

# Cave aerology

*Effet des variations journalières et saisonnières  
de la température sur le CO<sub>2</sub> dans les cavités*

Nicolas Peyraube, Roland Lastennet,  
Alain Denis, Philippe Malaurent, Jessica D. Villanueva

Mots clés: grotte, CO<sub>2</sub>, ventilation naturelle

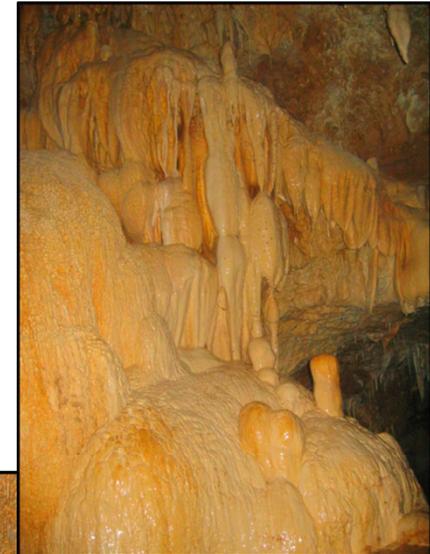
# Cavité = Espace confiné souterrain

Les grottes sont des espaces souterrains et confinés

L'aérologie souterraine conditionne :

Les variations de température → arrivée d'air froid et humide

Les variations de  $\text{CO}_2$  → renouvellement ou pas de la masse d'air



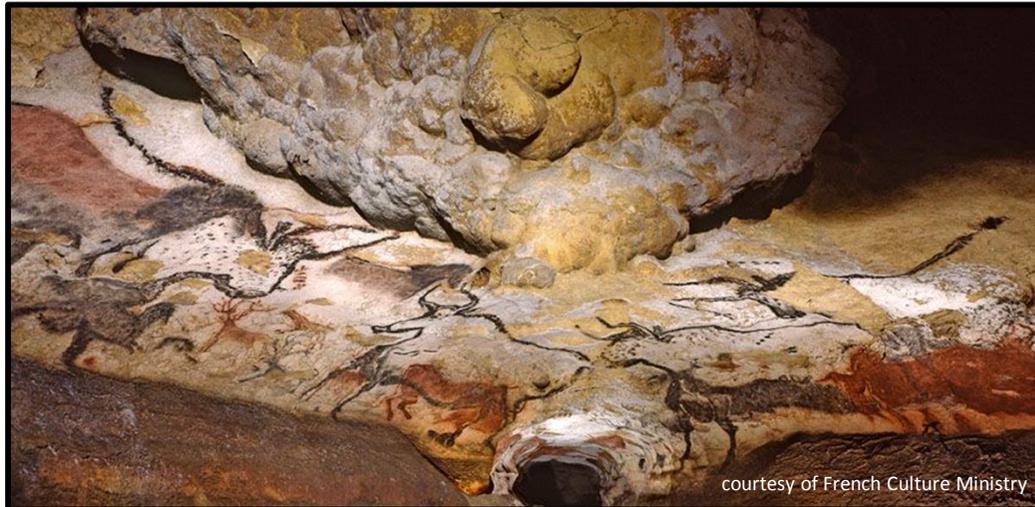
## Exemples d'applications

- 1 ) la conservation des grottes ornées  
exemple de la grotte de Lascaux (évidement!)

*Objectif :*

Eviter la dissolution des supports des peintures

Eviter le dépôt par-dessus les peintures



## Exemples d'applications

- 2 ) Culture de champignons  
exemple: champignonnière de Chancelade

*Objectifs :*

Avoir une température et humidité stable

*Contrainte :*

Vérifier le taux de CO<sub>2</sub> pour la protection des personnes



## Exemples d'applications

### 3 ) data center

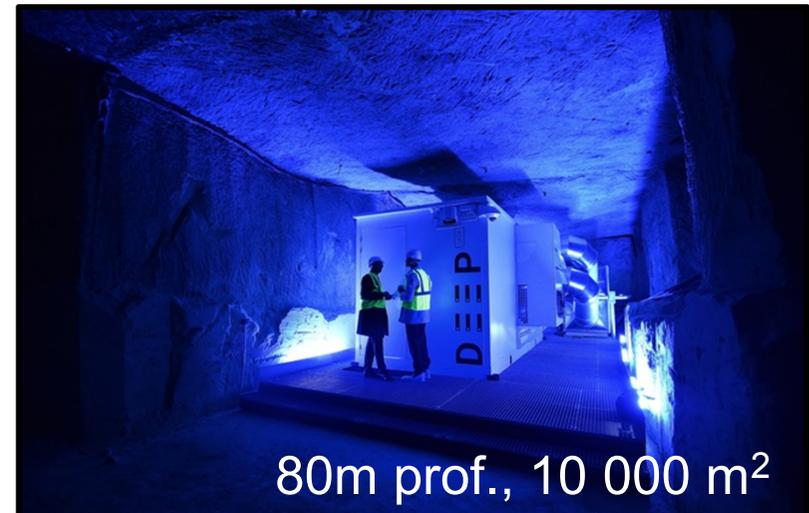
exemple: ré-utilisation des carrières de Saumure

#### *Objectifs :*

avoir une température constante pour réduire les coûts de refroidissement → jusqu'à 40% de la conso électrique

#### *Contrainte :*

Vérifier le taux de CO<sub>2</sub> pour la sécurité des personnes



L'air chaud est plus léger que l'air froid

$$d_{15}=1.22 \quad d_{25}=1.18$$

L'air humide est plus léger que l'air sec

dans un volume, le nombre de molécules reste le même

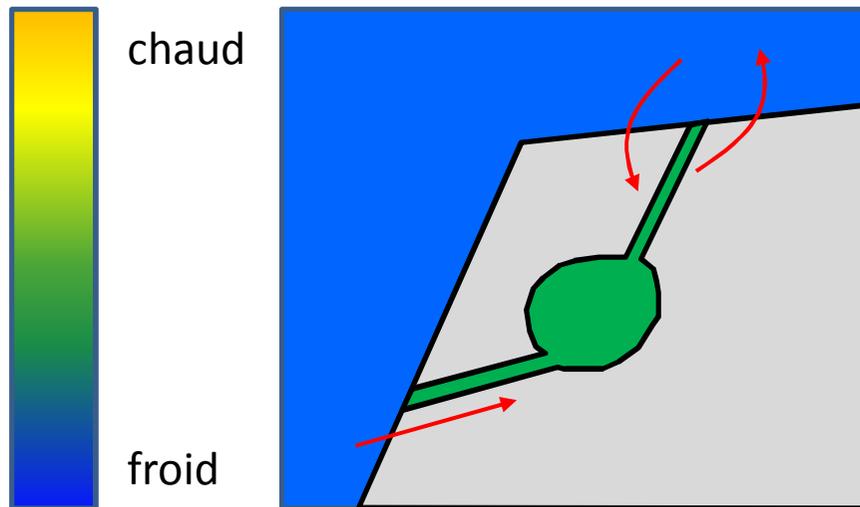
et H<sub>2</sub>O pèse 18g/mol, plus léger que l'air sec (O<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>=60g/mol)

