

Hymenet : un réseau de capteurs de sol in situ autonomes et connectés

Sondes d'humidité et salinité des sols WP 5
implémentation

Vendredi 8 avril 2022

X Chavanne et J-P Frangi
Université de Paris cité. IPGP
Courriel à xavier.chavanne@u-paris.fr

HYdrological MEasurement

NETwork

Mesure d'humidité θ_v et salinité σ_{ion}

In situ, en continu, 1 point/10 min., > 1 an
=> numérisation, automatisation

→ Grandeurs diélectriques du sol :
permittivité et conductivité, ϵ_r et σ

Biais instrumental ?

Dispersion sensibilité entre unités ?

Peu perturbant (installation et fonctionnement)
→ pas de tranchée

Volume de sol scruté grand
→ géométrie des électrodes dans sol

-> Qualité de mesure

Réseau de capteurs de sol in-situ

Variation latérale (différents sols, relief...)
Bassin versant 1 km² → 20 à 100 unités

=> duplication d'un capteur type

=> gestion du réseau sur la durée

→ coûts ?

- fabrication et intégration en série,
- installation,
- exploitation, transfert des données,
- maintenance,

=> autonomie (opération, énergie, transfert,
robustesse...)

-> Qualité de service et durabilité

Capteurs bas coût ? Choix à faire/optimisation → tests



Instrument de mesure

Principe de mesure de l'humidité des sols



Permitivité et conductivité des sols, ϵ_r et σ

Pourquoi → méthode directe difficile à automatiser

ϵ_r ? Réponse des dipôles d'un milieu à un champ électrique E

air (vide) $\epsilon_r = 1$

solides (quartz) $\epsilon_r = 3$ à 5

eau $\epsilon_r = 80$; molécules d'eau = forts dipôles

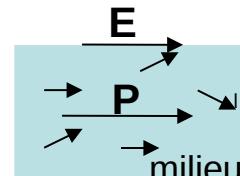
σ ? Présence d'ions dans l'eau

Sol = milieu poreux, multi-phase (interfaces, géométrie)

- autres dipôles (effets de surface...)

- autres effets dissipatifs (relaxation dipôles ...)

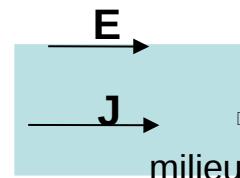
Depuis fin XIXe abondante littérature pour modéliser la relation $(\epsilon_r, \sigma) \leftrightarrow (\theta_V, \sigma_{ion})$



P : polarisation des dipôles

$$P = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) E$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \text{ pF/m}$$



J : courant d'ions

$$J = \sigma E$$

$$\epsilon_r = \epsilon_r + j \sigma / 2\pi f \epsilon_0$$

f : fréquence du champ
 E alternatif ($f > 20$ MHz)

Technique de mesure ϵ_r et σ

Deux familles de méthodes in situ :

- De vitesse ou temps t_{pr} de propagation d'une onde électrique

Time Domain Reflectometry (e.g. Soilvue «True TDR »)

Enregistrement onde pour déterminer t_{pr}

Électronique rapide => cher et consommateur

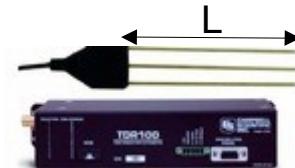
TDR bas coût : oscillateur déclenché sur retour d'onde (CS616) ; t_{pr} = période

Période t_{pr} augmente avec ϵ_r à même $\sigma \Rightarrow$ biais

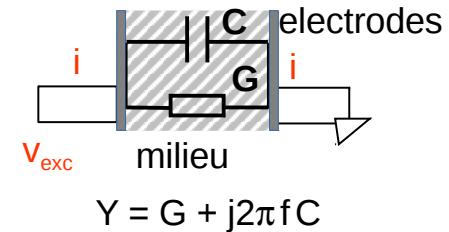
- Capacitives : amplitudes des signaux électriques

Capacité d'une paire d'électrodes dans sol $C \sim \epsilon_r$ (et $G \sim \sigma$)

