



Mission pour les Initiatives  
Transverses et Interdisciplinaires



## Journée thématique capteurs souterrains :

# **Techniques de mesures autonomes de CO2 dans l'air de milieux souterrains**

Christian Burlet, Sophie Verheyden, Kris Piessens, Kris Welkenhuyzen & Yves Vanbrabant

19 Juin 2023 – Sorbonne Université

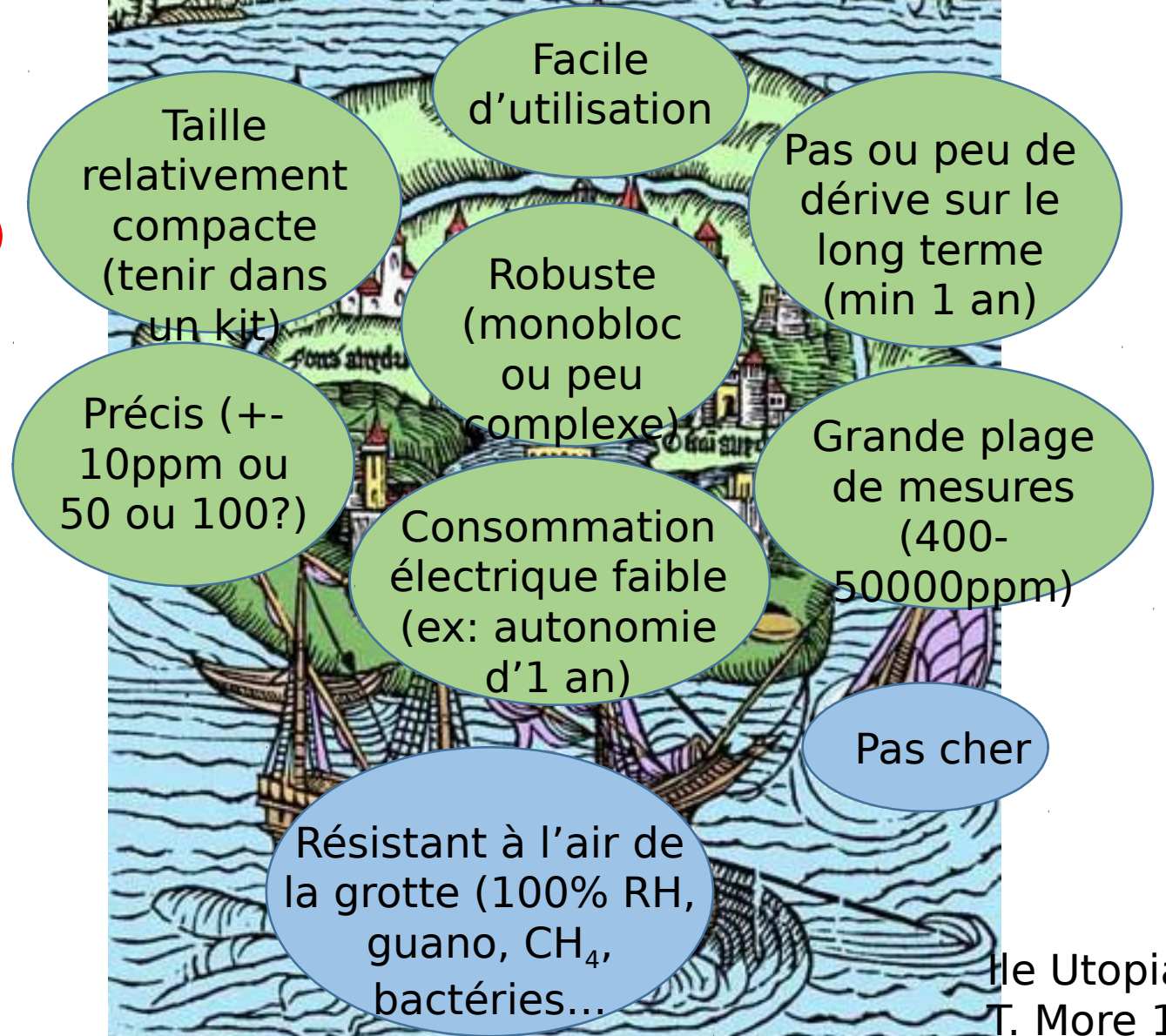
# Techniques de mesures autonomes de CO<sub>2</sub> dans l'air de milieux souterrains

1. « Cahier des charges »
2. Revues des techniques de mesures du CO<sub>2</sub> (applicables en grotte)
3. Capteurs « NDIR » et photo-acoustiques commerciaux
4. Retours d'expériences:
  1. Capteurs NDIR vs humidité vs bactéries (labo + séjours en grotte)
  2. Premiers test capteurs photo-acoustiques en grotte
  3. Projet Biorecs : mesures CO<sub>2</sub> dans les sols sur une longue période
5. Perspectives

# Cahier des charges pour un capteur CO<sub>2</sub> autonome en grotte:

- Station CORA (Luetscher et al., 2012)
- GLOG « GAZ » (Luc Syera)
- Station CO<sub>2</sub> Clément Parisot
- ...

Test longue durée (>6 mois) en grotte humide?



# Revue des techniques de mesures du CO<sub>2</sub> (applicables en grotte)

## Tubes chimiques (ex : Rae or Draeger)

+/- 10% de précision à la lecture

Peu d'influence de l'humidité de l'air

Réaction :  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{NNH}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{NNHCO}_2\text{H}$  (indicateur de changement de pH)

