

WP 2.7 Capteurs biogéochimiques

Réseaux de capteurs et préleveurs autonomes pour le monitoring des interactions bactéries-fluides-minéraux

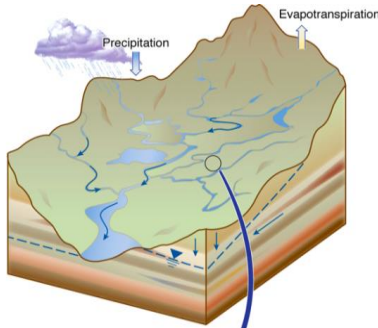
29/04/2022

Terra Forma

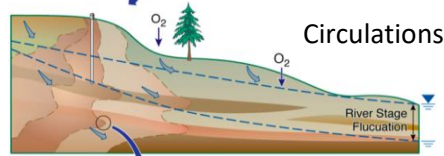


WP 2.7 Biogeochemical sensors

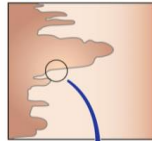
FORMA



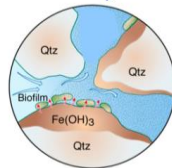
Cycles et flux dans la zone critique



Circulations



Gradients biogéochimiques



Communautés microbiennes,
réactivité

Questions

1. **Hot spots et hot moments** : quel est l'impact des processus hydrologiques et géochimiques (écoulement, transport réactif, fluctuations hydrologiques) sur la dynamique et la distribution des micro-organismes ?
2. **Interactions biotique-abiotique** : quel est le rôle des micro-organismes dans l'altération des roches ?
3. **Flux biogéochimiques** : quel est le rôle des micro-organismes dans les flux biogéochimiques entre la surface et le milieu souterrain ?

Tâche 1 Micro-sensors: capteurs in situ O_2 , pCO_2 , H_2 , H_2S , N_2O , NO

Tâche 2 Lab on chip: mesures in situ de nutriments (NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NH_4^+), minéraux dissous (Fe^{2+} , Fe^{3+} , silice), ATP (adenosine triphosphate)

Tâche 3 Biosampler: échantillonnage automatique in situ de micro-organismes

Tâche 4 Biogeophysics: suivi géophysique de l'activité microbologique

WP 2.7 Biogeochemical sensors

FS INFORMATI FS		2022		2023		2024		2025		2026		2027		2028		2029		Labo	Nbre de mois	
Etapas		N		N+1		N+2		N+3		N+4		N+5		N+6		N+7				
		S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2			
D : déploiement de capteurs existant avec retour d'expérience pour établir un CCTP en accord avec les besoins des communautés	capteurs O2, pCO2, H2, NO2, NO																		GR	8
																			ECO	0
																			LAAS	0
																			IPGP	0
																			METIS	0
I1 : réalisation d'un prototype "artisanal" (fait en labo, qui peut être une version augmentée du capteur existant) pour enrichir le CCTP	lab on chip																		IPR	0
																			GR	10
	échantillonneurs bio																		ECO	4
	sonde biogéophysique																		LAAS	6
																			IPGP	7
I2 : test TEST_0 in-situ et labo pour le prototype																			METIS	2
																			IPR	2
	lab on chip																		GR	9
	échantillonn																		ECO	3
	biogéophys																		LAAS	0
I3 : étude de la réalisation du prototype via un AAP et sélection de l'entreprise																			IPGP	5
																			METIS	2
																			IPR	0
	lab on chip																		GR	6
	échantillonn																		ECO	2
I4 : réalisation d'un prototype conformes aux normes par l'entreprise (également appelé phase de prototypage)	biogéophys																		LAAS	1
																			IPGP	4
																			METIS	1
																			IPR	1
																			GR	2.5
I5 : test TEST_1 in situ pour valider les recettes par les partenaires	échantillonn																		ECO	0.5
	biogéophys																		LAAS	0.5
																			IPGP	1
																			METIS	0.5
																			IPR	0
I6 : duplication après validation	lab on chip																		GR	10
	échantillonn																		ECO	2
	biogéophys																		LAAS	0
																			IPGP	5
																			METIS	2
I7 : co-déploiement opérationnel à partir de cette date																			IPR	0
	lab on chip																		GR	0
	échantillonn																		ECO	0
	biogéophys																		LAAS	0
																			IPGP	0
																		METIS	0	
																		IPR	0	
I7 : co-déploiement opérationnel à partir de cette date	lab on a chip																		GR	8
	échantillonneurs																		ECO	4
	sondes biogéophys																		LAAS	0
																			IPGP	6
																			METIS	2
																		IPR	0	

Planning et implications des personnels permanents prévus dans le projet

Tanguy Le Borgne	CNAP	UNIV RENNES 1	GR	Hydrogéologie et transport réactif
Camille Bouchez	CNAP	UNIV RENNES 1	GR	Hydrogéologie et biogéochimie
Nicolas Lavenant	IE	CNRS	GR	développements capteurs
Francesco Gomez	IE	CNRS	GR	développements capteurs
Thierry Labasque	IR	CNRS	GR	capteurs chimiques
Eliot Chatton	IR	CNRS	GR	capteurs chimiques
Luc Aquilina	PR	UNIV RENNES 1	GR	Géochimie
Florence Nicollin	Mcf	UNIV RENNES 1	GR	Géophysique
Vincent Raimbault	CR	CNRS	LAAS	Microfluidique
Damien Jougnot	CR	CNRS	METIS	Biogéophysique
Alexis Dufresne	CR	CNRS	ECO	Microbiologie environnementale
Alexandrine Pannard	MCF	UNIV RENNES 1	ECO	Microbiologie environnementale
Bénédicte Menez	PR	UNIV PARIS DIDEROT	IPGP	Géomicrobiologie
Emmanuel Gerard	IR	INST PHYSIQUE DU GLOBE DE PARIS	IPGP	Géomicrobiologie
Céline Pisapia	MCF	UNIV PARIS DIDEROT	IPGP	Géomicrobiologie
Hélène Bouquerel	IE	INST PHYSIQUE DU GLOBE DE PARIS	IPGP	Géomicrobiologie
Hervé Tabuteau (IPR)	CR	CNRS	IPR	Microfluidique



WP2.7 Micro-sensors

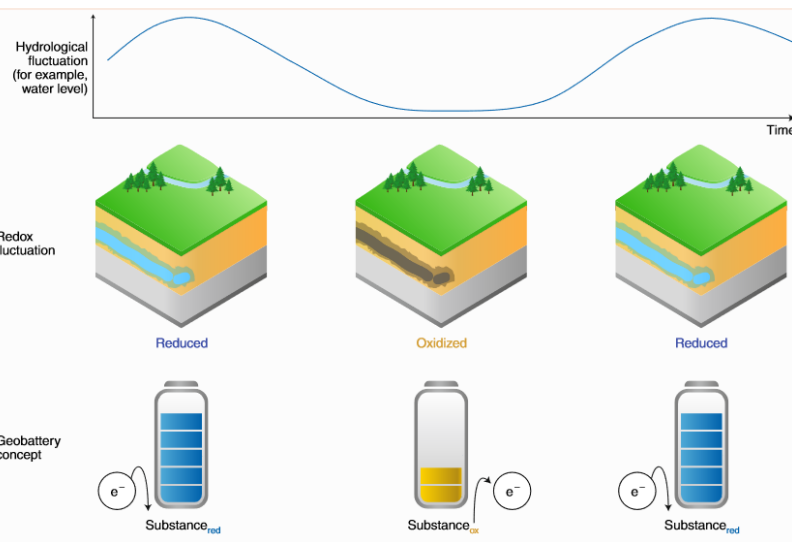
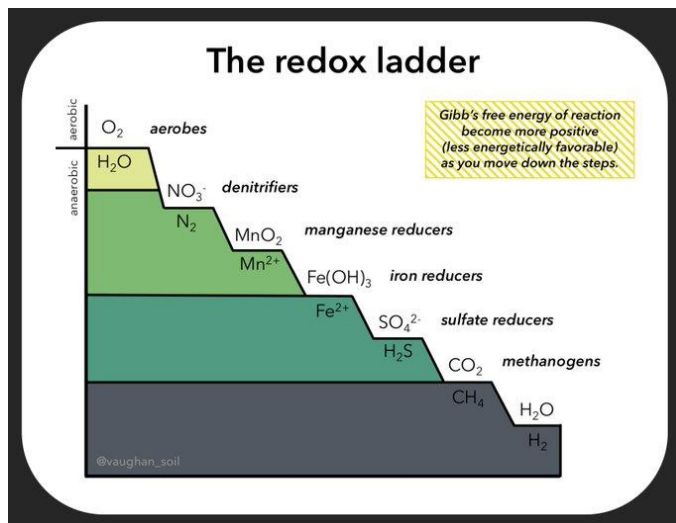
O₂, pCO₂, H₂, H₂S, N₂O, NO

WP 2.7 Biogeochemical sensors – micro-sensors

Coordination: C. Bouchez, E. Chatton

FORMA

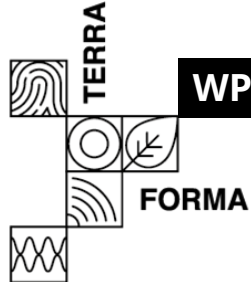
Objectif : Suivi haute fréquence de paramètres biogéochimiques (O_2 , pCO_2 , H_2 , H_2S , N_2O , NO) – réactions redox !



