de températures de paroi, comprises entre 6,2 et 12,4°C. En considérant que le coefficient d'échange ne doit pas varier, nous prendrons alors la valeur de 0,37 telle que précisée en fin de ce paragraphe (0,3737).

La température de la zone d'entrée, calculée sur les 39 situations correspondant à la zone 2 décrite dans le paragraphe 5.1, et en tenant compte des situations où le calcul de la température de paroi a été possible et cohérent, prend alors diverses valeurs qui évoluent au cours du temps, avec une moyenne de 9,51°C, une valeur minimale de 6,7°C et maximale de 12,2°C.

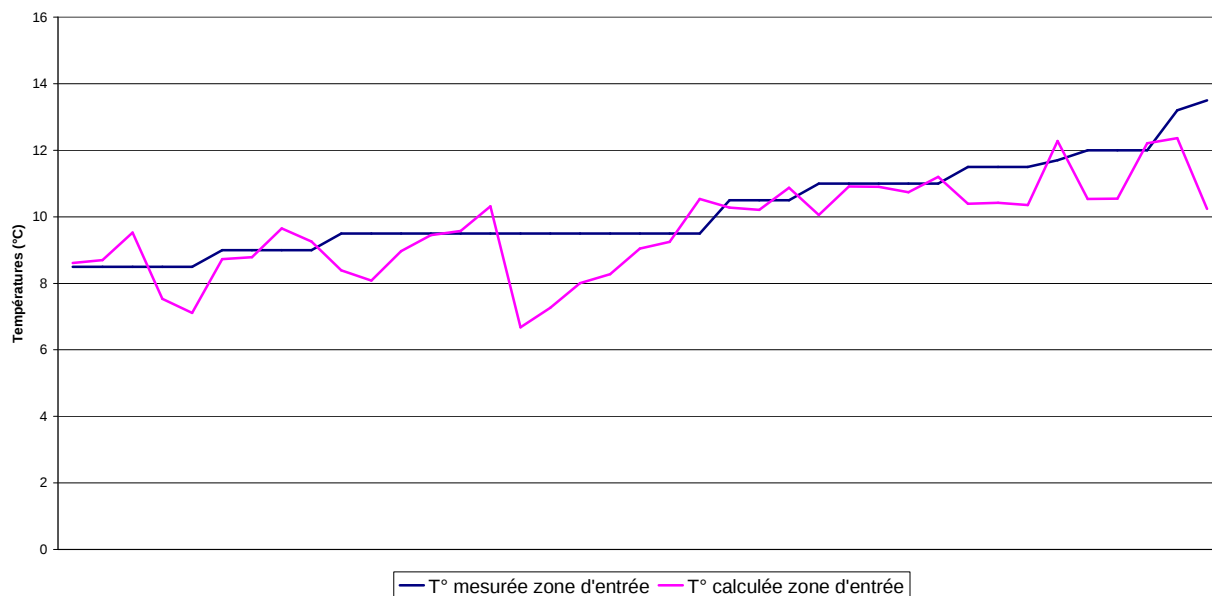
5.3.2. Conclusion

Ces calculs dans ces différentes situations confirment le peu d'écart entre la température de paroi et la température ainsi calculée dans la zone d'entrée. Ce résultat était attendu : T_p s'éloignant peu de la valeur 10°C, et $\exp(-k \times z)$ prenant des valeurs allant de 0,16 à 0,05, $(10 - T_p) \times \exp(-k \times z)$ reste inférieur à 1°C dans les fourchettes de valeurs étudiées ci-dessus.

Si les situations étudiées correspondent bien à des situations de courant d'air soufflant, les variations de températures de la zone d'entrée sont alors insuffisantes pour déterminer réellement la présence d'un tel courant d'air.

Le **graphique 13** compare les température mesurée dans la zone d'entrée et correspondant aux points de la zone 2, avec les températures calculées à partir des températures de paroi obtenues sur des périodes glissantes de 8 jours et une valeur de la distance $z = 8$ m. Les températures mesurées ont été classées de la valeur la plus faible à la valeur la plus élevée.