□ Difficile à automatiser



## Capteurs électro-chimiques

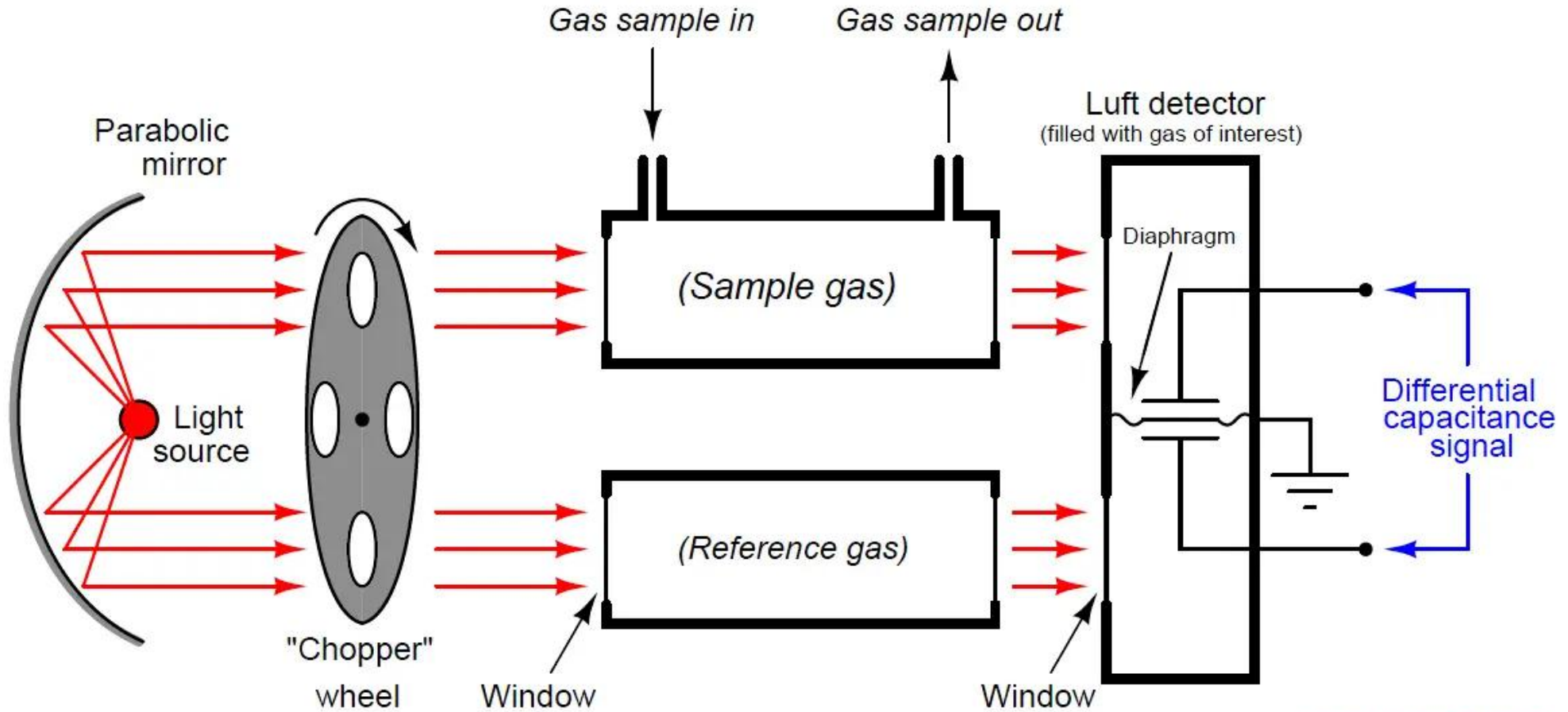
Utilisation d'une couche sensible à base de polymère (ex: hétéro-polysiloxane)

- Très faible consommation d'énergie mW- $\mu$ W
- Petite taille, faible coût (~20€).
- Effets de dérive à court et à long terme
- Faible durée de vie globale
- Faible sélectivité (ex : CH<sub>4</sub> - CO)

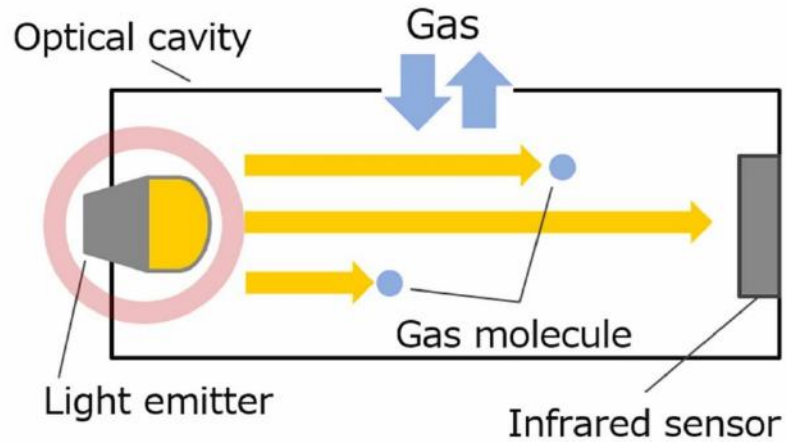


# Capteurs NDIR : Principe « Luft » historique (1930):

Capteur à deux chambres, avant l'invention des photodiodes et des filtres optiques passe-bande.



# Capteurs NDIR (non-dispersive infrared) commerciaux



Principle of NDIR source: <https://www.akm.com/eu/en/products/>

Consommation électrique ↓

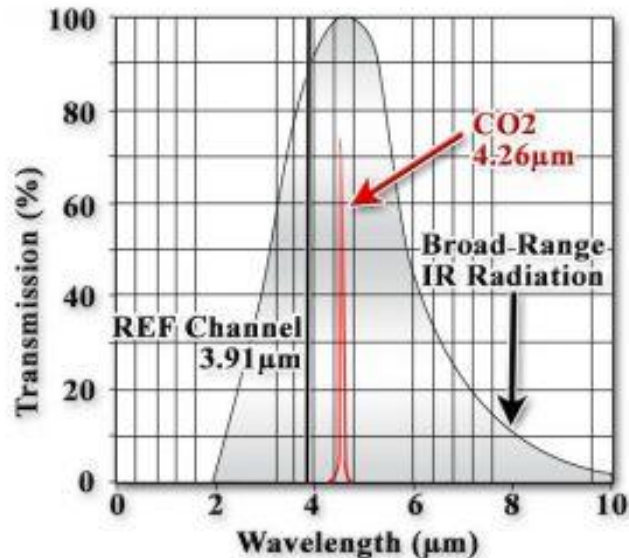


Table 7. IR radiation sources [84–87].

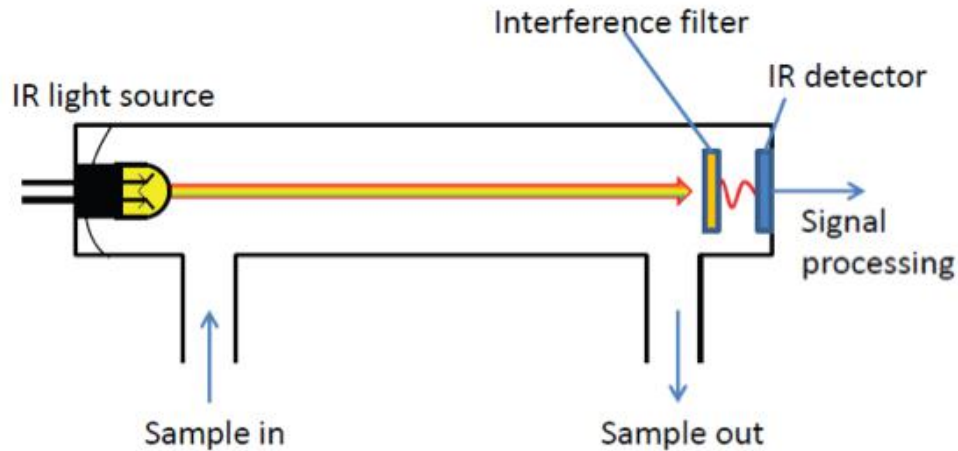
Emission	Type	Properties
Thermal	Wound filament	High power output with high reliability
	Ribbon filament	Higher pulse rates of up to 200 Hz, modulation depth of 50%, often used with reflectors to direct entire radiation out of package
	Thin-film filament	High-volume production, low output power due to small filament size
Photon	MEMS system (hot plate)	Thin-film filaments on thin membranes (of silicon), 1200 °C with 10.7 mW radiation power from 1 mm <sup>2</sup> emission area
	IR-LED	Optically pumped LEDs based on III–V semiconductors for CO <sub>2</sub> detection, emitting power of 10–30 μW
	Laser diode	Narrower bandwidth than LEDs