Sortie (tension ou période) dépend aussi de σ , composants du capteur..
 \Rightarrow corrélation sortie \leftrightarrow teneur eau



$$t_{pr} = \frac{L \mathcal{R}_e(\sqrt{\epsilon_r})}{C}$$



$$Y = G + j2\pi f C$$

Technique de mesure ϵ_r et σ

$$\begin{cases} \epsilon_r = C_{eq}/(g\epsilon_0) V_C \\ \sigma = G_{eq}/g V_G \end{cases}$$

Pont de wheastone auto-équilibré :

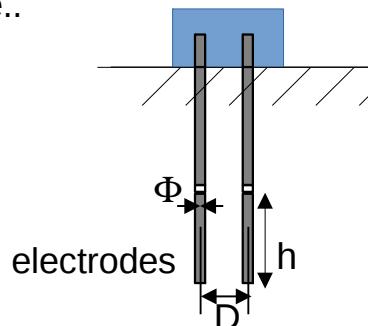
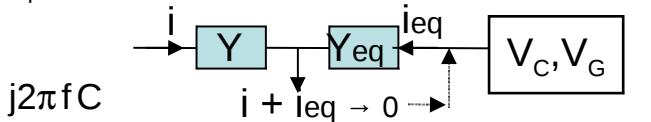
- résolution en phase
- réponse linéaire, V_C et V_G , proportionnelle à $Y = G + j2\pi f C$
- temps d'équilibre ~ 10 ms
- modéliser en circuit électrique + spec composants => extrapoler sur 100 unités à 2 % d'erreur

Mais - plus de composants actifs (coût et consommation)

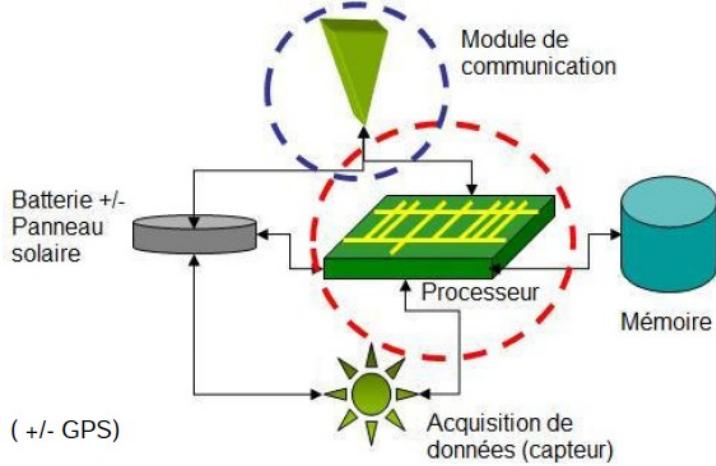
- réduire leur nombre, et variété
- + mécanismes d'auto-correction, peu de réglages par unité..

Paire d'électrodes bi-cylindrique :

- facteur géométrique $g(h, \Phi/D) \sim 0.1 \text{ m}$
- avec $\Phi/D > 0.3 \Rightarrow$ volume sensible
- profil vertical le long des cylindres
- fabrication et installation plus simple



Ref: Chavanne, X & Frangi, J.-P. **Monitoring soil water content and its salinity with high-precision and low-cost in-situ sensors**, Eur. J Envir. and Civil Eng., vol 0, p 1-22 (2022) 10.1080/19648189.2022.2051076

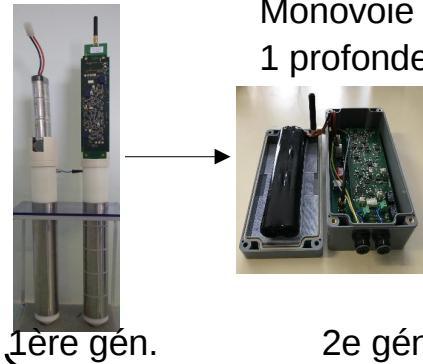


Objet autonome connecté



Mise en œuvre : travail itératif

Générations de prototypes
(optimisation, intégration...)



Monovoie
1 profondeur

2e gén.