On constate, malgré tout, une certaine similitude, même si les valeurs calculées présentent moins de stabilité que celles mesurées.



Graphique 13 : Comparaison de la température de la zone d'entrée, mesurée et calculée

6. Application sur la période du 13 au 20 juin 2009

Du 13 juin à 21h30 au 21 juin à 18h00, nous disposons de mesures de températures enregistrées toutes les deux minutes, à l'extérieur de la cavité et dans la zone d'entrée.

Nous savons également, avec certitude, que la température dans la zone tampon de la cavité, telle qu'elle a été définie au paragraphe 4.2.2, et durant cette période, est stable et est de 10°C.

Les calculs précédents (paragraphe 5.2.2 b) ont permis d'estimer une valeur de la température de paroi et du coefficient d'échange sur cette période de 8 jours, avec un coefficient de corrélation de 0,93, et ce, dans l'hypothèse d'un courant d'air aspirant. Ces valeurs sont les suivantes :

- Température de paroi : 12,4°C
- Coefficient d'échange : 0,3574

Lorsque la température extérieure est inférieure à la température de paroi, et si l'air continue d'entrer dans la cavité, alors et théoriquement, en appliquant la formule [5.1], la température de la zone d'entrée devient inférieure à 12,4°C, atteignant une valeur minimale de 11,2°C atteinte pour une température extérieure de 10,0°C.

Dans le cas d'un courant d'air soufflant, et en appliquant la même formule avec les mêmes constantes définies ci-dessus, la température de la zone d'entrée devrait alors être comprise entre 10°C (température de la zone tampon, valeur atteinte si cette zone tampon débute à 2 m de l'entrée, c'est-à-dire au 1^{er} point de mesures dans la cavité) et 12,4°C (température de paroi, valeur vers laquelle tend la température de la zone d'entrée, si la zone tampon se trouve à une distance infinie du 1^{er} point de mesures).

Pour ces deux conditions, une analyse statistique des valeurs mesurées est donnée dans le **tableau 3**. Nous constatons que dans le cas où la température extérieure est inférieure à 10°C, 60% des valeurs mesurées dans la zone d'entrée sont comprises entre 12,0 et 12,1°C (valeurs entre le 20^e centile et le 80^e centile), et 80% des valeurs entre 11,8°C et 12,4°C (valeurs entre le 10^e centile et le 90^e centile). Cela montre que lorsque la température extérieure est inférieure à 10°C, et qu'il est probable que la cavité souffle, la température de la zone d'entrée est proche de 12,0°C. Une analyse plus fine des valeurs mesurées toutes les 2 minutes montre que les valeurs qui s'écartent de 12,0°C

correspondent essentiellement aux moments où la température extérieure se rapproche de 10°C, c'est à dire aux moments où le courant est en passe de s'inverser. Il faut ensuite quelques instants pour que la sonde de mesure se stabilise autour de 12,0°C, instants qui prennent pour valeurs 26 mn, 50 mn et 108 mn sur les trois situations que nous avons étudiées. Cela dénote un faible brassage de l'air au niveau du capteur de température de la zone d'entrée et donc d'un courant d'air soufflant faible, voir imperceptible.

Te= température extérieure	Te < 10°C	10°C ≤ Te ≤ 2,4
Nombre de valeurs	521	404
Valeur maximale	13,0°C	13,5°C
90 ^e Centile	12,4°C	13,5°C
80 ^e Centile	12,1°C	13,3°C
Valeur médiane	12,0°C	12,6°C
Moyenne	12,04°C	12,72°C
20 ^e Centile	12,0°C	12,2°C
10 ^e Centile	11,8°C	12,0°C
Valeur minimale	11,5°C	11,8°C

Tableau 3

Si l'on considère que la température de la zone d'entrée se stabilise à 12,0°C lorsque le courant d'air souffle, et en prenant les valeurs de température de paroi et de coefficient d'échange données ci-dessus, on peut calculer la distance z par rapport au point de mesure du début de la zone tampon.