Table 8. Optimal optopairs of radiation source and detector for CO<sub>2</sub> detection (4.2 μm) [87].

Optopair	Time constant (s)	Relative limit of detection
Thermal + thermopile	0.1	160
Thermal + pyrodetector	0.1	50–160
Thermal + photodiode	0.1	1
LED + thermopile	0.01	100
LED + pyrodetector	0.1	100
LED + photodiode	10 <sup>-8</sup>	0.5 × 10 <sup>-3</sup>

# Capteurs NDIR (non-dispersive infrared) commerciaux

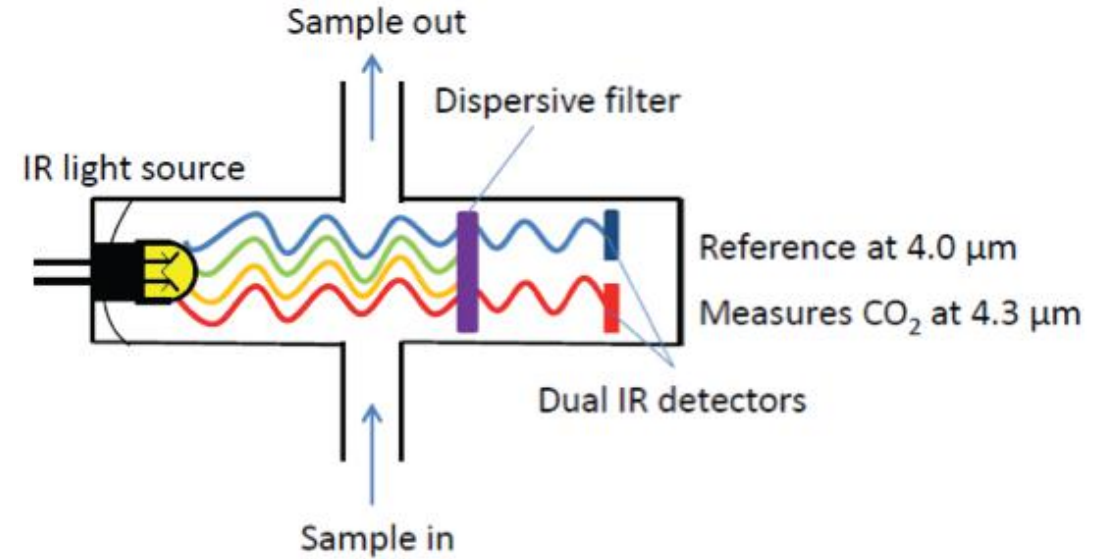
Simple canal - simple capteur



Ex: amphenol T6613, CozIR,...

-> limites : étalonnage régulier nécessaire.  
typ. 400ppm, souvent automatique!

Simple canal - double capteur

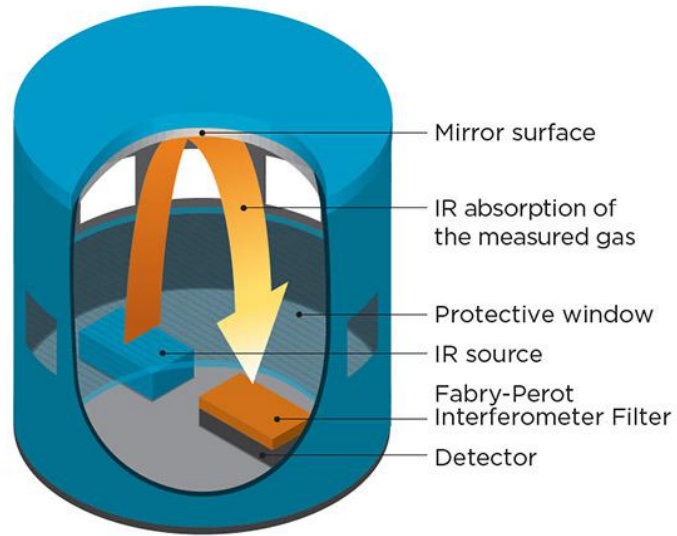


Ex: amphenol T6615,  
SGX INIR, Figaro CDM7162, Sensirion SCD30, ...  
-> dérive limitée

- La justesse de mesure est de  $\pm 3$  à 70ppm +pourcentage. (prix : 50-2000€)
- Effets de l'humidité, de la pression et de la température sur l'absorption spectroscopique, d'où la nécessité d'un double canal ou d'un étalonnage régulier.
- Consommation d'énergie  $\sim 100\text{mA}$  pour les sources IR à filament (nécessité d'une mise hors tension périodique pour l'enregistrement à long terme)



# Capteur NDIR à filtre MEMS (FPI) + chambre chauffée : Vaisala CarboCAP (ex: GMP343)



Simple canal - double capteur

Très précis:

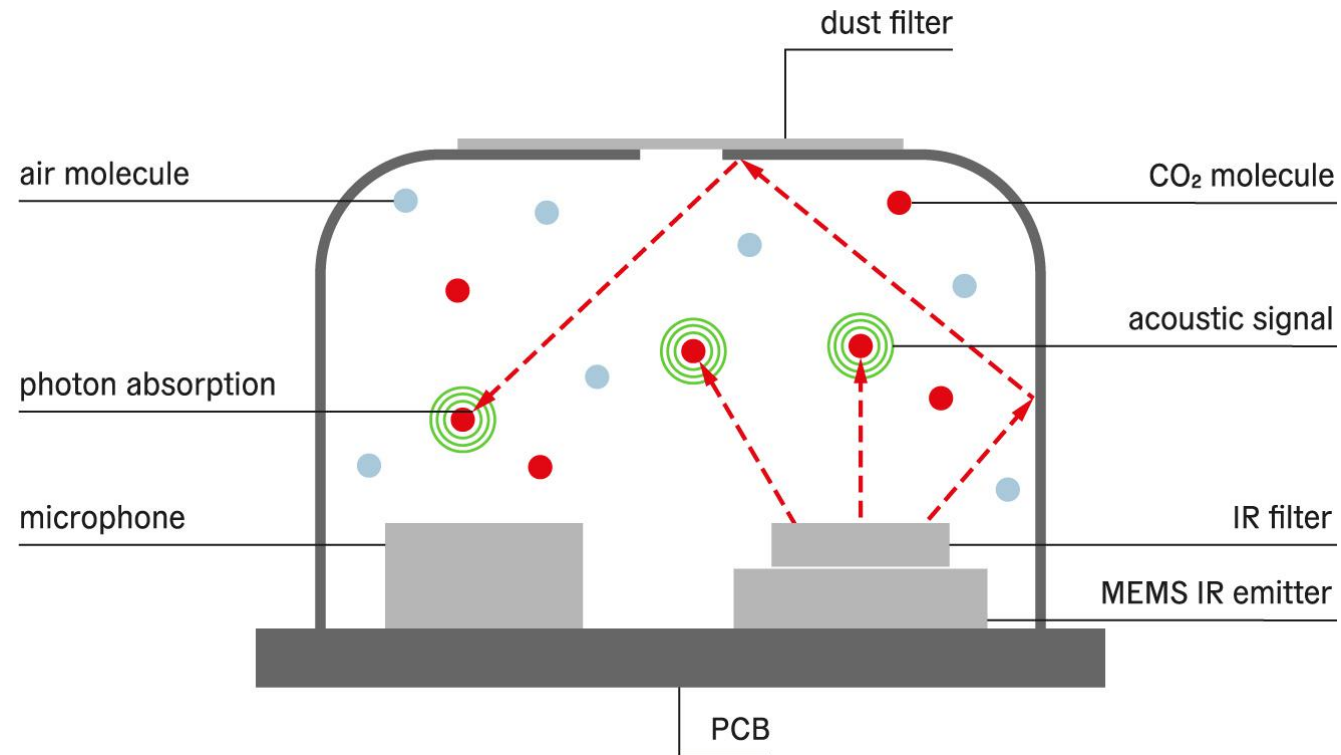
+/-3ppm + 1% de la mesure entre 0 et 1000ppm

+/-5ppm + 2% de la mesure entre 1000 et 20000ppm

Consommation : 1 - 3.5W! (chauffage des optiques)



# Capteur photo-acoustiques commerciaux



Capteurs récents:

- source IR basse consommation (LED ou MEMS) -> émission IR ciblée moins gênée par l'absorption des molécules d'eau
- plus de « line of sight » nécessaire entre l'émetteur IR et le récepteur □ plus robuste en grotte?
- Dérive du microphone apparemment plus faible que capteur optique
- Coût <50€

# Capteurs photo-acoustiques commerciaux

Sensirion SCD41



## Features

- Photoacoustic NDIR sensor technology PASens®
- Smallest form factor: 10.1 x 10.1 x 6.5 mm<sup>3</sup>
- Reflow solderable for cost effective assembly
- Large output range: 0 ppm – 40'000 ppm
- Large supply voltage range: 2.4 – 5.5 V
  
- High accuracy:  $\pm(40 \text{ ppm} + 5 \%)$
- Digital I<sup>2</sup>C interface
- Integrated temperature and humidity sensor
- Low power operation down to < 0.4 mA avg.  
@ 5 V, 1 meas. / 5 minutes