Multivoie
profil

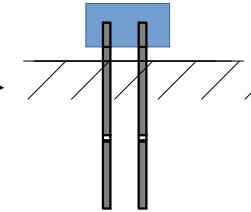


3e gén.

Monovoie
1 profondeur

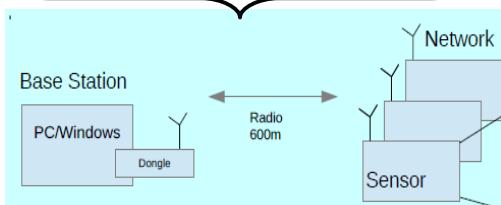


4e gén.



démonstrateur

Transmission



Autonomie jours

4 pilesAA 1pt/10' 12 j

30 j

41 j

de 165 à 245 j (SF)

Maturité TRL 3 - 4

4 - 5

5 - 6

7 - 8

Standard ouvert,
bande libre, longue
portée, faible
consommation...



Tests sur le terrain



Terrasse du laboratoire, Paris 13e



Parasites téléphonie LTE 800

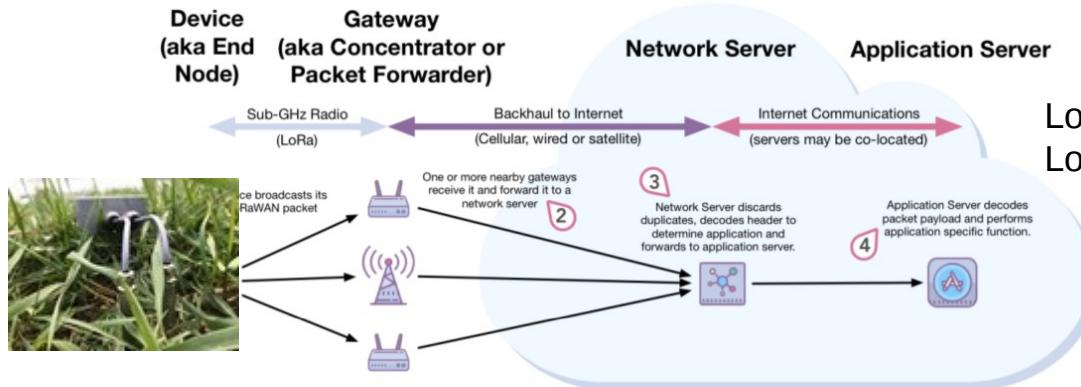


Observatoire de Draix (Alpes du sud). Altitude > 800 m.

Accès difficile. Alimentation électrique limitée. Transmission par étapes WiFi puis satellite

Transfert de données : LoRaWAN. Qu'est-ce ?

Noeud > LoRa > Passerelle > Internet Plateforme réseau



LoRa : Long Range modulation
LoRaWAN : protocole et architecture

Un **standard ouvert de communication** porté par un consortium industriel.

- bande libre de droit (868 MHz en Europe).
- Longue portée (>> 1 km).
- Peu énergivore.
- Jusqu'à 1000 capteurs par antenne/passerelle.
- ! Duty cycle : débit maximum de 1 message par min avec 60 à 200 octets de données.

Transfert de données : LoRaWAN. Qualité de transmission

Choix : transfert en temps réel des données brutes

Pour un profil de 3 variables sur 5 profondeurs + Vbat... < 50 oct. utile (payload) par point/message
Cycle de 6 points par heure - 1 pt/10 min - (cas pluies extrêmes)