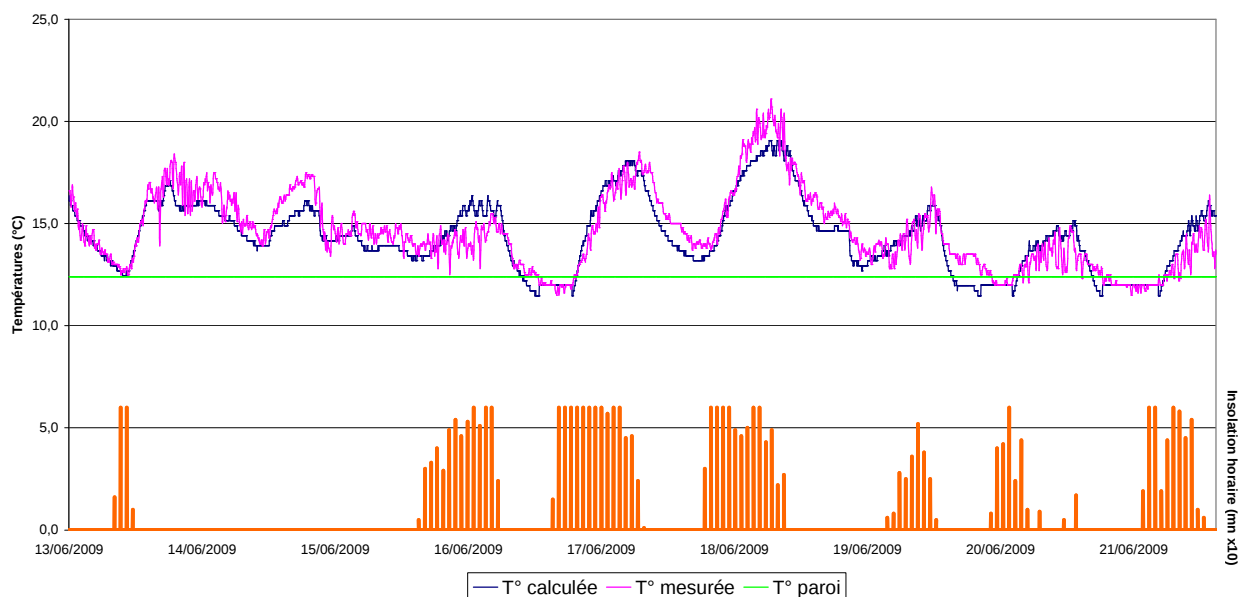
La formule [5.1] nous permet d'écrire :

$$12,0 = 12,4 + (10,0 - 12,4) \times \exp(-0,3574 \times z)$$

$$\text{Nous en déduisons } z = \frac{1}{0,3574} \times \text{LN}\left(\frac{2,4}{0,4}\right)$$

soit $z = 5,01$ m.

Cette valeur est bien cohérente avec le fait que la 2^e sonde température dans la cavité se situe à 8 m de celle de la zone d'entrée. La zone tampon débuterai donc en moyenne à 5 m de ce point de la zone d'entrée (valeur théorique).



Graphique 14 : simulation de la température de la zone d'entrée comparée à la température mesurée

Le **graphique 14** compare les valeurs, de deux minutes en deux minutes, de la température mesurée dans la zone d'entrée et de la température calculée à partir des éléments ci-dessus, à savoir :

k représente le coefficient d'échange. $k = 0,3574$

T_p est la température de paroi. $T_p = 12,4^{\circ}\text{C}$

z est la distance entre l'entrée de la cavité et le point de mesure dans la cavité. $z = 2 \text{ m}$

T_e représente la température mesurée à l'extérieur de la cavité

T est la température dans la zone d'entrée.