L'air chaud peut contenir plus d'eau que l'air froid

- Il y a 2 types de cavité :
- Avec 2 entrées ou plus
  - Avec 1 seule entrée

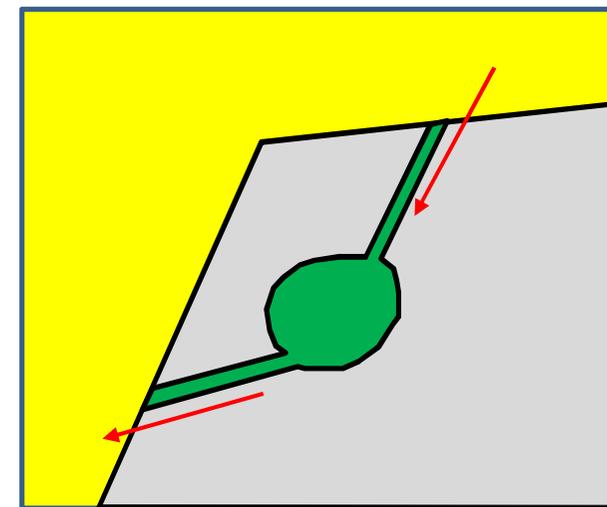
## Cavité à deux entrées:

### Saison froide



L'air chaud s'échappe  
par l'entrée haute  
L'air froid est aspiré dedans  
par l'entrée basse  
Une boucle peut se mettre  
en place à l'entrée haute

### Saison chaude

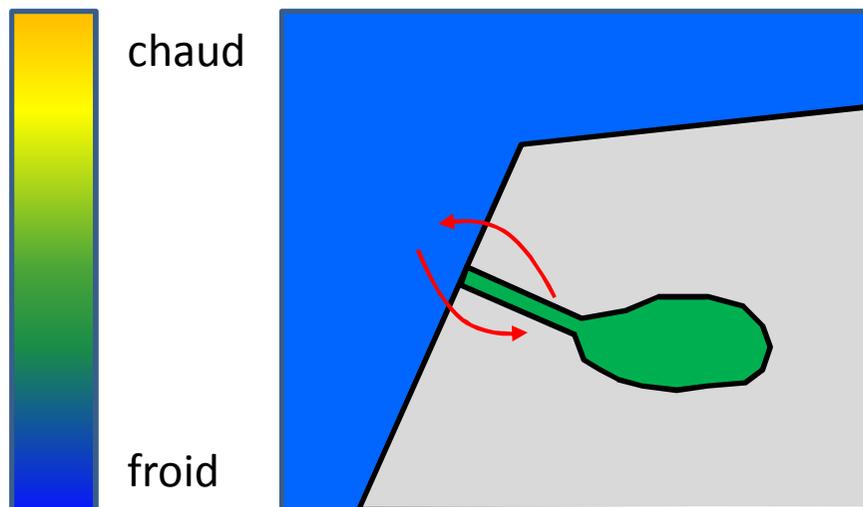


L'air froid s'échappe  
par l'entrée basse  
L'air chaud est aspiré dedans  
par l'entrée haute

- Il y a 2 types de cavité :
- Avec 2 entrées ou plus
  - Avec 1 seule entrée

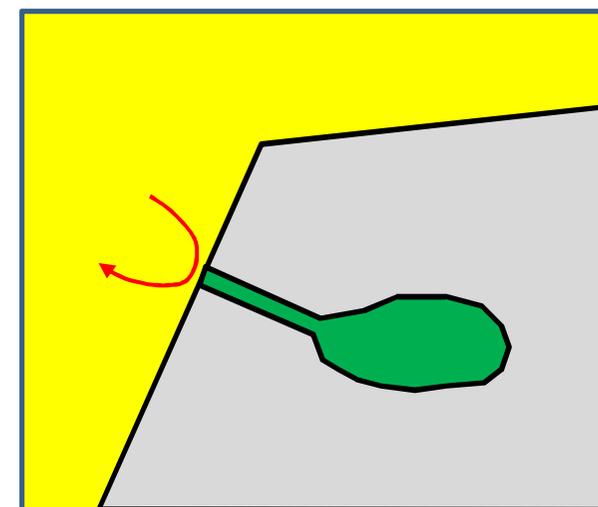
## Cavité à une seule entrée... descendante:

### Saison froide



L'air froid rampe dedans  
L'air chaud s'échappe  
Une boucle se met en place

### Saison chaude



L'air chaud ne rentre pas  
L'air froid reste dedans  
C'est le **piège à air froid**