Peiffer et al., Nat. Geo. (2021)

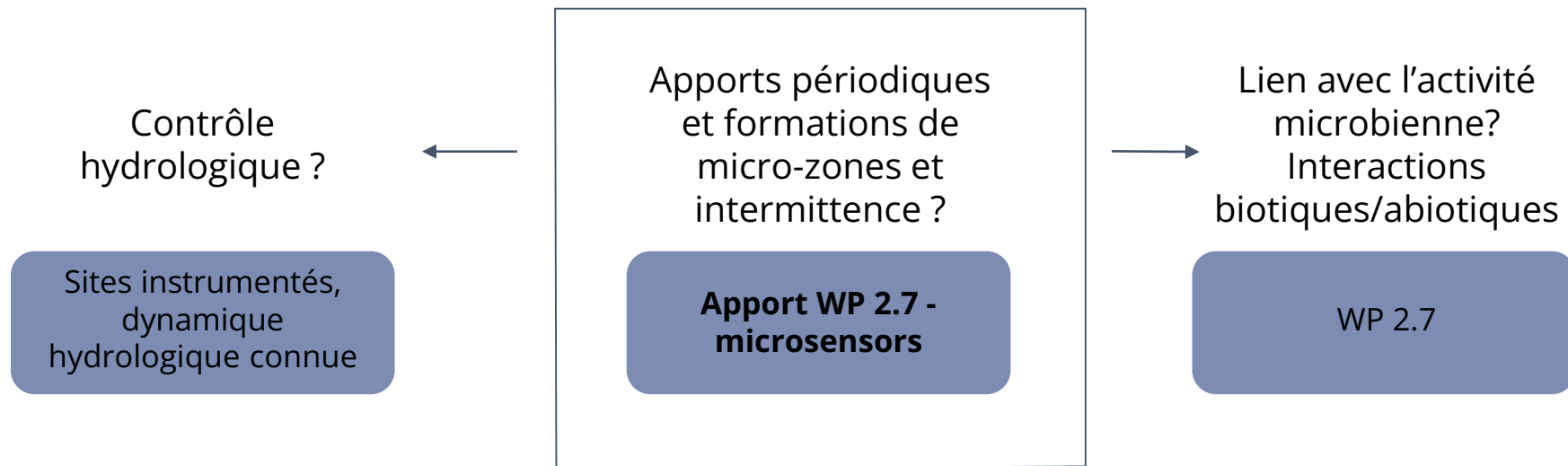
Questions scientifiques :

- Cycles biogéochimiques à haute fréquence?
- Distribution spatiale et intermittence des donneurs et accepteurs d'électrons?
- Rôle sur la dynamique microbienne et les interactions eaux/roches (altération) ?



WP 2.7 Biogeochemical sensors – **micro-sensors**

Positionnement par rapport à l'état de l'art et résultats attendus





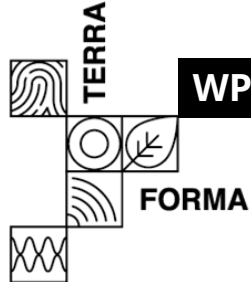
WP 2.7 Biogeochemical sensors – **micro-sensors**

Défis techniques et choix envisagés

- Gammes de mesure :
 - milieu souterrain : gammes basses pour l'O₂ mais gammes hautes pour le CO₂
 - milieu de surface : gammes hautes pour l'O₂ mais gammes basses pour le CO₂
- Intégration des capteurs dans forages et environnement « agressifs » :
 - dimension, résistance pression, corrosion
- Temps de réponse des capteurs

Se tourner au maximum vers des **solutions commerciales** et **co-développement** de capteurs adaptés si besoin

Interface d'extraction commune ?



WP 2.7 Biogeochemical sensors – micro-sensors

Description des capteurs

Capteurs entre 2 000 et 10 000 euros

O₂

Unisense

New



pH O₂ T T₀

Flexible-Analyte Deep Sea Logger
AquapHOx[®]-LX

- Item nr.: APHOX-LX
- Broad range of O₂, pH & temp. sensors
- Operation up to 4000 m depth
- Stand-alone logging up to >1 year
- Integrated fast temperature sensor

[Get a quote](#)

CO₂



EZO-CO2™ Embedded Carbon Dioxide Sensor

#EZO-CO2



Pyroscience

PRODUCTS

SENSORS AND ELECTRODES

- » O₂ Microsensor
- » O₂ MicroOptode
- » H₂S Microsensor
- » H₂ Microsensor
- » N₂O Microsensor
- » NO Microsensor
- » pH Microelectrode
- » Redox Microelectrode
- » Reference Electrode
- » Temperature Sensor
- » Specialized sensors
- » Customization

MICROOPTODE



MicroOptode in retractable needle. Available with 430µm or 50µm optical fiber



TERRA

WP 2.7 Biogeochemical sensors – **micro-sensors**

Planning envisagé et besoins en personnel

FORMA

Stage de M1 : état de l'art des capteurs

Quelles solutions existent? Quels avantages? Quels inconvénients? Quelles améliorations possibles?
Quel développement nécessaire?

Besoin de personnel achat et installation capteurs

Besoin de personnel gestion des données acquises
Base de données? Serveurs?

Avant l'été

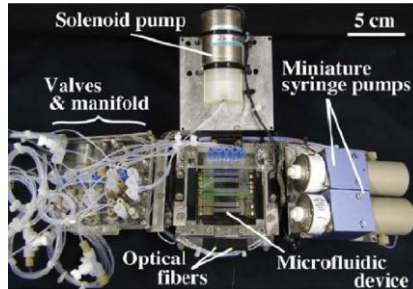
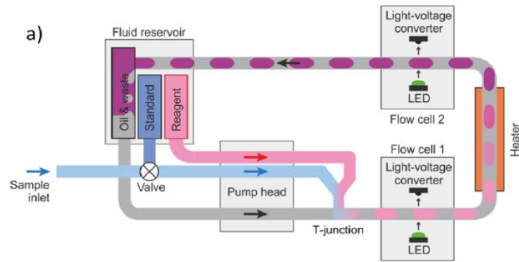
Etat de l'art capteur

2022-2024

Achats et
installations

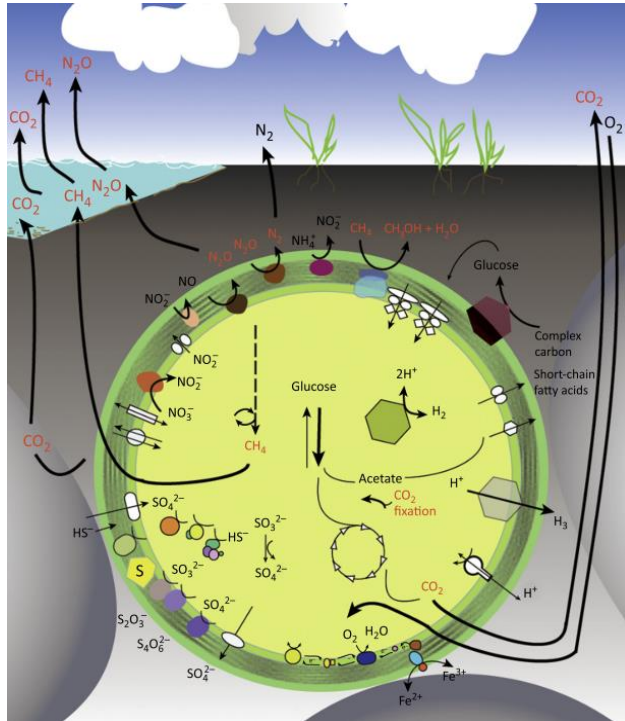
2022-2025

Gestion des données



WP2.7 Lab on Chip

Nutriments, composés inorganiques, ATP



Développer des capteurs in situ permettant la mesure à haute fréquence:

- des concentrations en accepteurs et donneurs d'électrons: nutriments (NO_3^- , PO_4^{3-} , NH_4^+), composés inorganiques (Fe^{2+} , Fe^{3+} , SiO_2 , H_2) et organiques (CH_4)
- de l'ATP, comme proxy de l'activité microbienne



WP 2.7 Biogeochemical sensors – lab on chip

FORMA



Lab on a Chip

PAPER

[View Article Online](#)
[View Journal](#) | [View Issue](#)



Cite this: *Lab Chip*, 2018, 18, 1884

Highly integrated autonomous lab-on-a-chip device for on-line and *in situ* determination of environmental chemical parameters

Cynthia Martinez-Cisneros,^{1a,b} Zaira da Rocha,^c Antonio Seabra,^{1b} Francisco Valdés,^{1d} and Julián Alonso-Chamarro^{1d}

Trends in Analytical Chemistry 95 (2017) 62–68



ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Trends in Analytical Chemistry

journal homepage: www.elsevier.com/locate/trac



Microfluidic lab-on-a-chip platforms for environmental monitoring

Roberto Pol^a, Francisco Céspedes^a, David Gabriel^b, Mireia Baeza^{a,*}

^a Department of Chemistry, Faculty of Science, Edifici C-Nord, Universitat Autònoma de Barcelona, Carrer dels Til·lers, 08193 Bellaterra (Cerdanyola del Vallès), Barcelona, Spain

^b GENOCOV Research Group, Department of Chemical, Biological and Environmental Engineering, School of Engineering, Universitat Autònoma de Barcelona, Carrer de les Sílves, 08193 Bellaterra (Cerdanyola del Vallès), Barcelona, Spain



Positionnement par rapport à l'état de l'art et résultats attendus



A Droplet Microfluidic-Based Sensor for Simultaneous in Situ Monitoring of Nitrate and Nitrite in Natural Waters

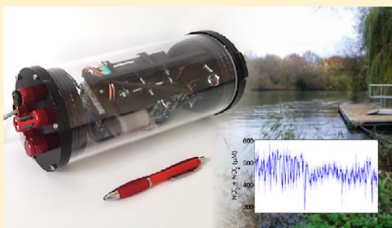
Adrian M. Nightingale,[†] Sammer-ul Hassan,[†] Brett M. Warren,[‡] Kyriacos Makris,[‡] Gareth W. H. Evans,[†] Evanthia Papadopoulou,[‡] Sharon Coleman,^{†,‡} and Xize Niu^{*,†,‡}