0-100% RH

Infineon PASCO2

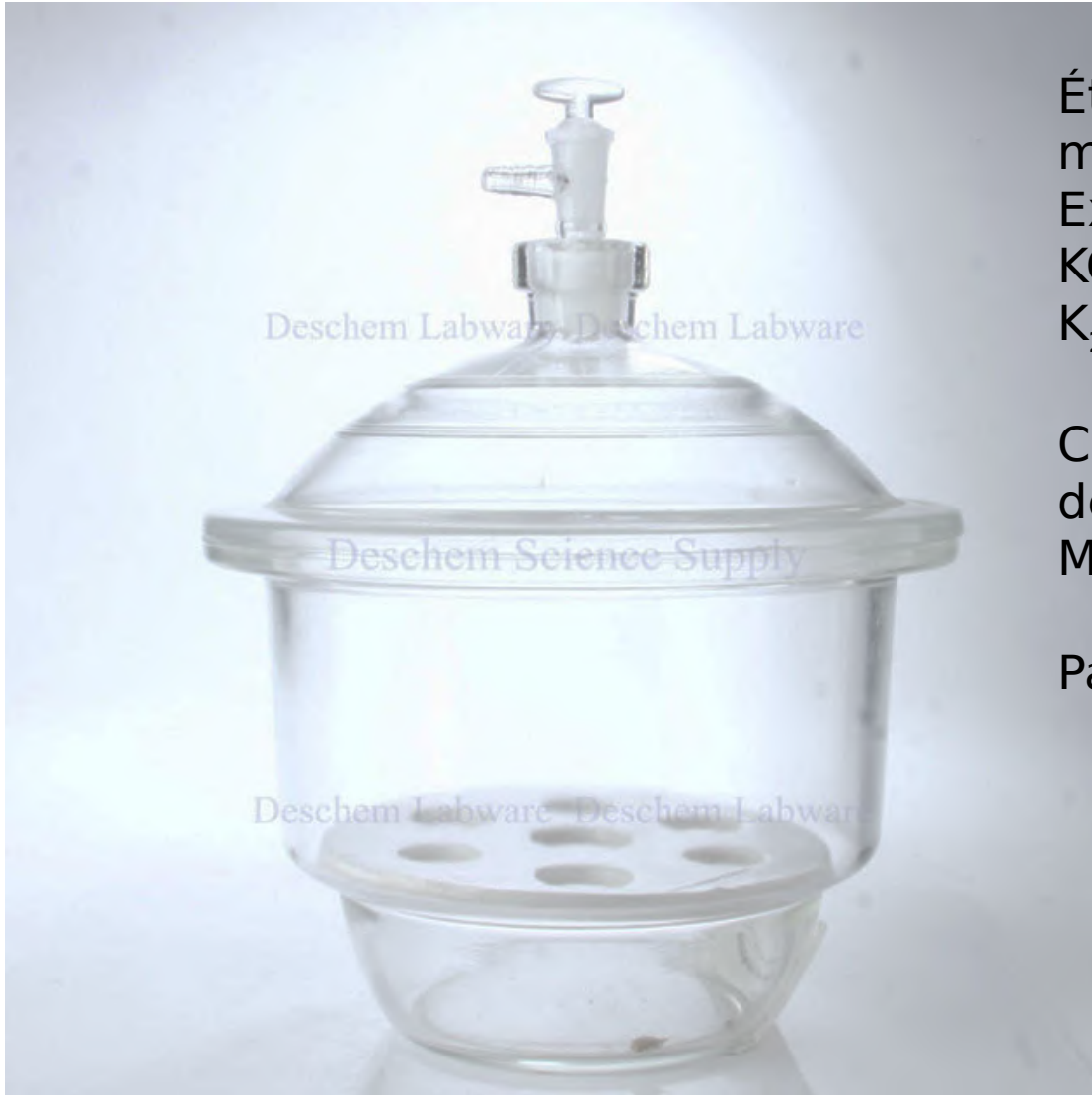


Table 1: Key specifications of the PAS CO2 sensor

Operation range	400 ppm to 10,000 ppm
Accuracy	$\pm 30 \text{ ppm} + 3\%$ of reading between 400 ppm and 5,000 ppm
Lifetime	10 years at 1 measurement/minute
Operation temperature	0°C to 50°C
Relative humidity	0% to 85% (non-condensing)
Interface and compensation	I <sup>2</sup> C, UART, and PWM
Supply voltage	12.0 V for the emitter and 3.3 V for other components
Average power consumption	11 mW at 1 measurement/minute
Package dimensions	13.8 x 14 x 7.5 mm

~2mW 1 mesure / 5 min

## Capteurs NDIR vs humidité vs bactéries (labo)



Essais en conditions contrôlées :

Étalonnage propre à l'aide de solutions salines pour maintenir une %RH constant :

Ex : NaCl -> 75% HR @10°C

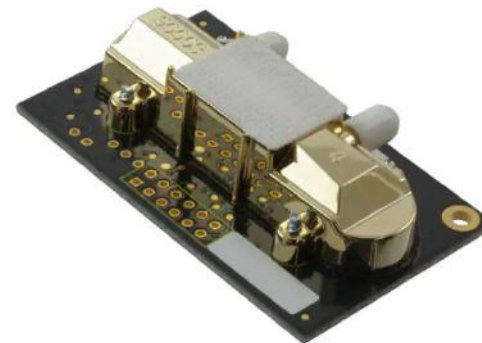
KCl -> 87% @10°C

K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> -> 98% RH @10°C

Caractériser l'effet de l'humidité relative sur le capteur: décalage de la mesure, hystérésis et linéarité

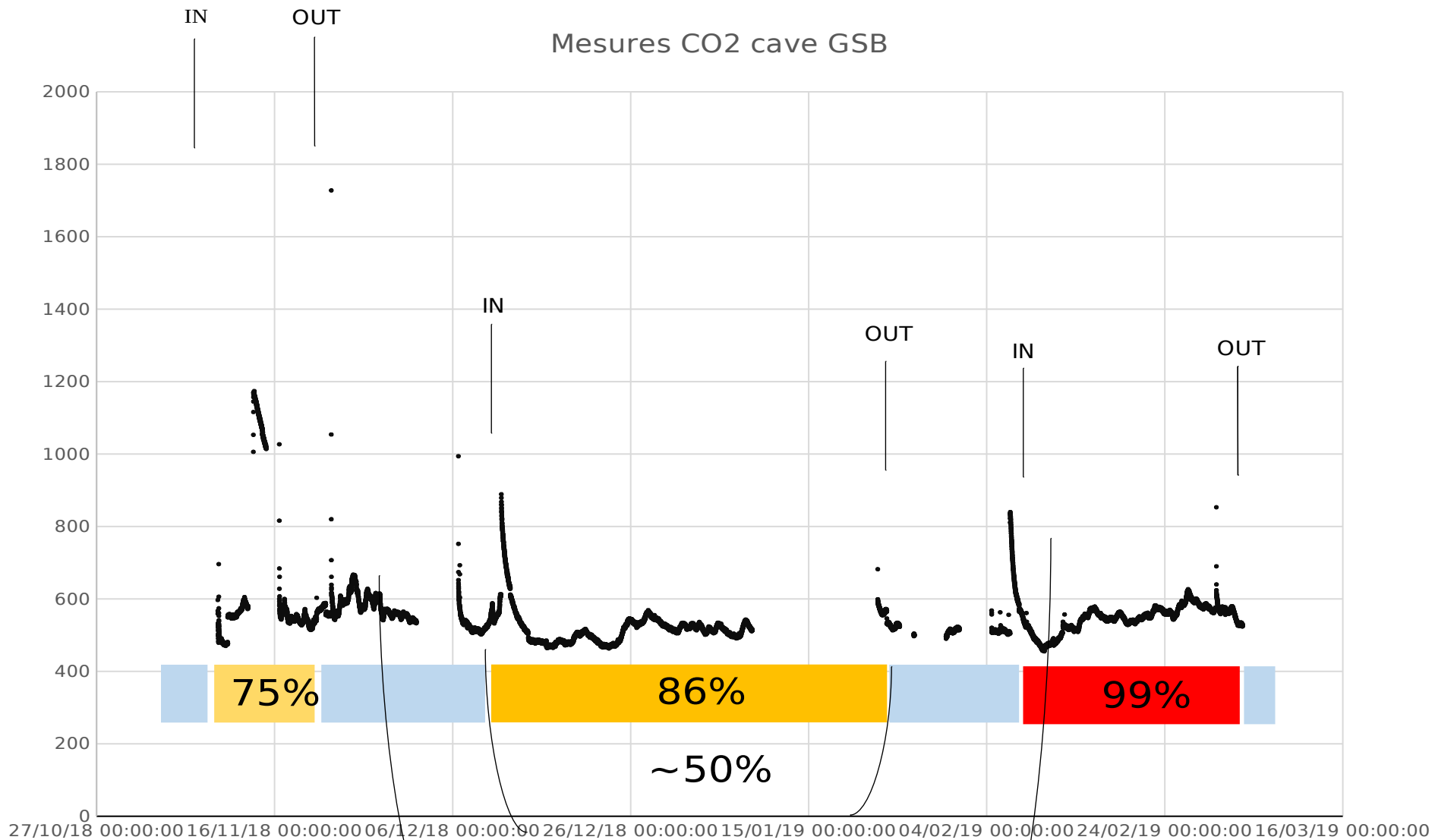
Mesures de contrôle du CO<sub>2</sub> à l'aide d'une pompe à vide

Pas de simulation de la condensation!