C'est le cas à Cussac

Découverte en 2000

## **Cussac :**

Peintures, gravures et squelettes

date d'occupation estimée vers -25,000 ans

1,5 km de long, et 20 à 70 m profondeur

1 grosse entrée et probablement beaucoup de petites



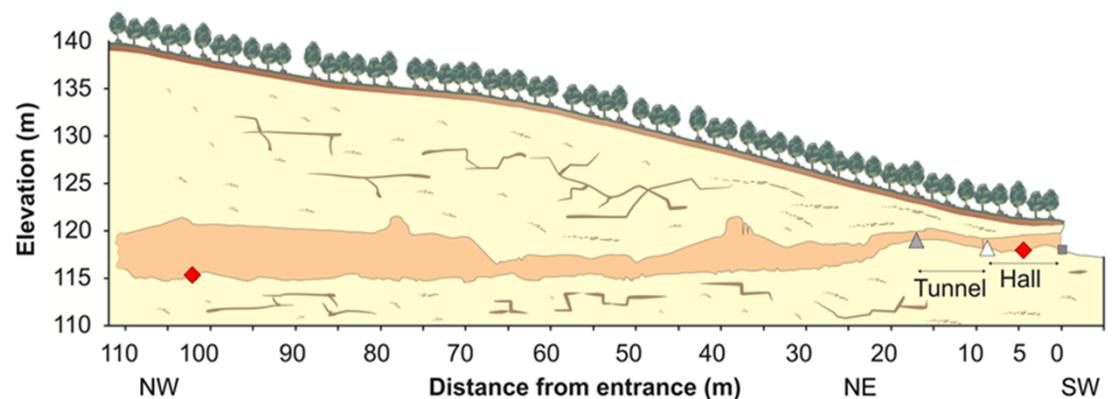
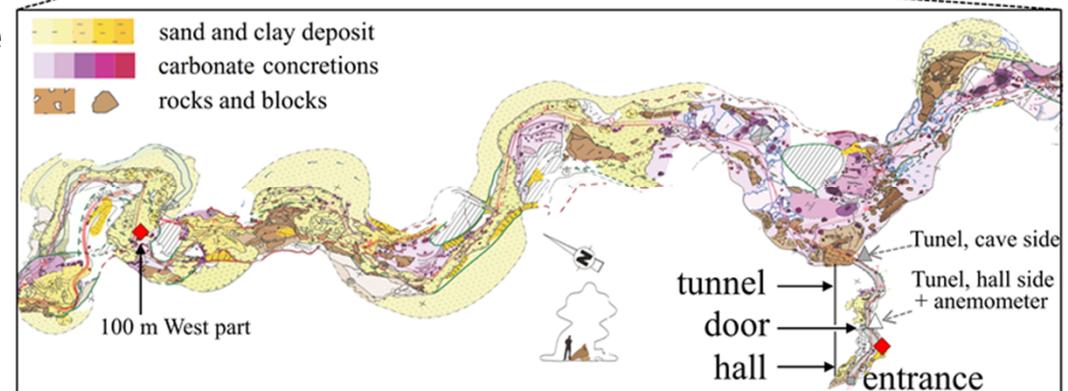
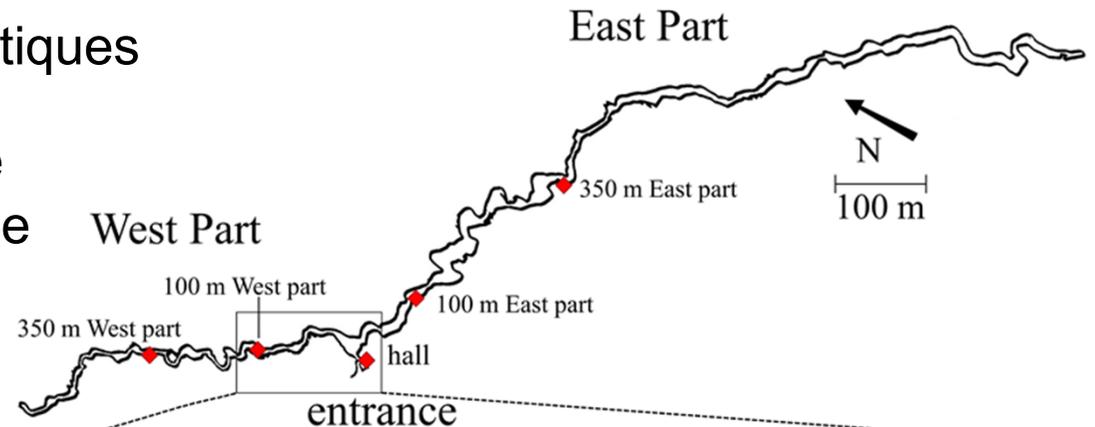
## Équipement et caractéristiques

Vestibule ou hall d'entrée  
 Porte blindée non étanche  
 Tunnel 10m de long

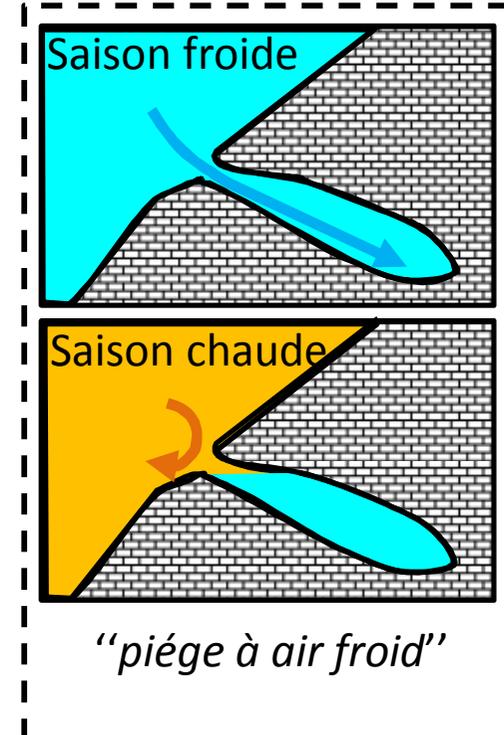
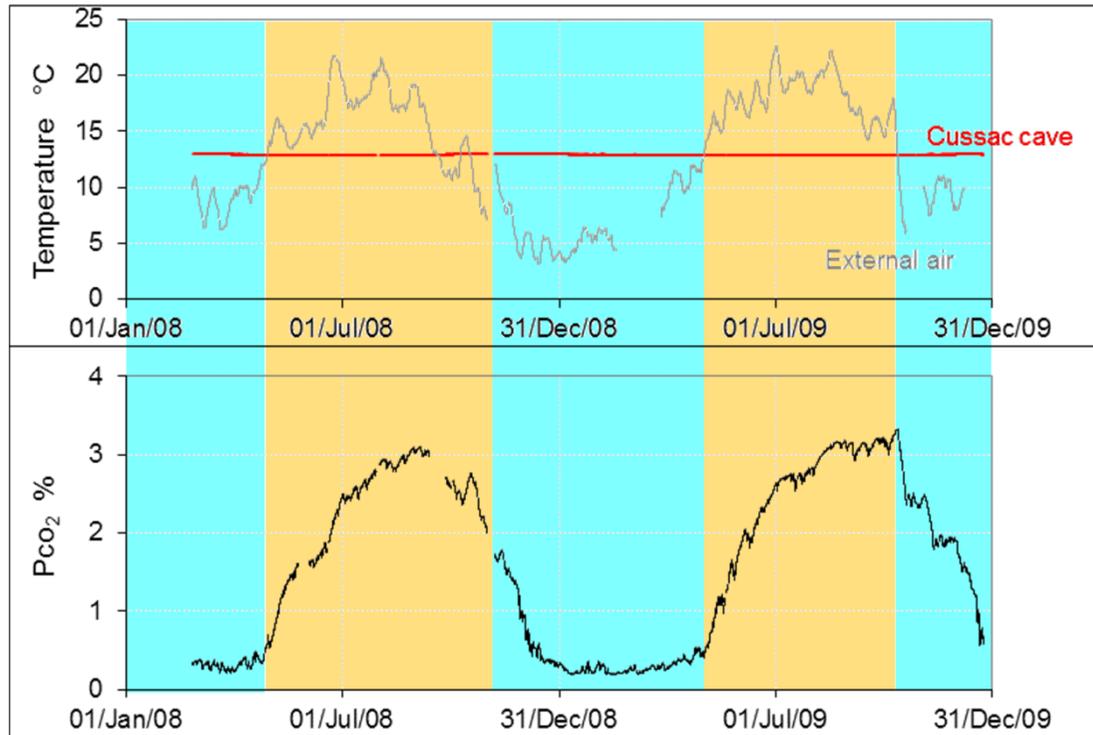
Grotte presque horizontale  
 5 à 7m de haut  
 7 à 8m de large

10 thermomètres  
 5 CO<sub>2</sub>  
 1 anémomètre

température interne  
 stable vers 13°C  
 CO<sub>2</sub> variable  
 de 0.3 à 3.0%  
 (extérieur = 0.04%)