[†]Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Southampton, Southampton, SO17 1BJ, United Kingdom

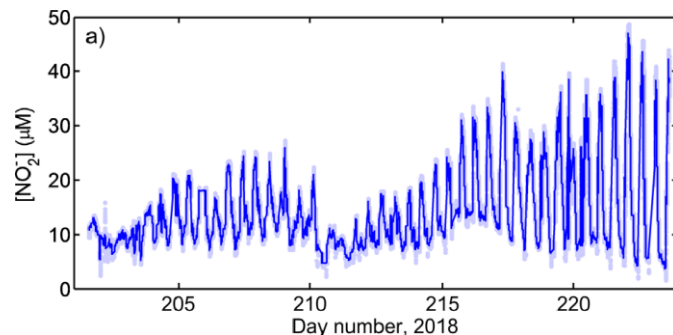
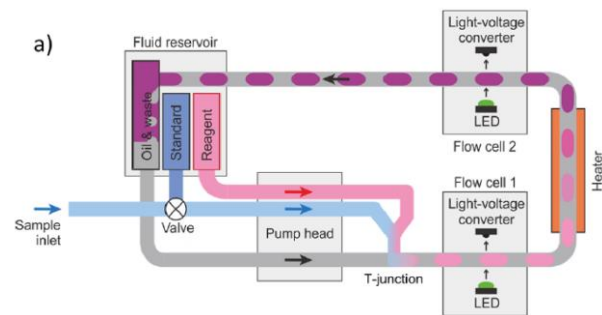
[‡]SouthWestSensor Ltd, Enterprise House, Ocean Village, Southampton, SO14 3XB, United Kingdom

S Supporting Information

ABSTRACT: Microfluidic-based chemical sensors take laboratory analytical protocols and miniaturize them into field-deployable systems for in situ monitoring of water chemistry. Here, we present a prototype nitrate/nitrite sensor based on droplet microfluidics that in contrast to standard (continuous phase) microfluidic sensors, treats water samples as discrete droplets contained within a flow of oil. The new sensor device can quantify the concentrations of nitrate and nitrite within each droplet and provides high measurement frequency and low fluid consumption. Reagent consumption is at a rate of 2.8 mL/day when measuring every ten seconds, orders of magnitude more efficient than those of the current state-of-the-art sensors. The sensor's capabilities were demonstrated during a three-week deployment in a tidal river. The accurate and high frequency data (6% error relative to spot samples, measuring at 0.1 Hz) elucidated the influence of tidal variation, rain events, diurnal effects, and anthropogenic input on concentrations at the deployment site. This droplet microfluidic-based sensor is suitable for a wide range of applications such as monitoring of rivers, lakes, coastal waters, and industrial effluents.



Positionnement par rapport à l'état de l'art et résultats attendus





ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

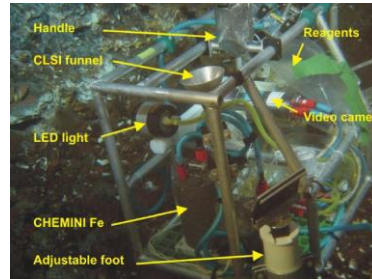
Deep-Sea Research I

journal homepage: www.elsevier.com/locate/dsri

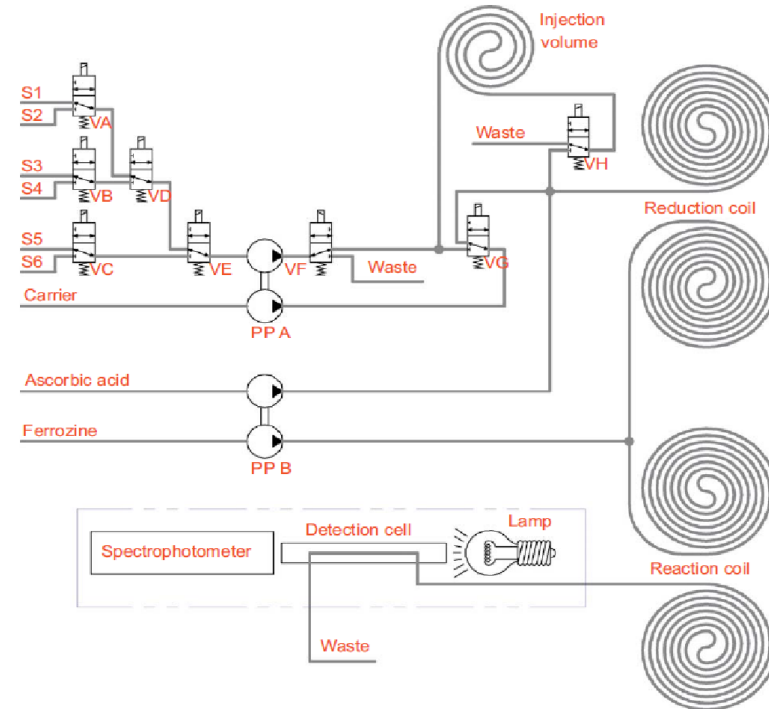
Instruments and Methods

CHEMINI: A new *in situ* CHEMical MINIaturized analyzerR. Vuillemin^{a,1}, D. Le Roux^a, P. Dorval^a, K. Bucas^a, J.P. Sudreau^a, M. Hamon^a,
C. Le Gall^b, P.M. Sarradin^{b,*}^a IFREMER, TSI, centre de Brest, 29280 Plouzané, France^b IFREMER, DEEP, centre de Brest, 29280 Plouzané, France

- analyseur grand fond « Alchimist » dosage du fer et des sulfures et dosage nanomolaire du fer
- analyseur de surface pour le dosage des nitrates
- prototype d'analyseur d'azote ammoniacal par fluorimétrie.
- analyseur ANAIS pour la mesure des nitrates, silicates et phosphates (LEGOS)



Positionnement par rapport à l'état de l'art et résultats attendus



Article

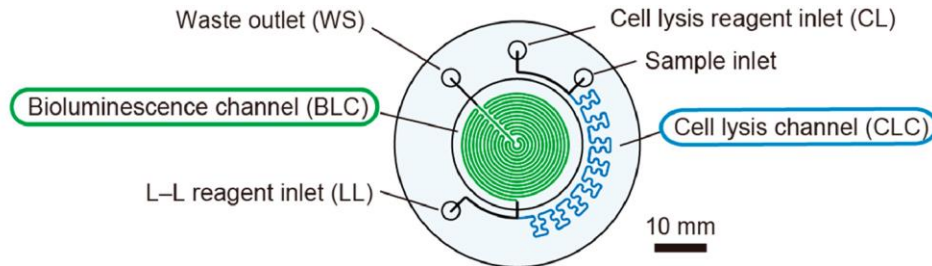
Adenosine Triphosphate Measurement in Deep Sea Using a Microfluidic Device

Tatsuhiro Fukuba ^{1,*}, Takuroh Noguchi ², Kei Okamura ² and Teruo Fujii ³

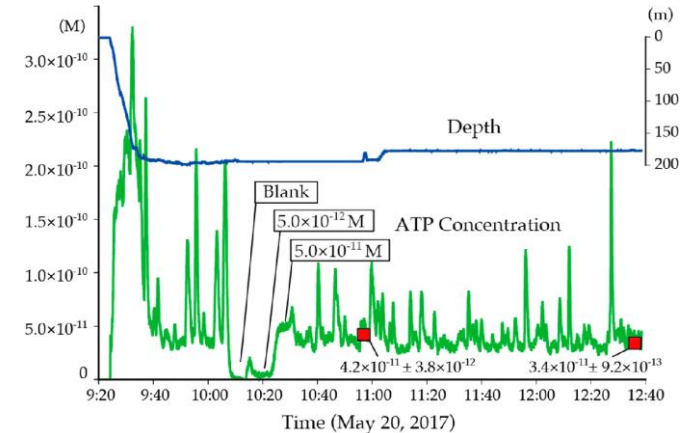
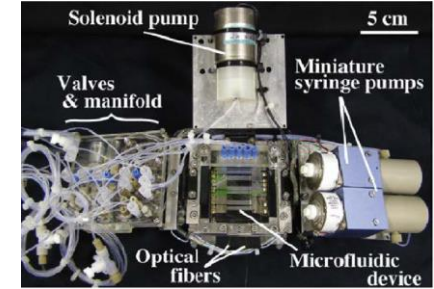
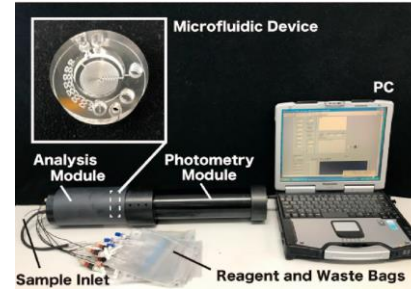
¹ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka, Kanagawa 237-0061, Japan

² Research and Education Faculty, Kochi University, B200 Monobe, Nankoku, Kochi 783-8502, Japan; noguchitk@kochi-u.ac.jp (T.N.); okamurak@kochi-u.ac.jp (K.O.)

³ Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, 153-8505 Tokyo, Japan; tfujii@iis.u-tokyo.ac.jp



Positionnement par rapport à l'état de l'art et résultats attendus



WP 2.7 Biogeochemical sensors – lab on chip

Défis techniques et choix envisagés

Adapter les prototypes conçu pour les observatoires océanique pour les milieux continentaux: taille, stockage fluides, électronique, énergie

- **Droplet microfluidic sensor** (Southwest sensor): nitrate et nitrite
- **Chemini**: ammonium, nitrate, silicate, phosphate, Fe(II), Fe(II+III), total sulphide ($H_2S+HS+S_2$), limites de détection 0.3 and 0.1 mM iron/sulphide.
- **ATP sensor**: ATP



Des Projets CHEMINI Equipe CHEMINI

Equipe CHEMINI



Agathe LAËS-HUON
(Chercheuse en chimie marine)

agathe.laets@ifremer.fr

[En savoir plus](#)



Romain DAVY
romain.davy@ifremer.fr

[En savoir plus](#)

Partager

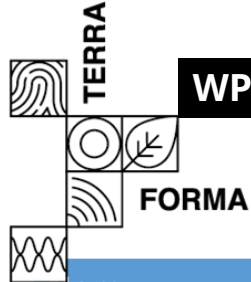


Recherche

Rechercher

Avec le soutien du service SIIM.



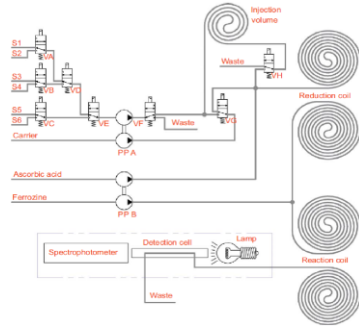


WP 2.7 Biogeochemical sensors – lab on chip

Défis techniques et choix envisagés

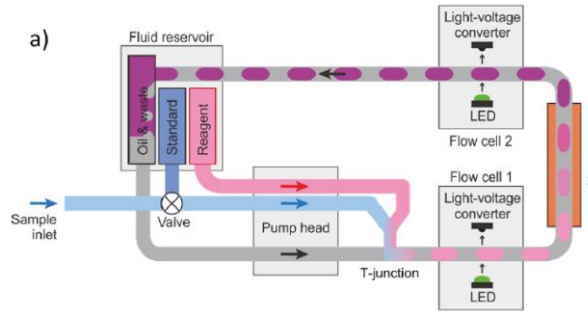
Nom	Technique	Paramètres	Gamme de mesure	Reference
Droplet microfluidic sensor	Colorimétrie (Griess method)	Nitrates, Nitrites	1 - 1000 μM	Nightingale et al. 2015
Chemini grand fond	Spectrophotomètre + mélange Ferrozine/ Ascorbic acid	$\text{Fe}^{II} + \text{Fe}^{III}$, $\text{H}_2\text{S} + \text{HS} + \text{S}_2$	0.1 - 2000 μM	Vuillemin et al. 2009
Chemini cotier	Colorimétrie	Nitrate, Silicate, Ammonium, Phosphate		Thouron D, et al. 2003
ATP sensor	Bioluminescence + mélange luciférase+Mg	ATP	$10^{-5} - 10^{-3}$ μM	Fukuba et al. 2018
		Phosphate	3 μM	Clinton-Bailey et al. 2017
		ammonia	0.8 μM	Cogan et al. 2014

Chemini

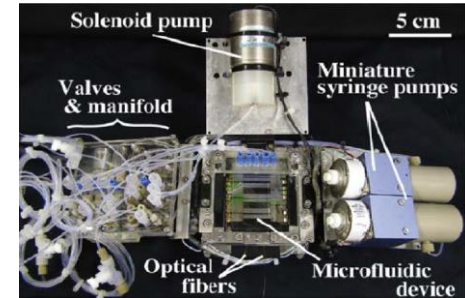


Collaboration à développer avec l'IFREMER

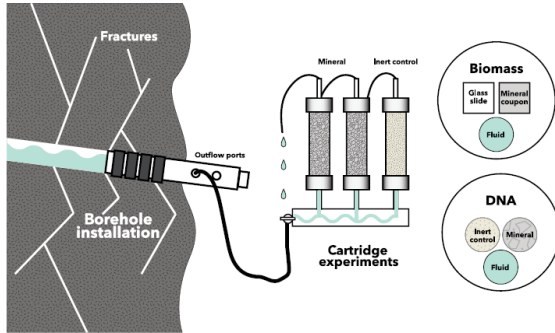
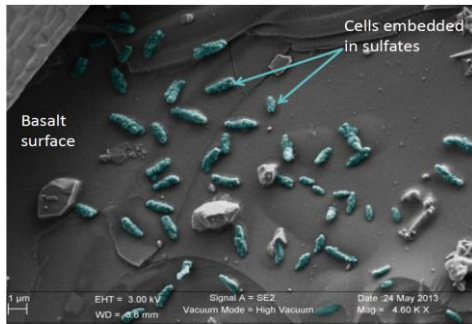
Droplet microfluidic sensor



Collaboration à développer avec SouthWest sensors
Version commerciale disponible

ATP
sensor

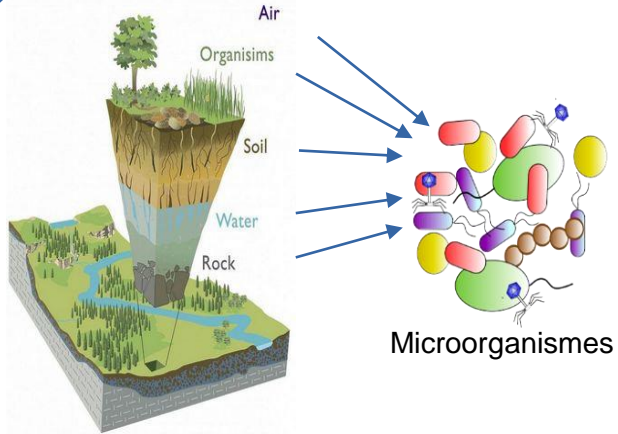
Collaboration à développer avec JAMSTEC



WP2.7 Biosampler

Micro-organismes

Coordination: A. Dufresne, B. Menez

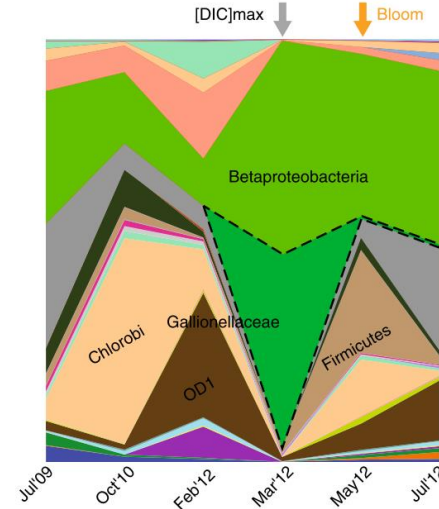


Les micro-organismes au sein de la Zone Critique

- Très abondants (70 Gt C)
- Immense diversité
- Participent à tous les grands cycles biogéochimiques (C, N, S, Fe, etc.)

Caractériser les dynamiques microbiennes pour mieux contraindre la réactivité biogéochimique dans la Zone Critique

- Réponses des microorganismes aux variations environnementales ? Temps de réponse ?
- Rôle des microorganismes dans les processus et les flux ?



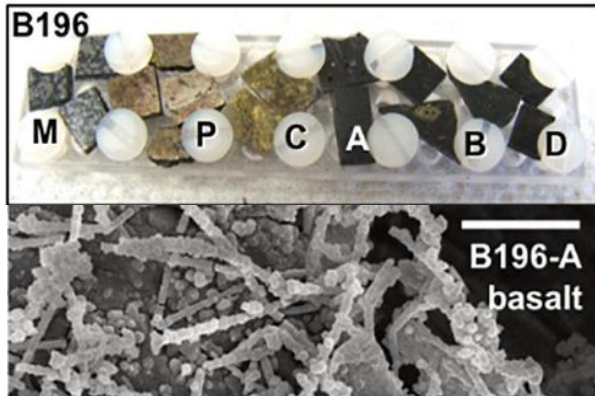
Trias et al., 2017

WP 2.7 Biogeochemical sensors – biosampler

FORMA Challenge majeur :

- Échantillonner les micro-organismes avec des échelles spatiales et temporelles pertinentes par rapport aux dynamiques environnementale / l'hétérogénéité des habitats et temps de vie des « hotspots » microbiens
- Prélèvements dans des environnement peu accessibles (subsurface continentale, croûte océanique)
- Très peu d'applications pour la subsurface continentale

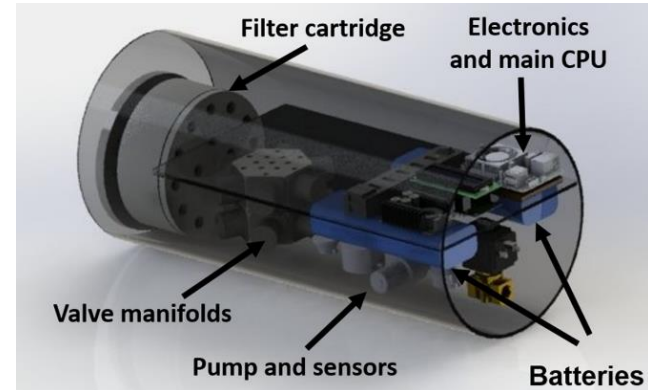
Biosamplers: systèmes passifs, surfaces minérales (rock chips), incubation *in situ*, **micro-organismes attachés** (biofilms)



Ramirez *et al.*, 2019

Positionnement par rapport à l'état de l'art

Smart samplers : systèmes actifs, prélèvements fréquents, filtration, **micro-organismes planctoniques**



Ribeiro *et al.*, 2019



WP 2.7 Biogeochemical sensors – biosampler

Description des capteurs

Biosampler :

- Surfaces minérales centimétriques installées sur des supports inertes
- Minéraux de synthèse ou naturel (lame mince de roche)
- Système de circulation de fluide pour favoriser les interactions entre minéraux et micro-organismes