Pour $T_e > 10^{\circ}\text{C}$, alors $T = T_p + (T_e - T_p) \times \exp(-k \times z)$, soit $T = 0,4893 \times T_e + 6,3323$

Pour $T_e \leq 10^{\circ}\text{C}$, alors $T = 12^{\circ}\text{C}$

La similitude entre la courbe des températures mesurées et celle des températures calculées est probante, avec un coefficient de corrélation de 0,90 (0,87 en ne prenant que les valeurs lorsque la température extérieure est supérieure à 10°C). On note toutefois quelques écarts :

- Lorsque la température extérieure est supérieure à 10°C , la température calculée est légèrement supérieure à la température mesurée, en moyenne de $0,26^{\circ}\text{C}$.
- Sur l'ensemble de la période, la courbe des températures mesurées dans la zone d'entrée est plus « bruitée » que celle des températures calculées. Ce phénomène peut s'expliquer par la rugosité de la zone d'entrée (ce n'est pas un tube lisse), se traduisant par une turbulence des mouvements de l'air qui y circule, et par conséquent, une évolution agitée de la température.
- En matinée du 14 juin, la température mesurée décroît puis croît à nouveau rapidement. La décroissance se fait en 12 mn et la remontée de température se fait dans la même durée, avec une valeur basse atteinte à 12h26. La température perd et retrouve ainsi $2,7^{\circ}\text{C}$. A cela, on peut apporter plusieurs réponses :
 - C'est une variation due à l'irrégularité et la rugosité de la zone d'entrée, comme nous venons de l'expliquer.
 - La cavité se met à souffler au lieu d'aspirer, sans que l'on connaisse bien la raison.
 - La température extérieure prise en référence diffère de celle qui se trouve à proximité de l'entrée. En effet, la température est mesurée à 2 m au-dessus du sol et à 10 m de l'entrée de la grotte. Or, le 14 juin, en tout début de matinée, le ciel est dégagé et la température extérieure croît rapidement, entraînant une aspiration de la cavité très bien retranscrite par le calcul de la mesure de la température de la zone d'entrée. Vers 10h00, le ciel se couvre rapidement et des averses touchent la région en fin de matinée. « *Dans le flux d'ouest à sud-ouest qui s'organise à l'avant de la dépression atlantique, la masse d'air devient instable. Le passage pluvio-orageux qui balaie le département se révèle actif...* » (Bulletin Climatologique Départemental – juin 2009 – données publiques du site www.meteofrance.com). Des précipitations sont ainsi enregistrées à Saint-André-en-Terre-Plaine entre 14h00 et 17h00. Elles se produisent un peu plus tôt à Voutenay-sur-Cure, comme le montre l'analyse des images radars précipitations que nous avons pu consulter. Dans ces conditions, la température peut chuter rapidement, ce qui est attesté par les mesures de la température extérieure à Voutenay-sur-Cure, qui, de 20°C enregistré à 12h04, descend à 19°C à 12h16. A proximité de l'entrée de la cavité, où la température est plus directement soumise au bilan radiatif de la surface du sol, l'écart peut atteindre une valeur plus élevée. Le refroidissement a pu ainsi être accentué par l'arrivée de la pluie, un renforcement du vent (augmentation mesurée sur le poste de référence de 3 à 5 m/s avec rafales à 9 m/s) et un changement de direction de celui-ci (vent d'est-sud-est tournant au sud-ouest). Très rapidement, ce refroidissement au sol a pu également être atténué par le brassage de l'air induit par ces mêmes phénomènes météorologiques. Il est donc possible que cette chute de température marque l'arrivée de la pluie et non la preuve d'une brusque inversion du courant d'air.
 - Ces mêmes phénomènes météorologiques ont pu provoquer de brusques variations de la pression atmosphérique à proximité de la cavité, et ainsi entraîner une inversion de courant d'air durant un court instant. Les mesures à notre disposition, à intervalles horaires, ne permettent pas de l'affirmer. Tout au plus, nous constatons qu'à l'arrivée de la pluie, la pression qui était alors croissante, décroît durant deux heures pour remonter brutalement en

une heure. Mais les valeurs mesurées sont faibles : 1018,6 hpa à 10h00 UTC, 1018,3 hpa à 12h00 UTC, 1019,0 hpa à 13h00 UTC au poste de mesures d'Auxerre.