# Variations annuelles



Cussac se comporte comme un piège à air froid

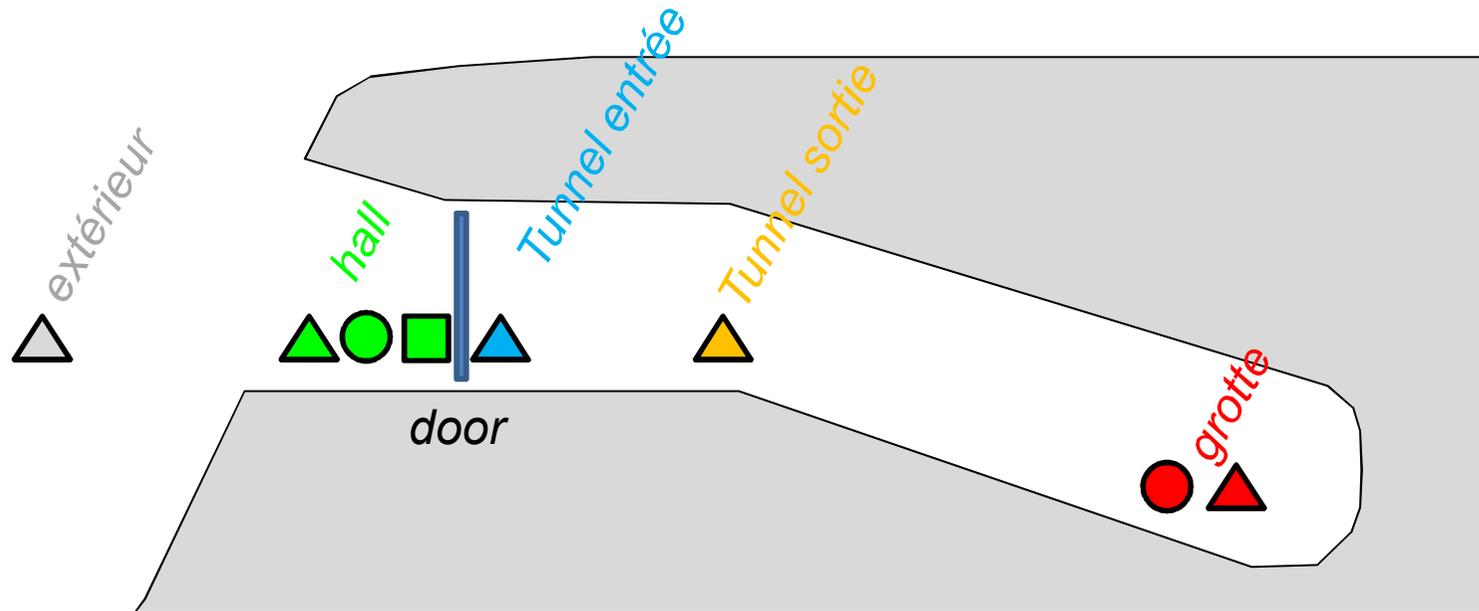
en saison froide,  
L'air froid rampe dedans

La grotte est "ouverte",  
Bonne ventilation  
CO<sub>2</sub> faible

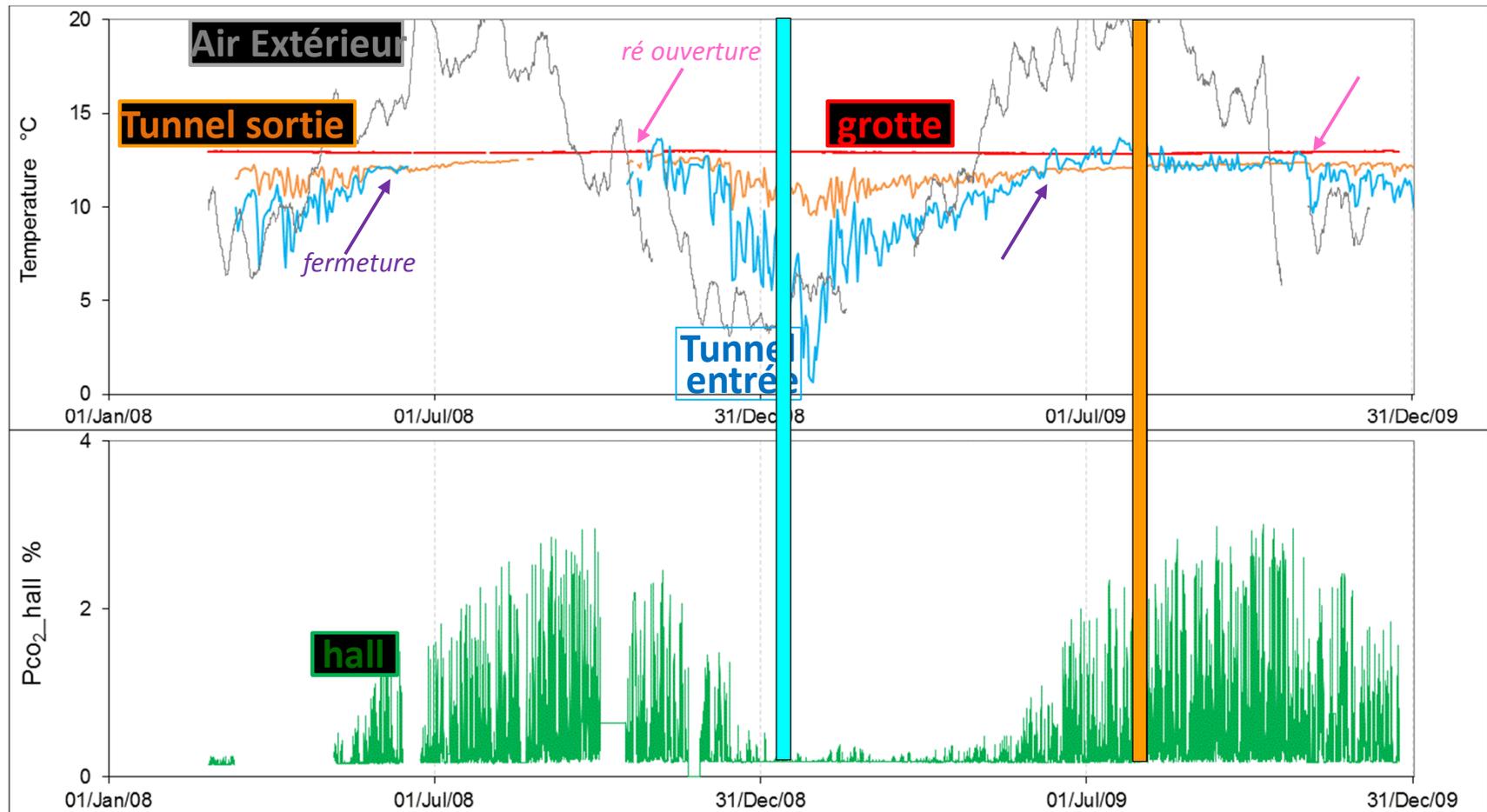
en saison chaude,  
L'air froid reste dedans