Amphenol T6615

# Capteurs NDIR vs humidité vs bactéries (labo)



# Capteurs NDIR vs humidité vs bactéries (grotte)

Station « Lithobius »

Logger polyvalent :

- Basé sur un Arduino basse consommation (Uno et Méga)
- communication avec capteurs série, I<sup>2</sup>C, SPI
- Stockage sur microSD
- Envoi des données par GPRS ou 4G
- Batterie : 2 x Li-ion 18650 (7.4v)
- RTC DS3231 (+-2ppm)
- Consommation en veille : 4-8  $\mu$ A

Open-source:

<https://github.com/Niphargusproject/lithobius>

Développement en grotte (2017-2019)

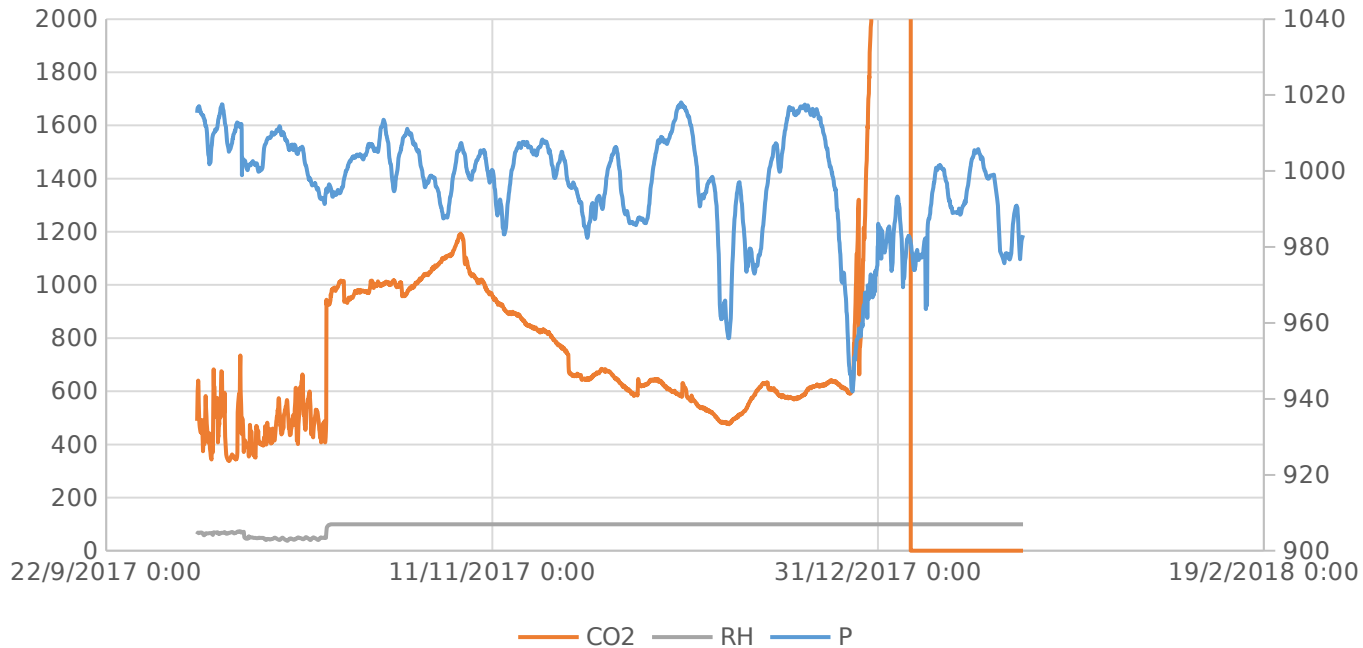
Sur le terrain (15 capteurs) depuis janvier 2021.



# Capteurs NDIR vs humidité vs bactéries (grotte)

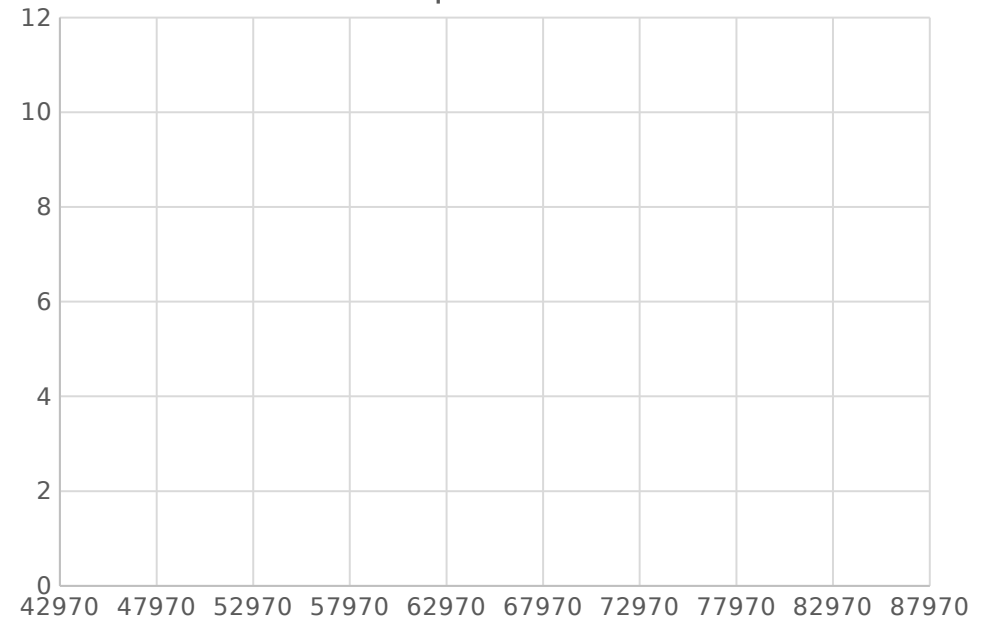
Tests dans les grottes de han-Sur-Lesse et de Bruniquel

Relevés Grandes Fontaines - Han sur lesse 20 oct 2017 - 18 jan 2017

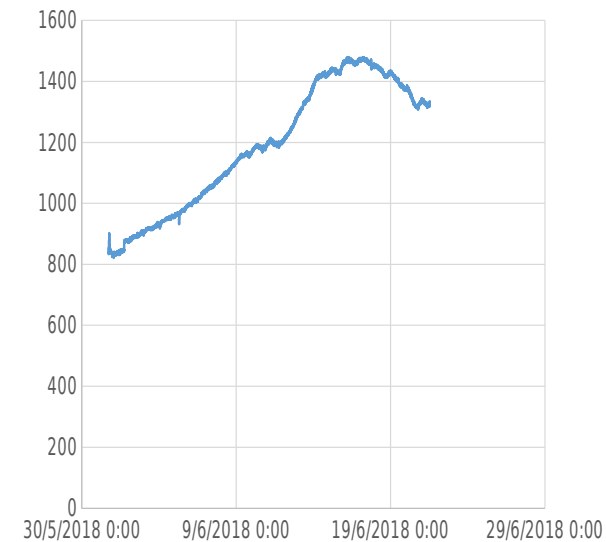


- Condensation accumulée dans le capteur (éteint entre les mesures)
- Voile bactérien développé dans la chambre (après plusieurs mois)
- 3 ans de mesure à Bruniquel □ 3 ans de perdus!