Smart sampler :

- Prélever de l'eau selon un pas de temps prédéterminé ou en fonction de la mesure d'un paramètre (asservissement à un capteur environnemental)
- Filtrer l'eau pour concentrer les micro-organismes
- Préserver et stocker un grand nombre d'échantillons avant leur récupération



WP 2.7 Biogeochemical sensors – biosampler

Défis techniques

Biosampler :

- Capacité à produire des « rock chips » de manière standardisée et reproductible ?
- Récupération des échantillons sans altération/contamination ?
- Volumes échantillonnés

Smart sampler :

- Alimentation en énergie
- Volume d'eau filtrée assez important pour obtenir une biomasse microbienne suffisante
- Contamination inter échantillons
- Système de préservation des échantillons (chimique ?)
- Système de communication pour le pilotage à distance et/ou l'asservissement à des capteurs environnementaux

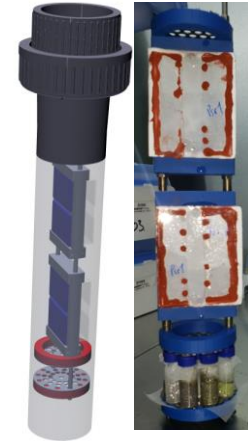


WP 2.7 Biogeochemical sensors – biosampler

Planning, budget

Biosampler :

- Tests en cours à Ploemeur dans le cadre de la thèse Ivan Osario (conception du dispositif avec Nicolas Lavenant et Bastien Wild)
- Autres déploiements en cours (lac Dziani, Mayotte; Grottes karstique, Larzac)

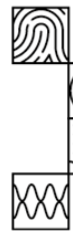


Smart sampler :

- Plusieurs systèmes « open source » potentiellement disponibles (Ribeiro *et al.*, 2019, Nguyen *et al.*, 2020 : eDNA sampler <https://github.com/OPEnSLab-OSU/OPEnS-Lab-Home/wiki/eDNA-Sampler>)
- Nécessite des RH avec des compétences en électronique, fluidique, informatique.
- Planning : 2 ans minimum pour la mise en place d'un premier prototype
- Coût théorique eDNA sampler (24 échantillons) : 5000 \$



eDNA sampler

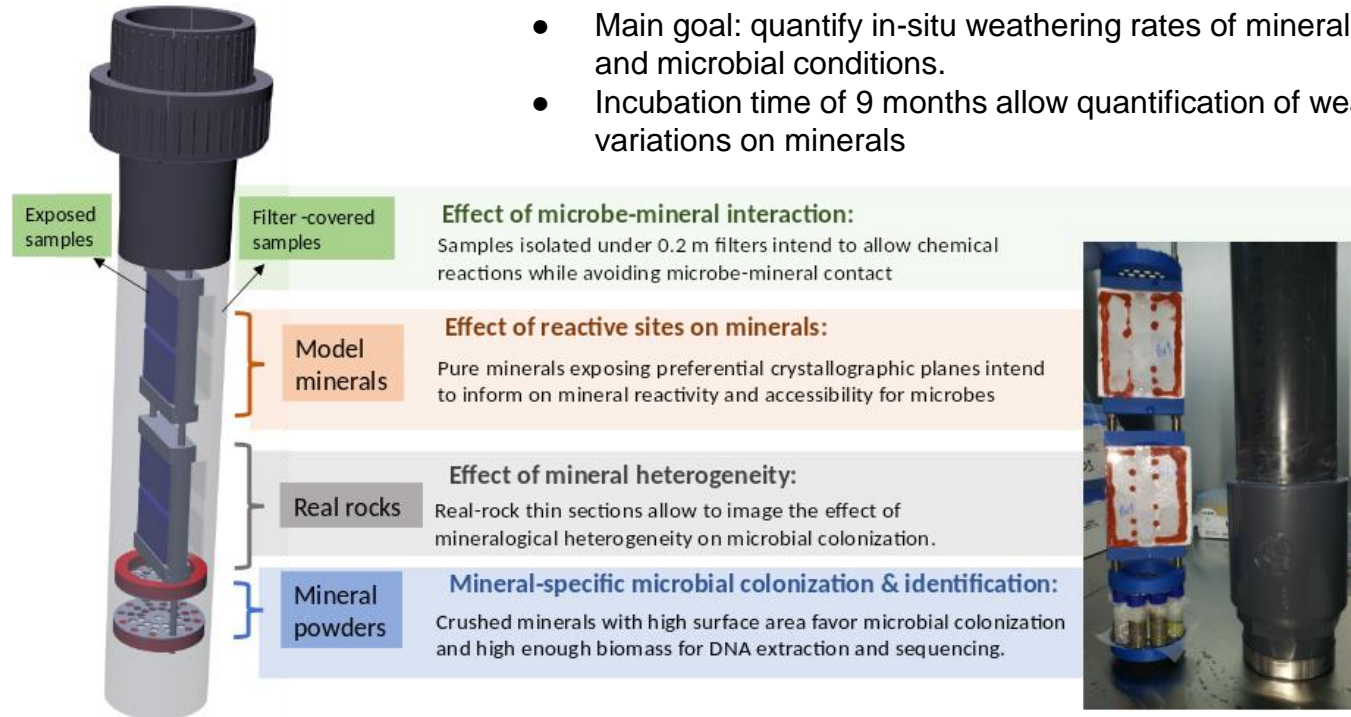


WP 2.7 Biogeochemical sensors – biosampler

Disentangling biogeochemical controls on weathering rates in the critical zone with mineral incubation experiments

Ivan Osorio-Leon, Bastien Wild, Nicolas Lavenant, Camille Bouchez, Tanguy Le Borgne, Julien Farasin, Achim Quaiser, Alexis Dufresne, Bénédicte Menez, Emmanuelle Gérard.

- Main goal: quantify in-situ weathering rates of minerals for contrasted redox, mineral and microbial conditions.
- Incubation time of 9 months allow quantification of weathering rates through topography variations on minerals



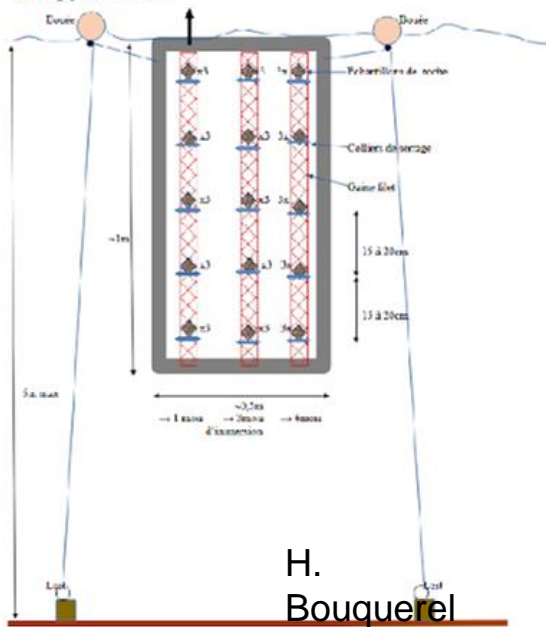
Conception dispositif:
N. Lavenant, I. Osorio, B. Wild.

WP 2.7 Biogeochemical sensors – biosampler

FORMA

PRINCIPE

- Plusieurs décontaminations par un même sévère (1 à 5 échantillons par sévère)
- 7 heures séchant dans la préforme (5 échantillons dans une 1 seule par sévère)
- 200 ml de sévère
- pH tamponné 9.0 - 10.0
- 6 mois dans l'eau
- Doit être utilisé pour le mode de test, doit être transporté en sévère (à sécher possible)
- Autoclavage possible à 121°C



H.
Bouquerel

Lac Dziani, Mayotte



Alphaproteobactéries



Gérard et al., 2018, Front Microbiol.

Gérard, Bouquerel et al.

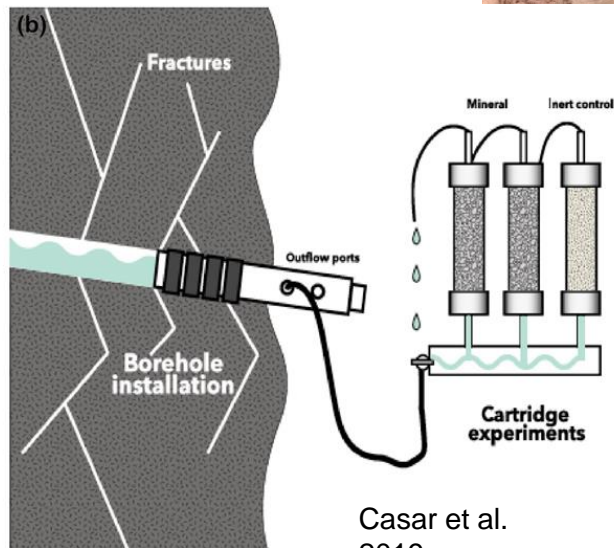
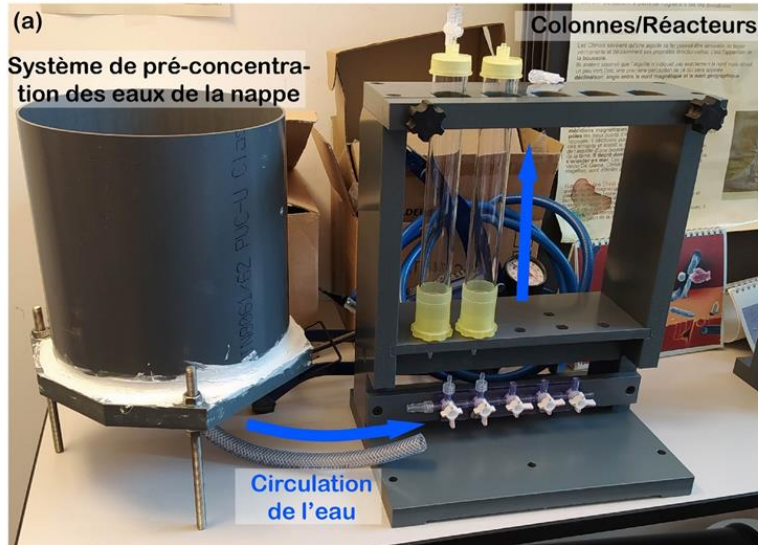