La grotte est "fermée",  
Faible ventilation  
CO<sub>2</sub> élevé

# Equipement à l'entrée

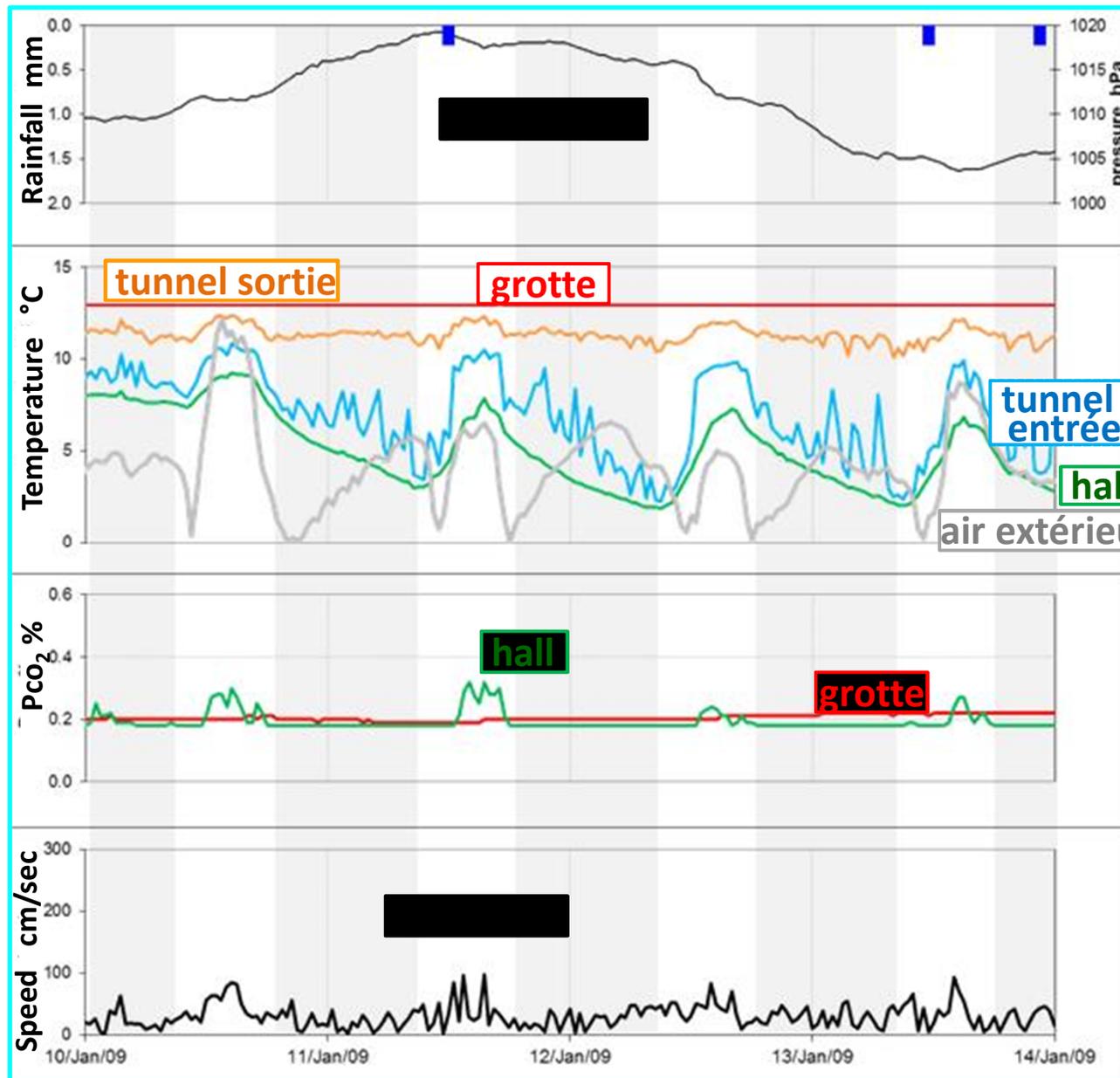


-  *thermometre*
-  *Capteur CO<sub>2</sub>*
-  *anemometre*



Cussac se “ferme” en saison chaude : T° tunnel-sortie se stabilise

Cussac n'est pas totalement “fermée” : Pco<sub>2</sub> dans le hall augmente

**La nuit:**

=> l'air froid  
 extérieur rampe à  
 l'intérieur  
 Vitesse faible,  
 Hall-Pco<sub>2</sub> faible  
 T° tunnel-sortie  
 baisse légèrement