Modulation LoRa : choix de l'étalement du message LoRa

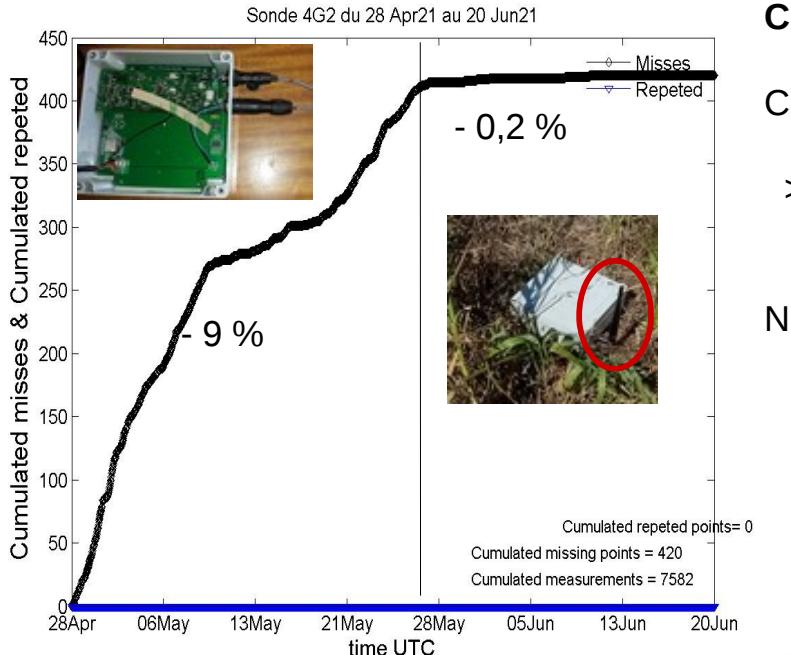
Plus d'étalement => moins de perte ! Mais consommation croît avec t_x

Temps transmission t_x «time on air» en ms

Facteur d'étalement (SF)	7	8	9	10	11	12
Monovoie 16 oct. payload	75	125	220	380	900	1700
Multivoie 43 oct. payload	112	200	370	660	1400	2200

Autres facteurs : choix antennes, densité des passerelles, algorithmes (ADR...)

Transfert de données : LoRaWAN. Qualité de transmission



Choix antenne : patch versus fouet long omnidirectionnel

Cumul des points perdus au cours de temps

> Antenne fouet plus performante, même si plus chère

NB : problème de l'horodatage

Horloge quartz dérive ; au moins 1 s par jour

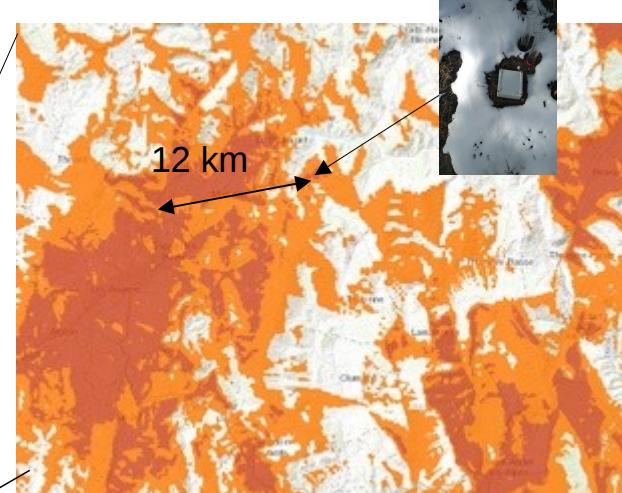
=> utilisation horodatage LoRa (GPS = heure universelle)

Terrasse du laboratoire, Paris 13e



Transfert de données : LoRaWAN. Couverture

Couverture LoRa® Orange



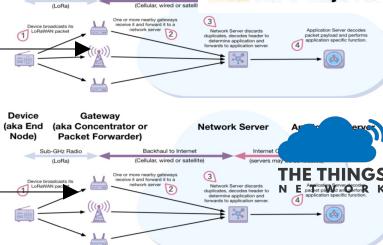
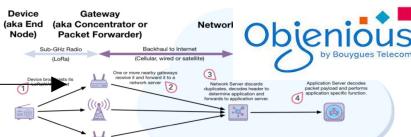
Une passerelle d'Orange au dessus de Digne, à environ 12 km du site.
Couplée à une station de téléphonie mobile

Transfert de données : LoRaWAN. Collecte des données

Capteurs



Réseaux LoRaWAN



Base de données
traitement/visualisation
(EOST Strasbourg)

PostgreSQL



dissémination/visualisation



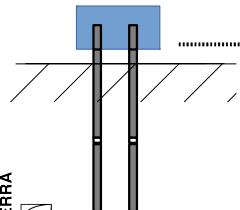
Grafana

Trois plateformes LoRaWAN utilisées, au choix :