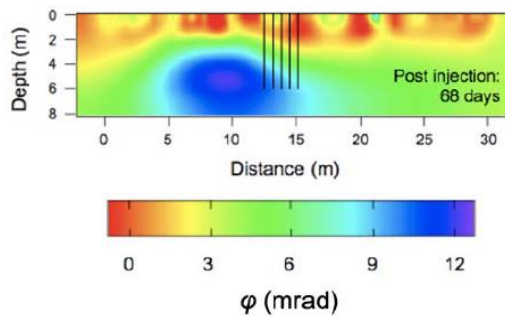
WP 2.7 Biogeochemical sensors – biosampler

FORMA

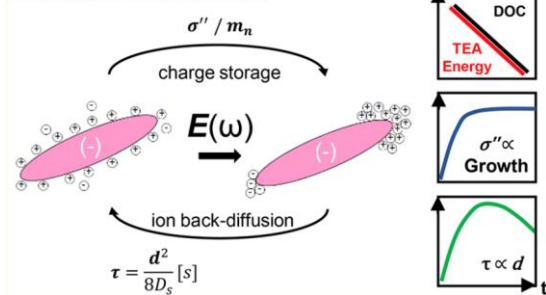
Déploiement en grottes karstiques (Larzac) pour étudier la fantômisation des roches (punk rock formation)

Pisapia, Bouquerel et al.
Coll Geosciences
Montpellier





Polarization of bacteria: SIP



WP2.7 Biogeophysics

Signaux géophysiques comme proxy de l'activité microbienne

WP 2.7 Biogeochemical sensors – biogeophysics

Coordination: D. Jougnot, F. Nicollin

Microbial driven processes

Subsurface changes

Physical

Mineral precipitation,
Porosity,
Pore size/shape,
Grain size/shape,
Grain surface properties,
Formation factor,
Cementation.

Biological

Cell concentration,
Cell population,
Biofilm,
Cell attachment/interaction
with mineral surfaces.

Chemical

Ionic strength/charge density
/mobility,
Mineral phases.
Electrical double layer,
Cation exchange capacity.

IP Signal

(+ autres signaux géophysiques)

Objectif(s) scientifique(s):

Utilisation des signaux géophysiques comme proxy de l'activité microbienne

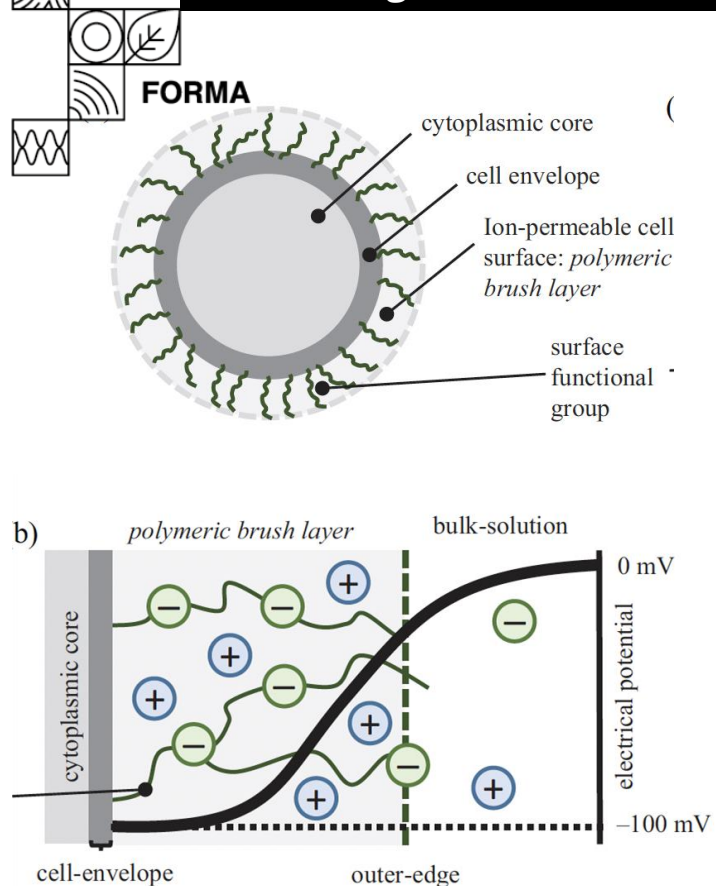
Défis techniques:

Adapter les outils de mesures classiques en capteurs adaptés aux mesures biogéochimiques

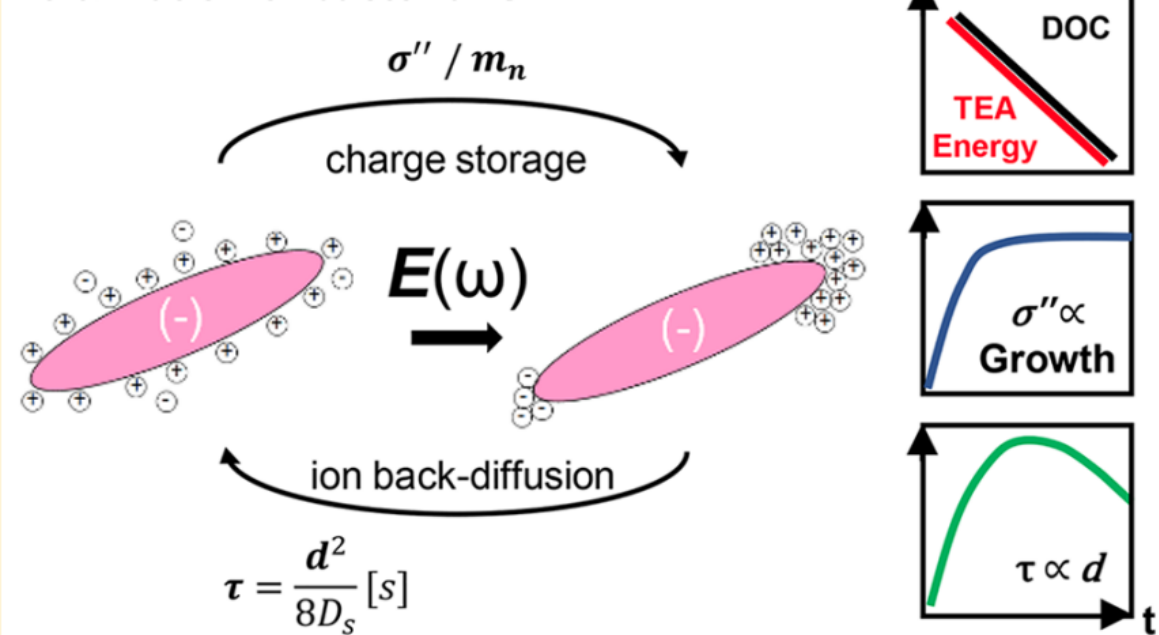
Kessouri et al. (2019)

WP 2.7 Biogeochemical sensors – **biogeophysics**

Positionnement par rapport à l'état de l'art et résultats attendus (exemple de la SIP)

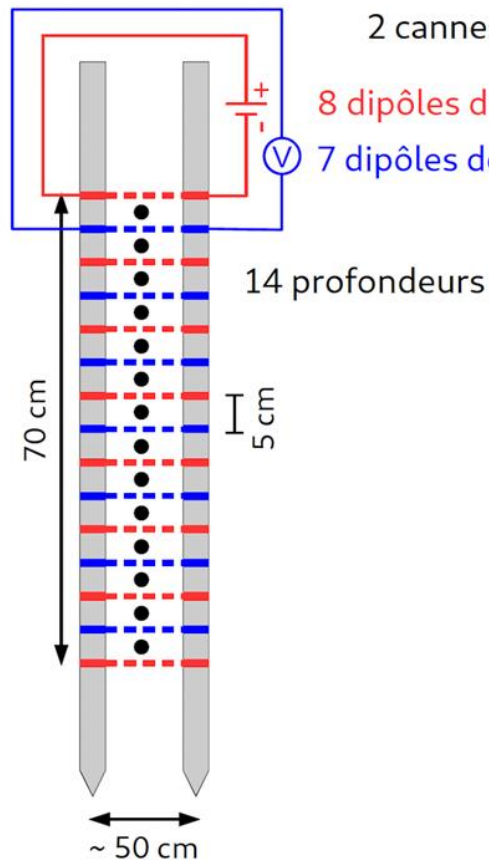


Polarization of bacteria: SIP

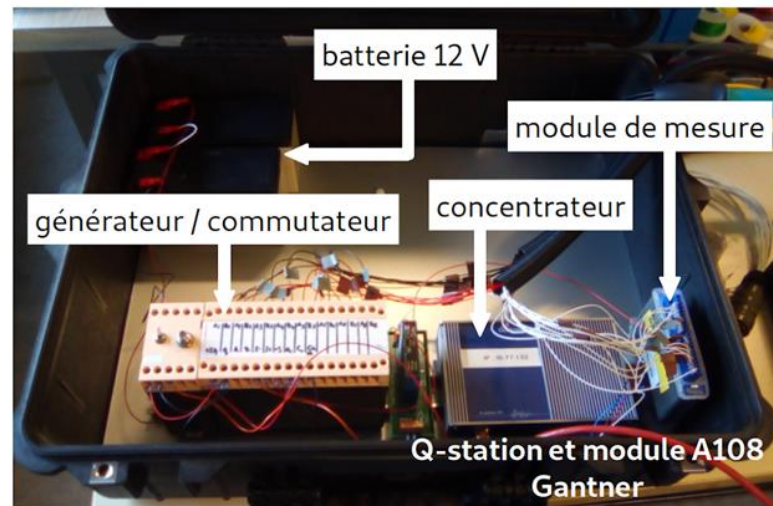


Mellage et al. (2018)