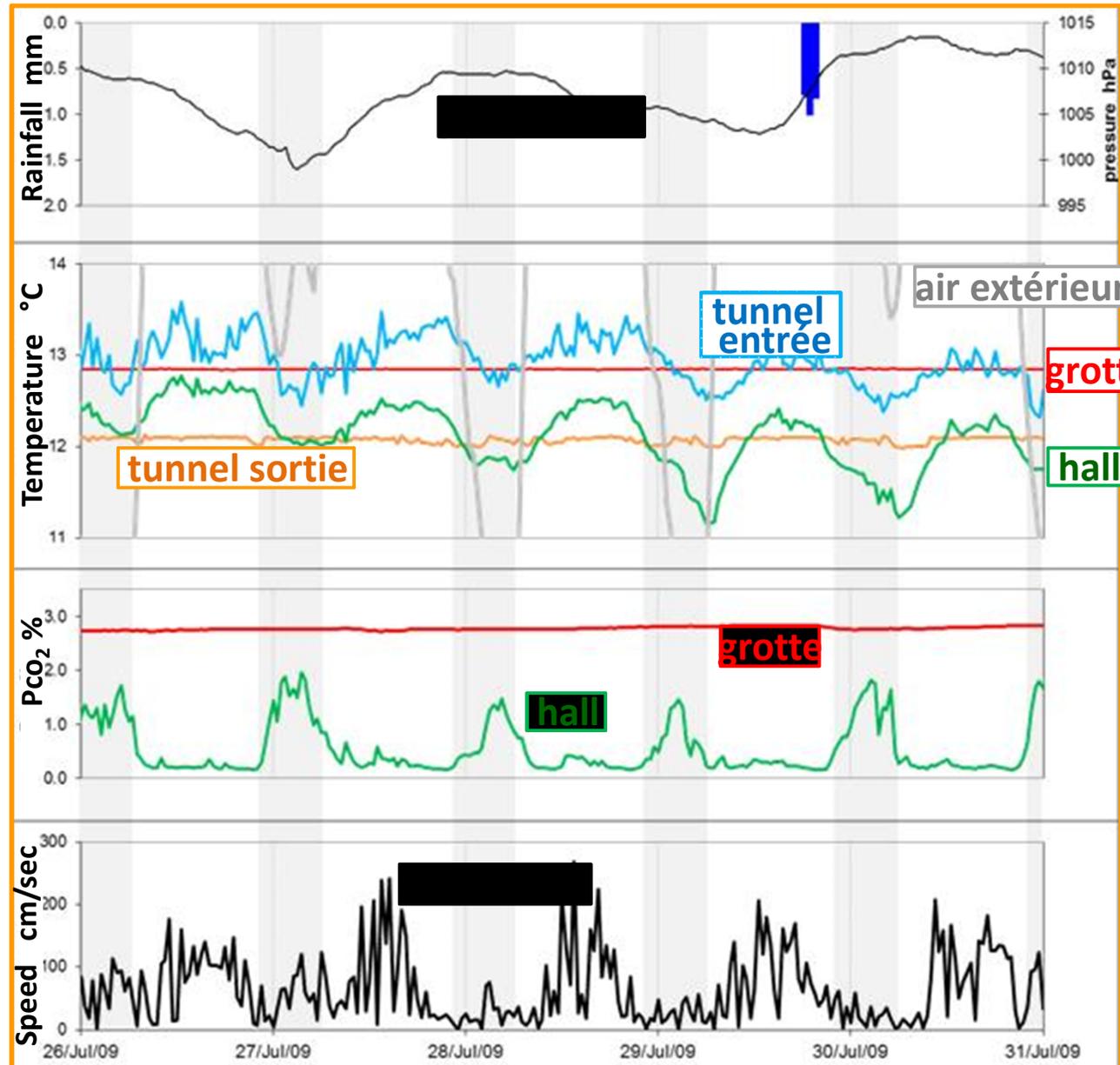
**Le jour:**

=> La grotte souffle  
 doucement  
 Vitesse moyenne,  
 Hall-Pco<sub>2</sub> augmente  
 Les températures  
 sont proches

# Critère, partie 1

## Critère pour le comportement de la grotte

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } \text{hall-}P_{\text{CO}_2} \text{ augmente} \\ \text{SINON } \text{la grotte aspire} \end{array} \right. \quad \text{ALORS la grotte souffle}$

**La nuit:**

=> La grotte souffle doucement

Vitesse moyenne,

Hall-Pco<sub>2</sub> élevé

T°tunnel-sortie est stable

**Le jour :**

=> l'air chaud extérieur n'atteint pas le tunnel

=> Piège à air froid

Vitesse haute,

Hall-Pco<sub>2</sub> faible

T°tunnel-sortie est stable

=> Boucle

## Critère pour le comportement de la grotte

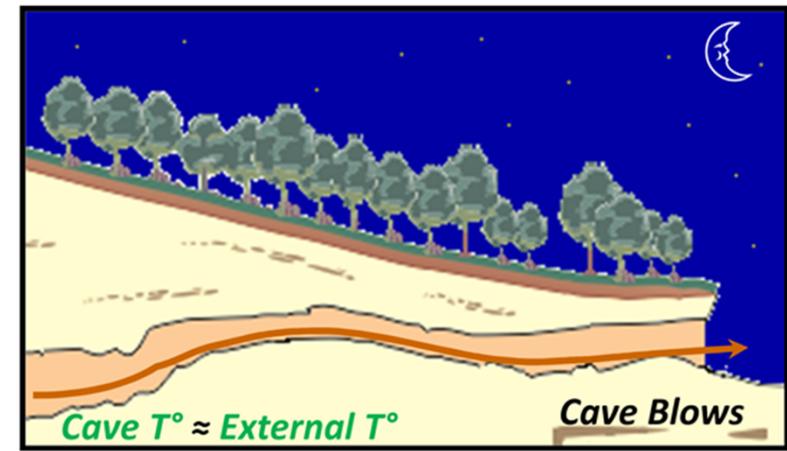
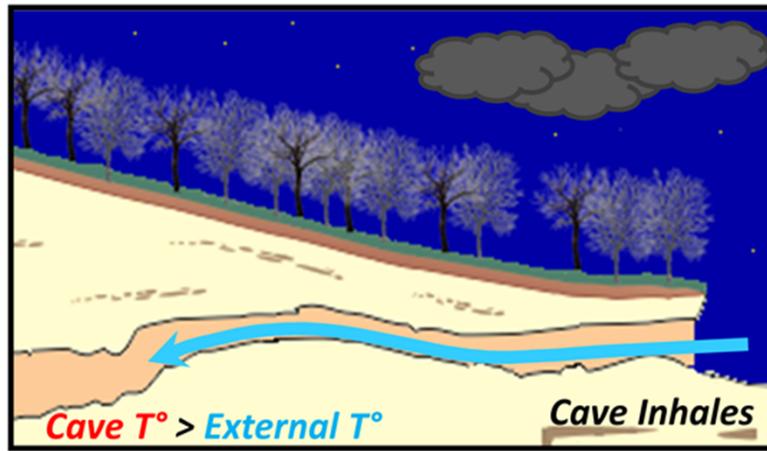
$\left[ \begin{array}{l} \text{SI} \\ \text{SINON} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \text{hall-}P_{\text{CO}_2} \text{ augmente} \\ \left[ \begin{array}{l} \text{SI } T^{\circ} \text{ tunnel\_sortie varie} \\ \text{SINON boucle de convection à l'entrée} \end{array} \right. \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{ALORS la grotte souffle} \\ \text{ALORS la grotte aspire} \end{array}$

Condition	Comportement
$P_{\text{CO}_2\_hall} > \text{médiane mobile 3 jour de } P_{\text{CO}_2\_hall}$	- la grotte souffle, - $P_{\text{CO}_2\_cave}$ élevée sort de la grotte
$P_{\text{CO}_2\_hall} < \text{médiane mobile 3 jour de } P_{\text{CO}_2\_hall}$ et $(T_{ts\max} - T_{ts\min}) > 0,6$ (de 00:00 à 23:30)	- la grotte aspire, - l'air extérieur affecte la Température à la sortie du tunnel (coté grotte).
$P_{\text{CO}_2\_hall} < \text{médiane mobile 3 jour de } P_{\text{CO}_2\_hall}$ et $(T_{ts\max} - T_{ts\min}) < 0,6$ (de 00:00 à 23:30)	- boucle de convection dans le tunnel, - la grotte ne souffle pas, l'air extérieur n'atteint pas la sortie du tunnel.

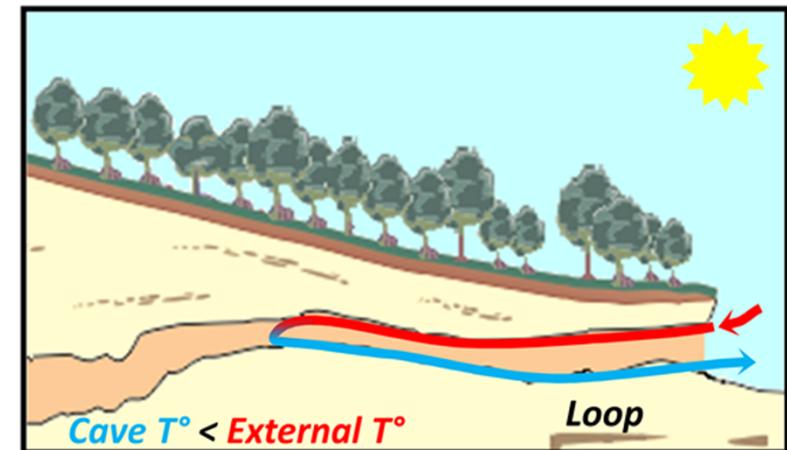
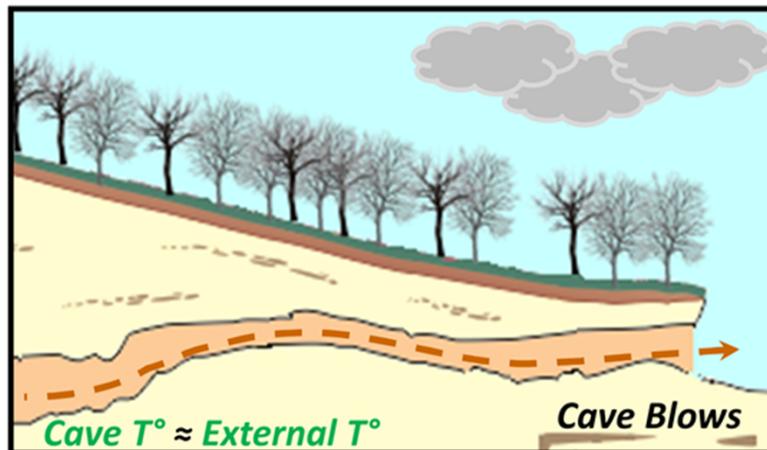
## Saison Froide