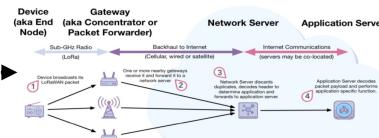
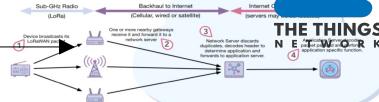
- The Things Network, communautaire → intérieur avec notre passerelle
- Live Objects/Orange, opérée → extérieur suivant couverture (1€/mois/capteur)
- Objenious/Bouygues, opérée → extérieur suivant couverture (1€/mois/capteur)

Transfert de données : LoRaWAN. Collecte des données

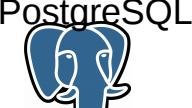
Capteurs



Réseaux LoRaWAN



Base de données
traitement/visualisation
(EOST Strasbourg)



PostgreSQL



WP 3.3
Terra Forma

dissémination/visualisation



Grafana

Au site du col du Lautaret :
2 réseaux privés (campusIoT, UGA) + Objenious ?

Energie : consommation

Sur 1 jour ou 1 an (Wh) = nombre de cycles x energie/cycle

- 1 cycle = 1 point ; 6 pts/h => 144 cy/jour ou 52500 cy/an

Compromis résolution/autonomie

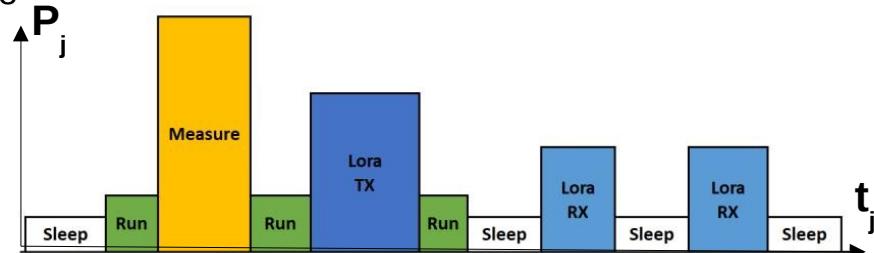
- cycle = phase veille + phase active(opérations + mesure + traitement + transfert)
Veille : jusqu'à 6 uA sous 6 V

$$\text{Active : conso} = \sum_j P_j (\text{mW}) \times t_j (\text{s})$$

Mesure (pont) $\sim 3000 \text{ mW} \times 0,15 \text{ s} \rightarrow$ réduire

LoRa (Tx à SF12) $\sim 170 \text{ mW} \times 2 \text{ s}$

fixée SF



Energie : alimentation

Batterie ou pile : V_{bat} , capacité (Ah), volume, auto-décharge, sensibilité au froid...

Tension alimentation > 4 à 5 V

- Alcaline AA/L6 (x 4): bon marché, facilement disponible



V_{bat} de 1,5 à 0,9 V avec état de charge. Auto-décharge 10+ %/an

capacité théorique 2,5 Ah/pile. Mais sur site 1,2 Ah (T doux) et 0,7 Ah ($T < 0^\circ C$)

- Pile Li non rechargeable (x 2) : cher et fournisseurs spécialisés

V_{bat} = 3,6 V stable. Auto-décharge 1 %/an

capacité théorique 3,6 Ah/pile.



- Li ion rechargeable (2SXP) : intermédiaire

V_{bat} de 4,2 à 2,6 V avec état de charge. Auto-décharge quelques %/an

capacité théorique 3,3 Ah/pile. Peu sensible à T

Utilisation d'une cellule solaire (Si amorphe)



Perspectives (WP 5 Terra Forma)

Derniers développements en deux phases

- phase d'optimisation avec un démonstrateur/tête de série (2022-2025)
 - Conception – réalisation – tests
 - Site de test extrême : col du Lautaret
- phase d'industrialisation pour duplication à partir de la tête de série
 - Pré-étude de fabrication avec phase d'intégration
 - Choix société et avec quelle modalité
 - Coût final

Laboratoires impliqués : CARRTEL, CEBC, CEFÉ, 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