- Sur l'ensemble de la période, la courbe des températures calculées présente un décalage avec celle des températures mesurées. La température calculée représente la valeur théorique de la température de la zone d'entrée, et ne tient donc pas compte d'un éventuel décalage temporel correspondant à la durée de mise en équilibre thermique de cette zone.
- ✓ Ainsi, dans la nuit du 17 au 18, le refroidissement nocturne entraîne un refroidissement naturel dans la zone d'entrée (valeur mesurée), mais en décalage avec celui calculée à partir des mesures extérieures :
 - A 19h56, la température calculée est de 17,1°C et il faut attendre 1h30 plus tard pour mesurer une telle valeur
 - A 22h28, la température calculée est de 14,9°C et il faut attendre près de 2h00 plus tard pour mesurer une telle valeur
 - A 23h30, la température calculée est de 14,4°C, et il faut attendre 3h45 pour mesurer une telle valeur.

L'influence de la température extérieure se ressent donc avec un décalage temporel qui va en s'accroissant. Si la cavité aspire, alors la vitesse de pénétration de l'air se fait très lentement et devient imperceptible. Il est toutefois possible que, pour d'autres raisons, le courant d'air ne se produise plus, et que l'air de la zone d'entrée se refroidisse plus lentement que l'air extérieur.

- ✓ L'étude des heures où se produisent les températures maximales, mesurées ou calculées, montre également un décalage, généralement dans le sens d'une température mesurée se produisant après celle d'une température calculée. Il y a toutefois deux exceptions, que nous mettrons sur le compte des irrégularités naturelles de la mesure de température, également par un temps de mise en équilibre de la sonde que nous ne connaissons pas. Le **tableau 4** résume ces résultats.

JOUR	Décalage températures	
	Calculée – Mesurée	Mesurée – Calculée
14 juin 2009		00 h 52 mn
15 juin 2009		00 h 12 mn
16 juin 2009		03 h 10 mn
17 juin 2009		02 h 14 mn
18 juin 2009		00 h 20 mn
19 juin 2009	00 h 18 mn	
20 juin 2009	00 h 30 mn	
21 juin 2009		00 h 12 mn

Tableau 4

Les décalages inférieurs à 30 mn correspondent certainement au temps de mise en équilibre de la sonde température, tout du moins en partie. Nous retrouvons des décalages temporels importants les 16 et 17 juin, qui laissent supposer l'absence d'un courant d'air ou sinon celui-ci est alors imperceptible.

- Dans la nuit du 19 au 20 juin, la courbe de la température mesurée présente un palier à 13,4°C, puis va décroître pour atteindre un nouveau palier à 12,0°C, correspondant au fait que le courant d'air est alors « soufflant ». Or le premier palier, qui correspond à un palier de la température de l'air extérieur, est de 1,4°C supérieur à la valeur calculée – qui est en ce cas, également de 12,0°C. Tout se passe comme si la température de paroi était alors plus chaude (que l'on peut calculer à 15,1°C). Pourtant, les valeurs des heures suivantes, schématisées sur le graphique 13, reste en cohérence avec une température de paroi plus froide. Ce n'est donc pas une situation simple à comprendre, et il est possible que d'autres éléments dont nous n'avons pas connaissance interviennent. Ce peut être, par exemple, des événements extérieurs, comme, là aussi, la présence d'averses très ponctuelles.

Nous ne réalisons pas la même étude sur la période allant d'avril à mai. En effet, soit nous travaillons sur l'ensemble des deux mois, et le phénomène de réchauffement constaté de la température de paroi ne sera pas pris en compte, faussant ainsi les résultats, soit nous travaillons sur des périodes glissantes de 8 jours, mais en ce cas, l'information obtenue uniquement à partir des températures horaires restera moins riche que celles obtenues ici avec des mesures toutes les deux minutes.