## Saison chaude

Nuit

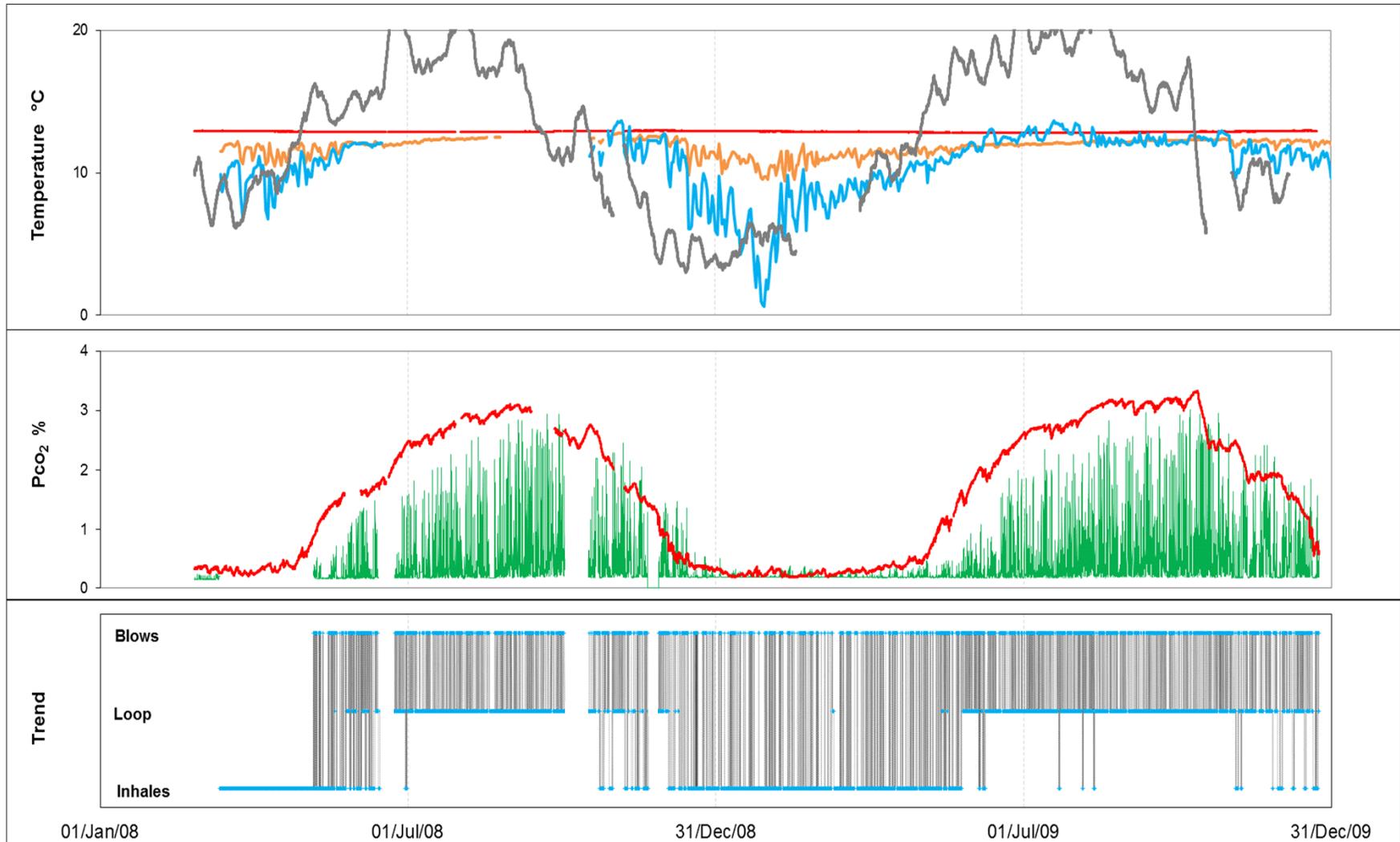


Jour



La grotte de Cussac n'est JAMAIS isolée

# Aérologie de la grotte de Cussac



	aspire	souffle	Boucle
Un jour en saison froide :	80 % du temps 0,8 kg de CO <sub>2</sub>	20 % du temps 187 kg de CO <sub>2</sub>	0 % du temps
Un jour en saison chaude :	0 % du temps	40 % du temps <b>5 Tonnes</b> de CO <sub>2</sub>	60 % du temps
Année 2009 :	34 % du temps 231 kg de CO <sub>2</sub>	33 % du temps <b>2330 Tonnes</b> de CO <sub>2</sub>	33 % du temps

Avec CO<sub>2</sub> = 1,87 kg/m<sup>3</sup> et Pco<sub>2</sub> ext= 0,038 % (ESRI global monitoring division, Mace Head)