Bruniquel 08 2107

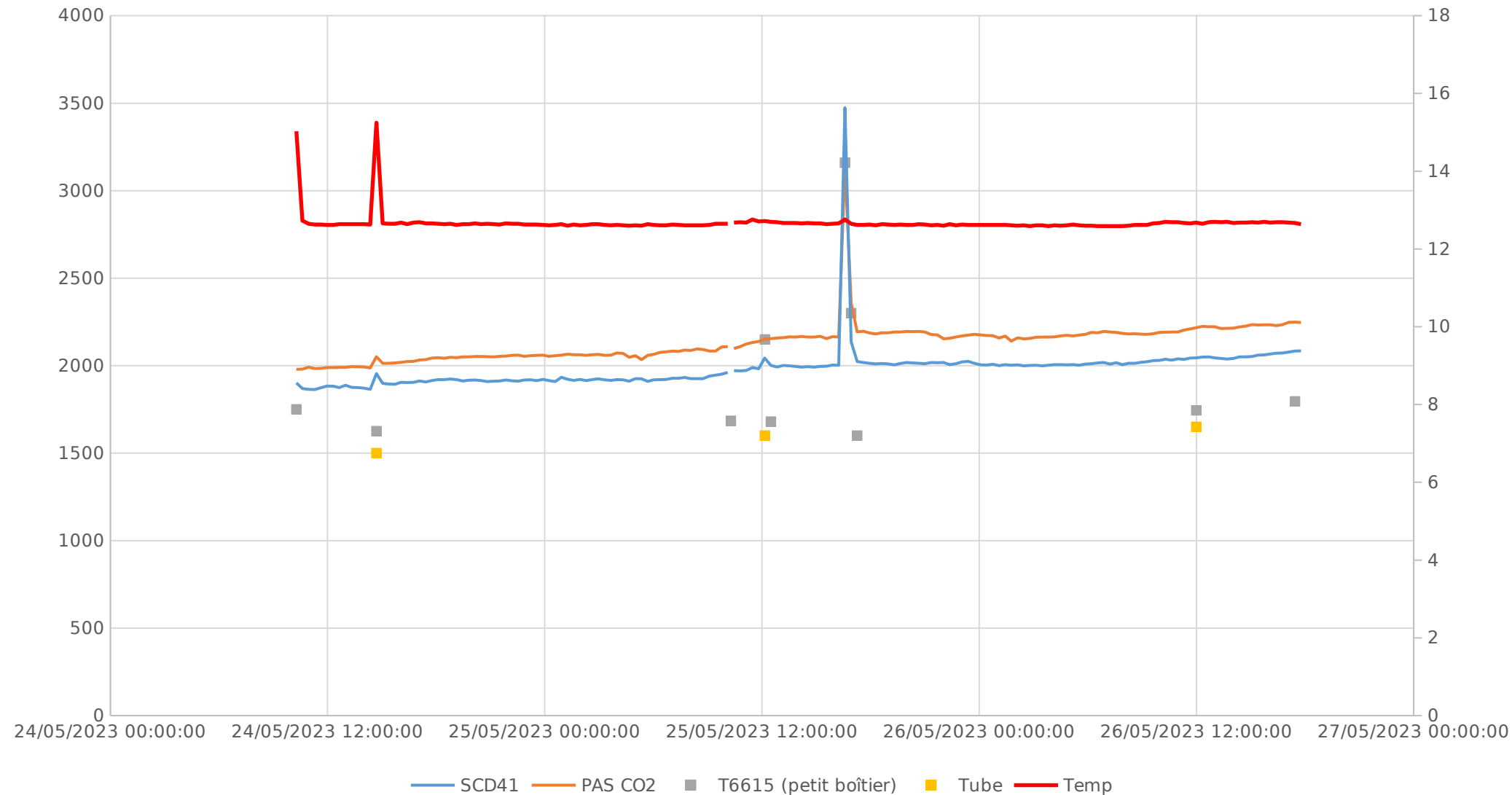


Relevés Grande Fontaines - Han sur lesse 30 mai - 22 juin 2018



# Premiers test capteurs photo-acoustiques en grotte

Relevés Bruniquel 24-27 mai 2023



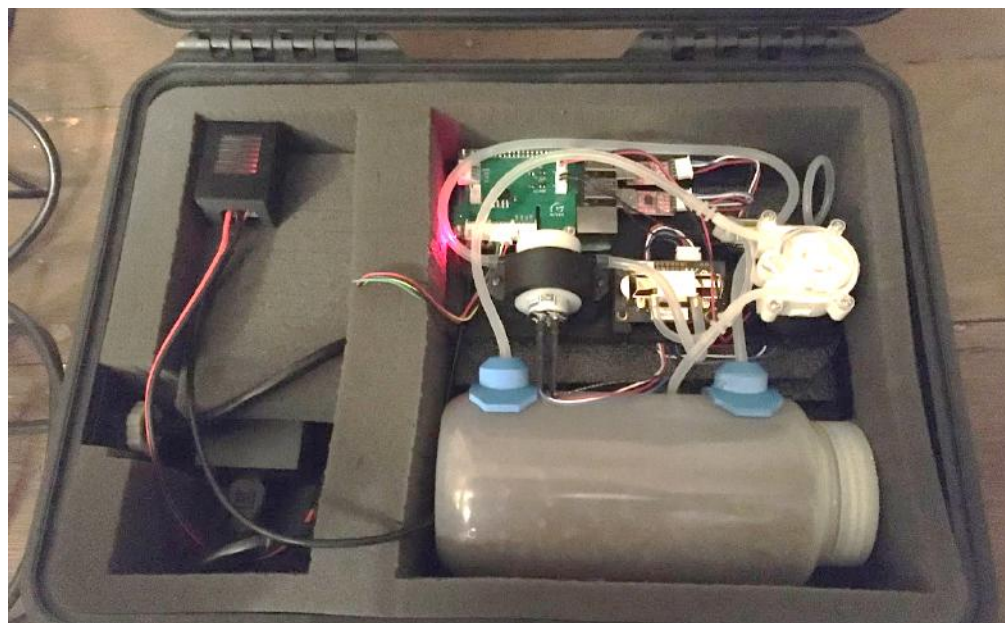
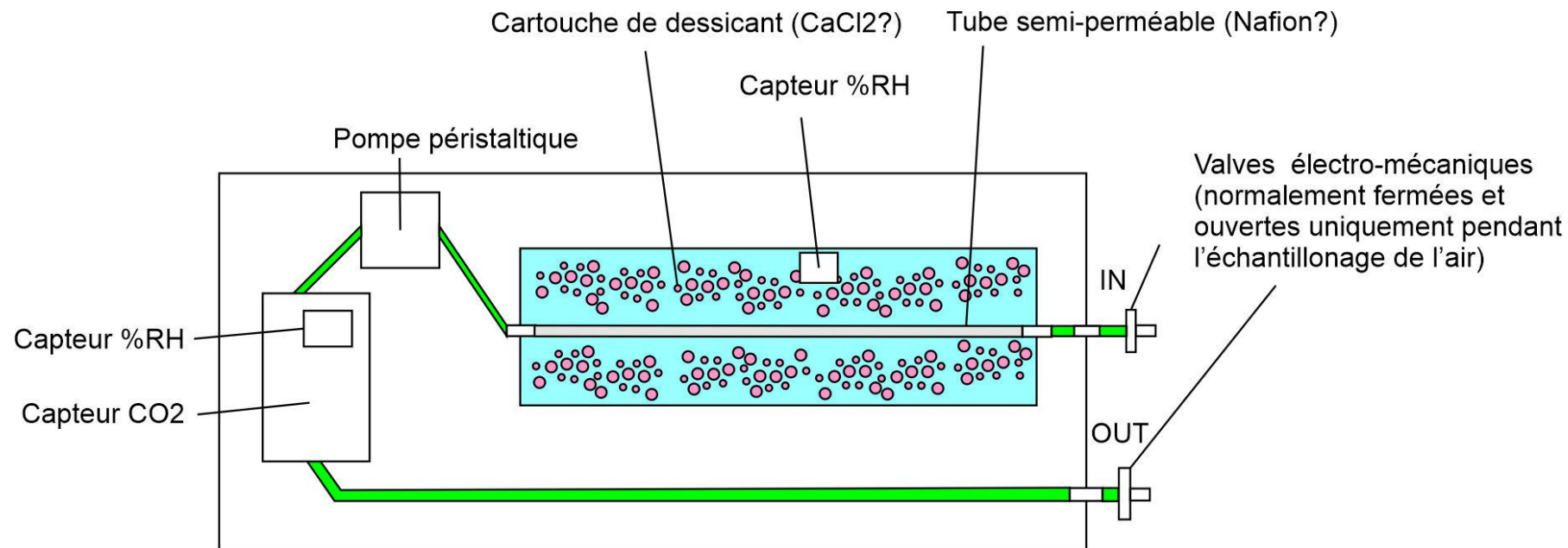


# Projet Biorecs : mesures CO<sub>2</sub> dans les sols sur une longue période

+1.5 an de mesures pour surveiller les concentrations de CO<sub>2</sub> dans le sol (Jun 2021 - Jan 2023)  
dans 30 "mésocosmes" dans des conditions contrôlées :  
Influence des processus d'altération des roches (Enhanced Rock Weathering)  
pour la capture du CO<sub>2</sub> dans les sols.influence



# Projet Biorecs : mesures CO<sub>2</sub> dans les sols sur une longue période



Calibration des capteurs CO<sub>2</sub> (T6615 et SGX INIR) avec Vaisala

-> pas de dérive constatée après 18 mois de mesures (5min)

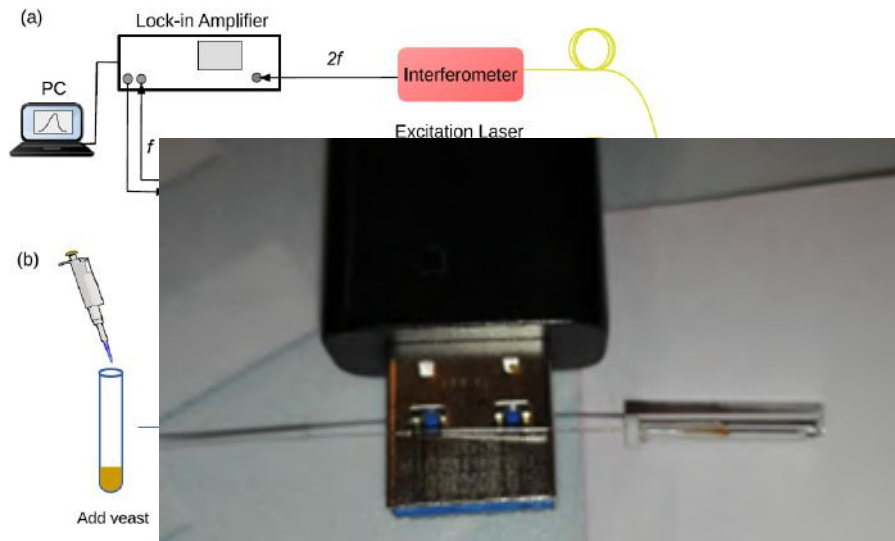
-> alimentation continue!

# Perspectives

- Station lithobius + capteur photoacoustiques (?) + système de biorecs