Kessouri et al. (2019)



→ $10^{-2} - 10^2$ Hz
en 30 mn



WP 2.7 Biogeochemical sensors – **biogeophysics**

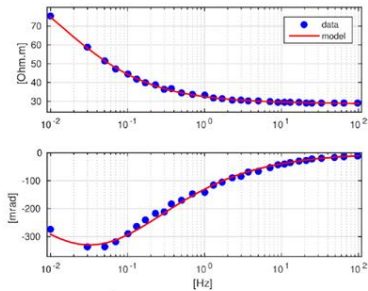
FORMA

Dispositif autonome avec une acquisition:

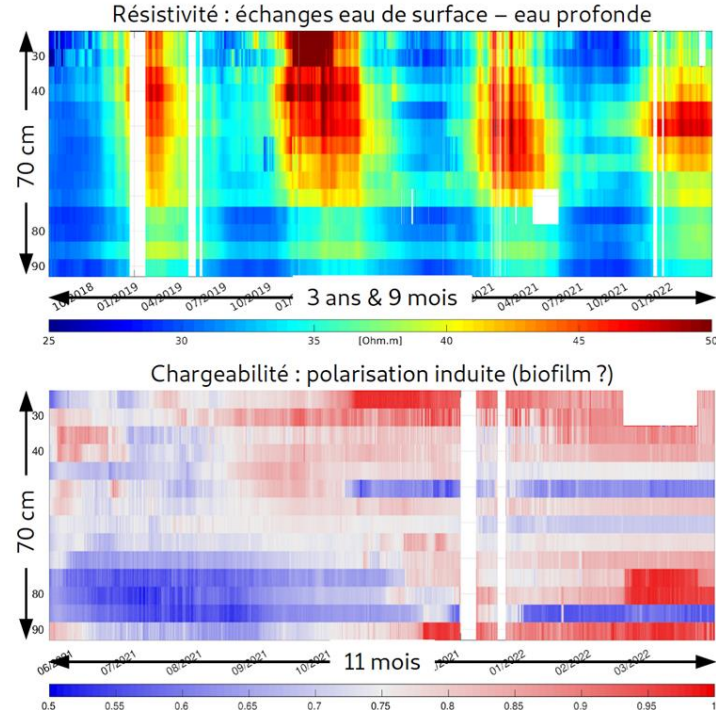
- [1-100] Hz toutes les 4 h entre juillet 2018 et mai 2021,
- [0.01-100] Hz deux fois par jour depuis mai 2021



Données : impédance électrique



Modélisation





WP 2.7 Biogeochemical sensors – biogeophysics

Le prototype IP développé par Florence Nicollin et Bruno Kergosien est très avancé

- Etape 1: Validation du prototype SIP avec appareil commercial (2022)
- Etape 2: Colocalisation d'autres types de mesures géophysiques
 - Mesures "sismiques" : éléments ployant (en cours de test à l'UMR METIS: horizon 2023-2024)
 - Mesures "potentiels spontanés" : électrodes non-polarisables (existantes et prêtes)
 - Mesures "magnétiques": susceptibilité (prototypage à venir: horizon 2024-...)

La colocalisation permet de mieux contraindre les informations issues de la mesures

WP 2.7 Biogeochemical sensors – biogeophysics

FORMA

Eléments ployant
(2 benders = 1200-2000€)

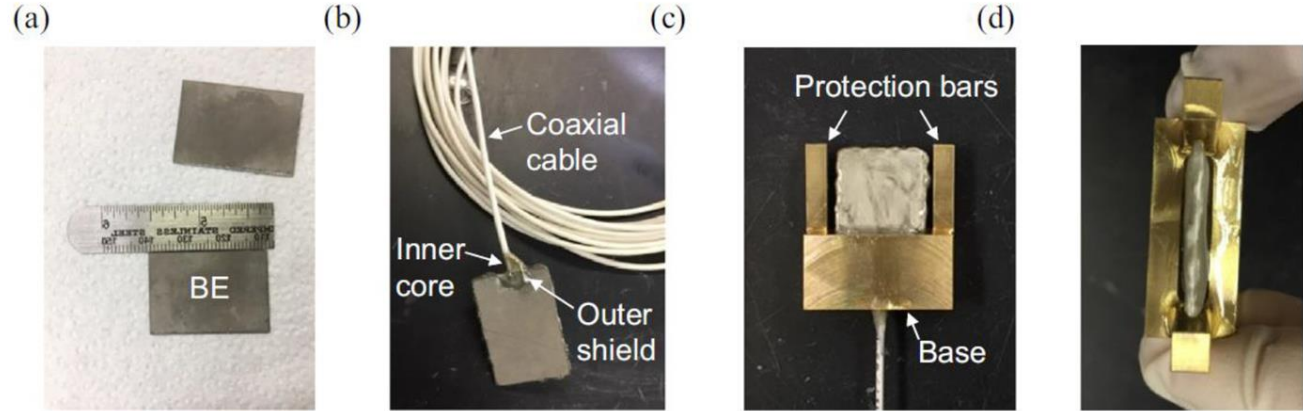


Figure 2 : photo d'un Bender utilisé dans l'étude Byun et al. 2018, avec un cadre

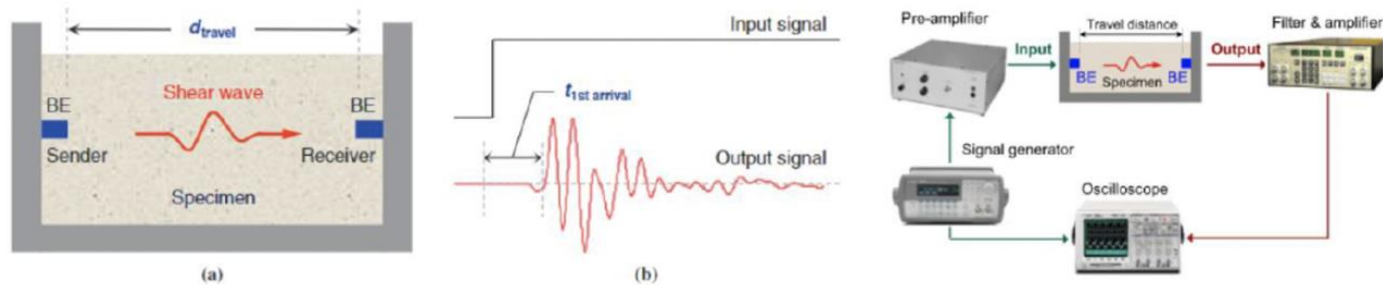
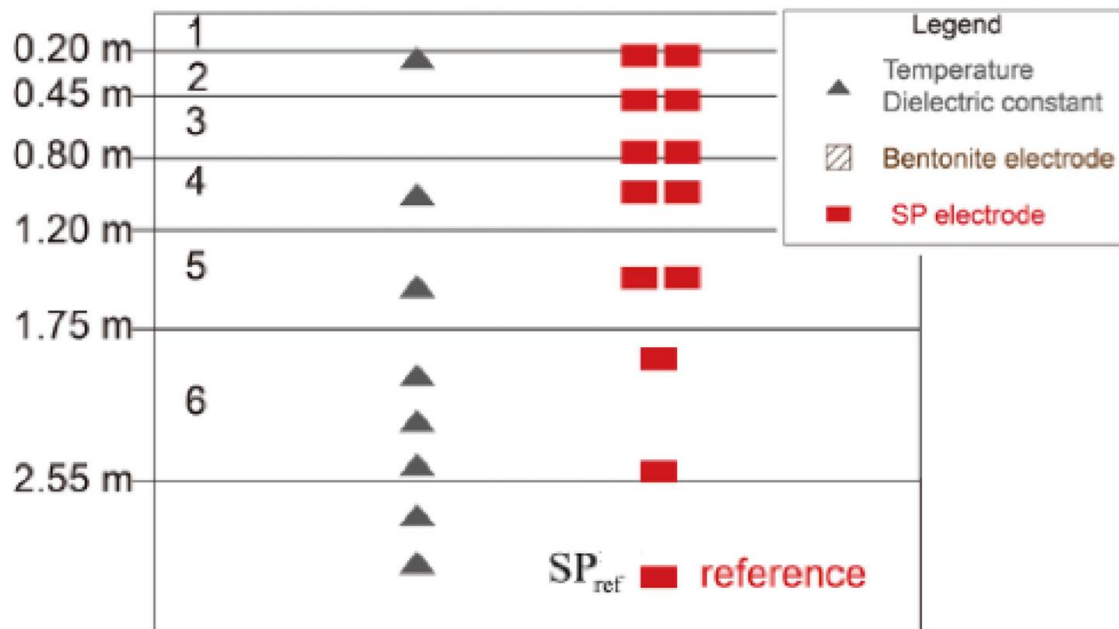


Figure 5 : Schéma de principe de la propagation d'une onde acoustiques et système d'acquisition entre deux éléments ployant dans un échantillon de sol (modifiés de Byun et al. 2017, 2018)

WP 2.7 Biogeochemical sensors – biogeophysics



Distribution verticale d'électrode non-polarisables
(150€ pièce)