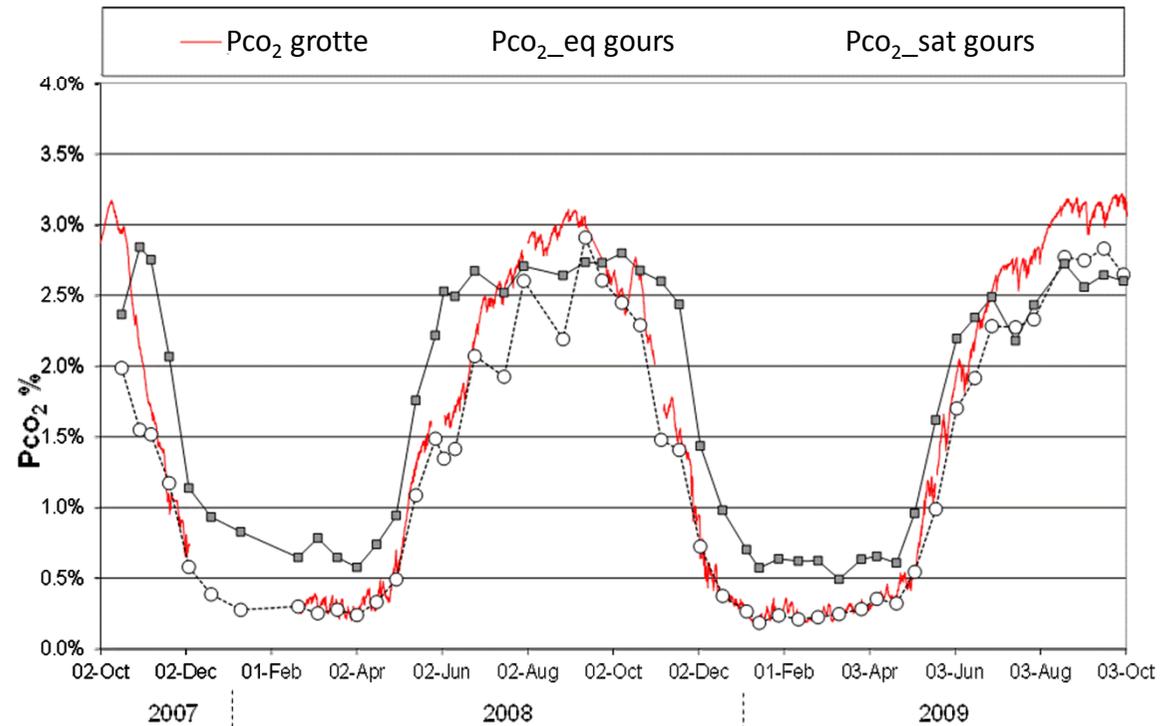
Surface de communication = 950 cm<sup>2</sup>

**La grotte de Cussac est une source de CO<sub>2</sub>**

# Bourea d'air et de l'eau pourquoi ?



gours dans la grotte



Le CO<sub>2</sub> dissous dans l'eau (Pco<sub>2</sub>\_eq) est conditionné par le CO<sub>2</sub> de l'air de la grotte

Il y a un comportement saisonnier et journalier.

La grotte n'est jamais isolée de l'extérieur.

Sur le bilan carbone, la grotte est une source de CO<sub>2</sub>.

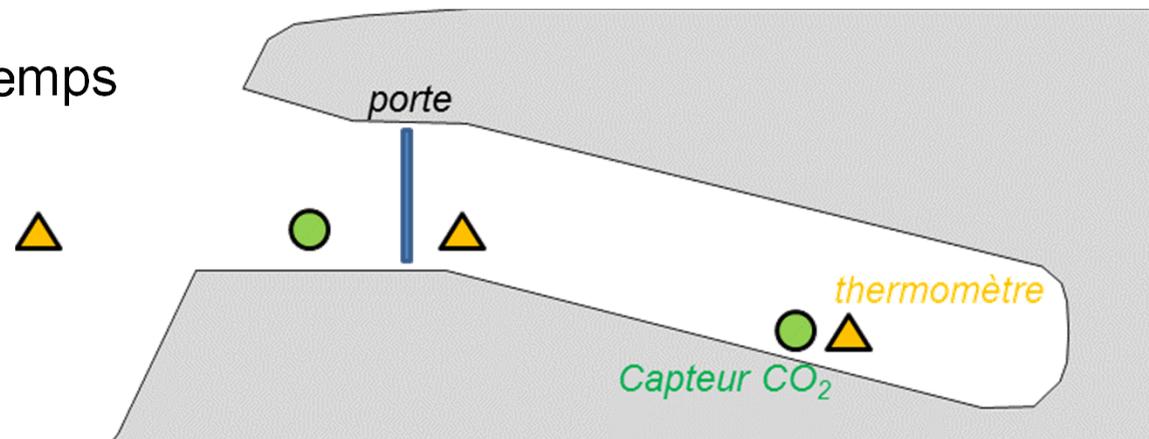
Le volume de la grotte est entièrement renouvelé à la saison froide

Pour équiper une grotte il faudrait:

3 thermomètres + 2 capteurs CO<sub>2</sub> + 1 data logger

$$3 \times 100 \quad + \quad 2 \times 1,500 \quad + \quad 2,000 \quad = \quad 5,300 \text{ €}$$

... et du temps



## 1) le suivi des cavités

Le grottes sont belles mais fragiles

Le CO<sub>2</sub> doit être suivi

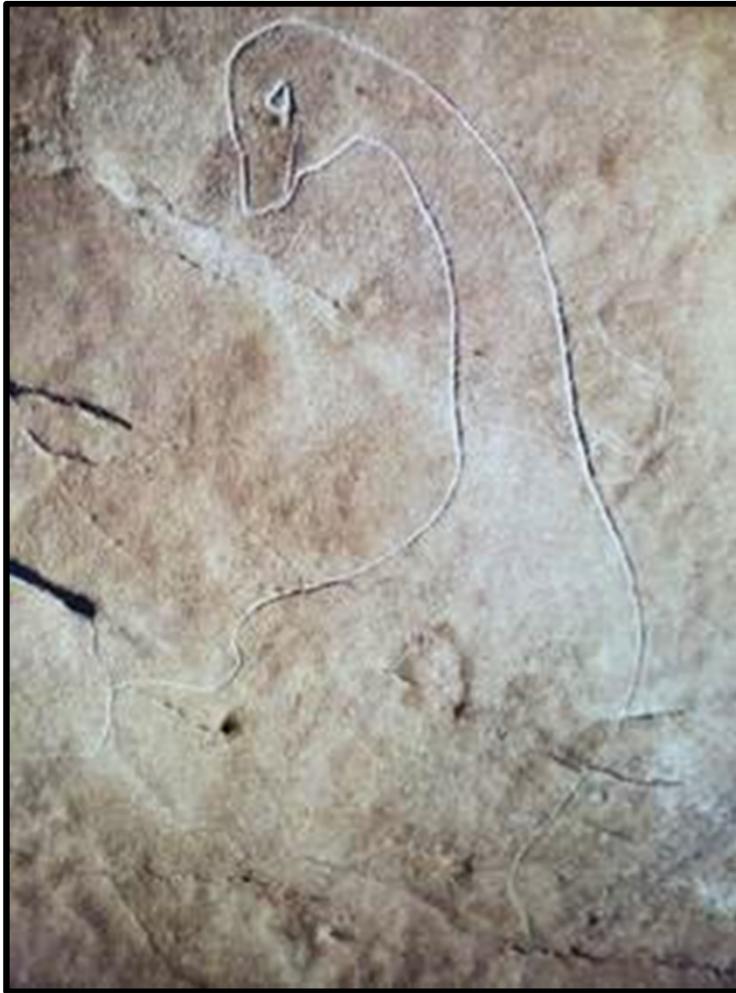
La Température doit aussi être suivie

## 2) Usage de l'aérogologie

Protéger les grottes des visiteurs et vice-versa

Estimer l'influence des grottes (et du massif) sur la chimie des eaux en transit

# Discussion...



Oie , -25 000 ans, Cussac