- > test longue durée à Han-Sur-Lesse avec contrôles CO2 manuel réguliers

Quand ??

- Fiche comparative MSK (SV)
- Veille technologique:



Sensor	Colorimetric	NDIR-K30 FR	NDIR-GM10 - (CARBO CAP technology)	NDIR-TS6613	NDIR-TSS6615	Figaro CDM 7162 -- T6615	NDIR-SCD30	PAS-Infineon
Manufacturer	Dräger	Senseair	Vaisala				Sensirion	Infineon
L*W*D (mm)	10*5*5	51*57*14	??				35*23*7	13.8*14*7.5
Measurement range ppm	100a : 100-3000	0-5000	??				0-40000 (I2C,UART) 0-5000(PWM)	400-10000
Accuracy	0.1% : 5000-60000 ±10-15% (100a) ±5-10% (0.1%)	±30ppm ±3% of reading	??				±(30 ppm + 3%)	30ppm+3% (400-5000ppm)
Response time	30 s - ~4 minutes	2 seconds @ 0.5 l/min tube gas flow	10 minutes				8 s	
Operating Voltage	NA	4.5-14VDC	??				3.3-5.5V	12V-3.3V
disadvantage	Point measurement							
Advantage	Simple - no electronics		Stability of 15ppm+2% of reading over 5 years				Small drift (50ppm over lifetime)	
cost	low							low

Fiber tip photoacoustic sensor

<https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5082955>