7. Conclusion

Cette analyse présente des limites qu'il est bon de rappeler :

- La précision des capteurs de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$
- Le temps de réactivité de ces mêmes capteurs
- La position des sondes, autant à l'extérieur qu'à l'intérieur de la grotte

Ces limites doivent être prises en considération en lisant l'ensemble des résultats et des chiffres donnés ci-dessus avec prudence. Malgré cela, l'analyse des deux campagnes de mesures de températures réalisées en avril et mai 2009 puis du 14 au 21 juin 2009 dans la grotte de la Grande Fontaine permet d'apporter quelques éléments probants :

- La zone d'entrée se réchauffe en cours de saison, réchauffement mis en évidence par l'augmentation de la température de paroi calculée.
- A partir d'une relation assez simple correspondant à la circulation d'un fluide (l'air) dans un tube dont on connaît la température de paroi, nous arrivons à simuler correctement la température à l'intérieur de la zone d'entrée de la grotte. Pourtant, il est évident que cette relation est beaucoup plus complexe dans la réalité, de par la configuration des lieux, bien éloignée de la forme d'un tube régulier.
- L'analyse des mesures de températures a permis de faire des hypothèses non-contredits par nos calculs :
 - Lorsque la température extérieure est supérieure à la température de la zone tampon, la cavité aspire de l'air.
 - Lorsque la température extérieure est inférieure à la température de la zone tampon, la cavité souffle de l'air.
- Les mouvements d'air peuvent devenir imperceptibles, et le sont certainement assez souvent. Les mesures ne permettent pas de conclure quant à l'existence d'inversions de courant d'air. Tout au plus, l'irrégularité de l'intensité de ce courant d'air peut expliquer les observations faites *in situ*, comme l'absence parfois de mouvements d'air. Compte tenu du faible débit d'air que les calculs mettent ainsi en évidence, il est possible que des inversions de courant d'air observées soient liées à des variations atmosphériques extérieures, comme des variations de pression, des variations d'insolation ou le passage de précipitations.

Ces résultats confirment nos conclusions faites dans les premières analyses (RANNINGER N. et D., 2009 – BOUCHARD et AL., 2010 – WILLEFERT, 2008), à savoir que ces mouvements d'air, de par leurs irrégularités et leur très faible intensité, ne caractérisent pas l'existence d'une cavité profonde au delà des zones de fissures sur lesquelles se sont arrêtées les explorations.

Aujourd'hui, il pourrait être intéressant de recommencer une série de mesures sur une période plus longue, à savoir au moins une année, et ce dans le but de poursuivre et affiner l'analyse climatique de la grotte de la Grande Fontaine. Pour éviter les écueils de cette étude, cela demande des capteurs de qualité, et une installation faite avec beaucoup d'attention et de rigueur. Dans une région où les grottes sont peu profondes, comme c'est le cas dans le département de l'Yonne, et dans lesquelles les mouvements d'air sont généralement imperceptibles, l'analyse des résultats restera de toute façon assez laborieuse et limitée compte tenu des incertitudes inhérentes à une turbulence thermique qui se traduit par des fortes variations naturelles de la température.

8. Bibliographie

La bibliographie est volontairement restreinte, et nous ne citons que les publications mentionnées dans le texte. Le lecteur trouvera des références complètes en consultant les ouvrages de J. CHOPPY ou de B. LISMONDE.

BOUCHARD, B. RANNINGER N., WILLEFERT O. 2010. Essai d'interprétation des variations de températures pour distinguer le mode respirant d'une cavité – Seconde expérience. Spéléo-Club de Chablis : 13 pp.

CHOPPY, J. 1984. Température de l'air. Phénomènes karstiques, série 1.1 : Processus climatiques dans les vides karstiques, 3^e partie : 73 pp.

GINET, R. & DECOU, V. 1977. Initiation à la biologie et à l'écologie souterraines. Editions Universitaires J-P. Delarge, Paris : 345 pp.

LISMONDE, B. 2002a. Climatologie du Monde Souterrain. Tome 1 : Vent des ténèbres. Edition du CDS Isère, Grenoble : 168 pp.

LISMONDE, B. 2002b. Climatologie du Monde Souterrain. Tome 2 : Aérologie des systèmes karstiques. Edition du CDS Isère, Grenoble : 362 pp.

RANNINGER, D. & RANNINGER N. 2009. Essai d'interprétation des variations de températures à la Grande Fontaine. Spéléo-Club de Chablis : 13 pp.

WILLEFERT, O. 2008. Essai de ventilation forcée à la Grande Fontaine. Spéléo-Club de Chablis : 22 pp.

Textes

Bouchard Bruno

Photographies

Ranninger Nicolas et Delphine

16 mars 2011