WP 2.7 Biogeochemical sensors

S INFORMATI																	Labo	Nbre de mois
Etapas	2022		2023		2024		2025		2026		2027		2028		2029			
	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2		
	capteurs O2, pCO2, H2, NO2, NO																GR	8
D : déploiement de capteurs existant avec retour d'expérience pour établir un CCTP en accord avec les besoins des communautés																	ECO	0
																	LAAS	0
																	IPGP	0
																	METIS	0
																	IPR	0
	lab on chip																GR	10
I1: réalisation d'un prototype "artisanal" (fait en labo, qui peut être une version augmentée du capteur existant) pour enrichir le CCTP	échantillonneurs bio																ECO	4
	sonde biogéophysique																LAAS	6
																	IPGP	7
																	METIS	2
																	IPR	2
I2: test TEST_0 in-situ et labo pour le prototype	lab on chip																GR	9
	échantillon																ECO	3
	biogéophys																LAAS	0
																	IPGP	5
																	METIS	2
																	IPR	0
I3: étude de la réalisation du prototype via un AAP et sélection de l'entreprise	lab on chip																GR	6
	échantillon																ECO	2
	biogéophys																LAAS	1
																	IPGP	4
																	METIS	1
																	IPR	1
I4: réalisation d'un prototype conformes aux normes par l'entreprise (également appelé phase de prototypage)	lab on chip																GR	2.5
	échantillon																ECO	0.5
	biogéophys																LAAS	0.5
																	IPGP	1
																	METIS	0.5
																	IPR	0
I5: test TEST_1 in situ pour valider les recettes par les partenaires	lab on chip																GR	10
	échantillon																ECO	2
	biogéophys																LAAS	0
																	IPGP	5
																	METIS	2
																	IPR	0
I6: duplication après validation	lab on chip																GR	0
	échantillon																ECO	0
	biogéophys																LAAS	0
																	IPGP	0
																	METIS	0
																	IPR	0
I7: co-déploiement opérationnel à partir de cette date	lab on a chip																GR	8
	échantillonneurs																ECO	4
	sondes biogéophys																LAAS	0
																	IPGP	6
																	METIS	2
																	IPR	0

Planning et implications des personnels permanents prévus dans le projet

Tanguy Le Borgne	CNAP	UNIV RENNES 1	GR	Hydrogéologie et transport réactif
Camille Bouchez	CNAP	UNIV RENNES 1	GR	Hydrogéologie et biogéochimie
Nicolas Lavenant	IE	CNRS	GR	développements capteurs
Francesco Gomez	IE	CNRS	GR	développements capteurs
Thierry Labasque	IR	CNRS	GR	capteurs chimiques
Eliot Chatton	IR	CNRS	GR	capteurs chimiques
Luc Aquilina	PR	UNIV RENNES 1	GR	Géochimie
Florence Nicollin	Mcf	UNIV RENNES 1	GR	Géophysique
Vincent Raimbault	CR	CNRS	LAAS	Microfluidique
Damien Jougnot	CR	CNRS	METIS	Biogéophysique
Alexis Dufresne	CR	CNRS	ECO	Microbiologie environnementale
Alexandrine Pannard	MCF	UNIV RENNES 1	ECO	Microbiologie environnementale
Bénédicte Menez	PR	UNIV PARIS DIDEROT	IPGP	Géomicrobiologie
Emmanuel Gerard	IR	INST PHYSIQUE DU GLOBE DE PARIS	IPGP	Géomicrobiologie
Céline Pisapia	MCF	UNIV PARIS DIDEROT	IPGP	Géomicrobiologie
Hélène Bouquerel	IE	INST PHYSIQUE DU GLOBE DE PARIS	IPGP	Géomicrobiologie
Hervé Tabuteau (IPR)	CR	CNRS	IPR	Microfluidique



WP 2.7 Biogeochemical sensors

FORMA

WP2.7 Budget par tâche

Tâche 1 Micro-sensors 90 k€: capteurs in situ O₂, pCO₂, H₂, H₂S, N₂O, NO

Equipement	80 k€ capteurs haute sensibilité O ₂ , pCO ₂ , H ₂ , N ₂ O, NO (PyroScience, unisense) 15 sondes de cout allant de 5 à 10 k€
Prestation de service	
Missions - fonctionnement	10k€ calibration et installation capteurs sur site
Cout unitaire du prototype	6.5 k€
Nombre de capteurs	12

Tâche 2 Lab on chip 200 k€: mesures in situ de nutriments (NO₃²⁻, SO₄²⁻, PO₄³⁻, NH₄⁺), minéraux dissous (Fe²⁺, Fe³⁺, silice), ATP

Equipement	100k€: 40 k€ equipements microfluidique (micro-capteurs, micro-vannes, micro-pompes, système de filtration), 40k€ equipements microfabrication (UV CUBE, imprimante 3D), 20k€ achat capteurs lab on a chip développés par Southwest sensors,
Prestation de service	80 k€: developpements des sondes lab on a chip pour les environnements continentaux
Missions - fonctionnement	20 k€: consommables microfluidique, test et calibration, installation sur site
Cout unitaire du prototype	40 k€ (65 k€ si on compte les prestations)
Nombre de capteurs	3



WP 2.7 Biogeochemical sensors

WP2.7 Budget par tâche

Tâche 3 Biosampler 200 k€ : échantillonnage automatique in situ de bactéries

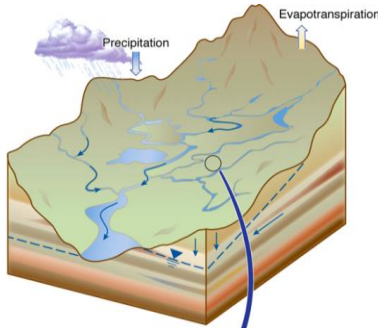
Equipement	100 k€: micro-pompe, micro-capteurs (débit, pression), micro-électronique, communication, système de filtration, système osmotique
Prestation de service	80 k€: 60k€ développement biosampler pour les environnements continentaux, 20k€ frais analyses génomiques, MEB et confocal
Missions - fonctionnement	20 k€: consommables test et calibration, installation sur site
Cout unitaire du prototype	20 k€ (36 k€ si on compte les prestations)
Nombre de capteurs	5

Tâche 4 Biogeophysics 70 k€: suivi géophysique de l'activité microbiologique

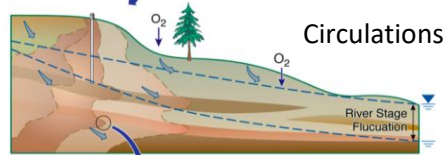
Equipement	40 k€: sondes PS, PP, impédance, acoustique
Prestation de service	20 k€: intégration dans une sonde biogéophysique unique
Missions - fonctionnement	10 k€: consommables test et calibration, installation sur site
Cout unitaire du prototype	10 k€ (15 k€ si on compte les prestations)
Nombre de capteurs	4

WP 2.7 Biogeochemical sensors

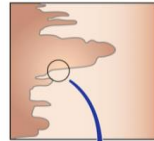
FORMA



Cycles et flux dans la zone critique



Circulations



Gradients biogéochimiques



Communautés microbiennes,
réactivité

Questions

1. **Hot spots et hot moments** : quel est l'impact des processus hydrologiques et géochimiques (écoulement, transport réactif, fluctuations hydrologiques) sur la dynamique et la distribution des micro-organismes ?
2. **Interactions biotique-abiotique** : quel est le rôle des micro-organismes dans l'altération des roches ?
3. **Flux biogéochimiques** : quel est le rôle des micro-organismes dans les flux biogéochimiques entre la surface et le milieu souterrain ?

Tâche 1 Micro-sensors: capteurs in situ O_2 , pCO_2 , H_2 , H_2S , N_2O , NO

Tâche 2 Lab on chip: mesures in situ de nutriments (NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NH_4^+), minéraux dissous (Fe^{2+} , Fe^{3+} , silice), ATP (adenosine triphosphate)

Tâche 3 Biosampler: échantillonnage automatique in situ de micro-organismes

Tâche 4 Biogeophysics: suivi géophysique de l'activité microbologique

Laboratoires impliqués : CARTEL, CEBC, CEFE, Centre de Géosciences, CERFE, CESBIO, Chrono-environnement, CRAL, CReSTIC, DT-INSU, Dynafor, ECOBIO, ECOLAB, EVS, GET, GR, GSMA, HABITER UR, IGE, IM2NP, IPAG, IPGP, IRISA, IRIT, ISM, ISTO, LAAS, LCA, LECA, LEMAR, LHYGES, LIG, LIRMM, LMGE, LPC, LRGP, LIS, RiverLy, SAS, Subatech.

Tutelles et partenaires non académiques : **CNRS** :INSU, INEE, INSIS, IN2P3, INP, INS2I, INSHS, INSB. **Autres organismes de recherche** : IRD, INRAE, IPGP. **Ecole d'ingénieur** : Mines ParisTech. **Universités** : Grenoble, Savoie-Mont-Blanc, Toulouse et Toulouse INP, Rennes, Clermont-Auvergne, Montpellier, Reims, Toulon, Franche Comté, Orléans, Strasbourg, Aix Marseille. **EPIC**: INERIS. **PME**: Extralab

Soutiens: CNES, OFB, BRGM, Agence de l'eau Loire Bretagne, Réseau RECOTOX, l'observatoire du sol vivant, Institut Carnot Eau & Environnement, Groupes Régionaux des experts du climat, Régions, Office régionales de la biodiversité, Fondation François Sommer

Remerciement aux autrices du livre TERRA FORMA qui nous ont laissé l'emprunt de leur titre.

Contact(s): terra-forma@services.cnrs.fr

terra-forma.cnrs.fr

anr®
agence nationale
de la recherche



ANR-21-ESRE-0014

