

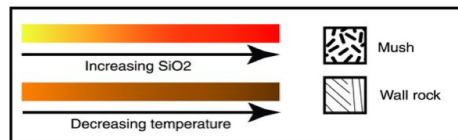
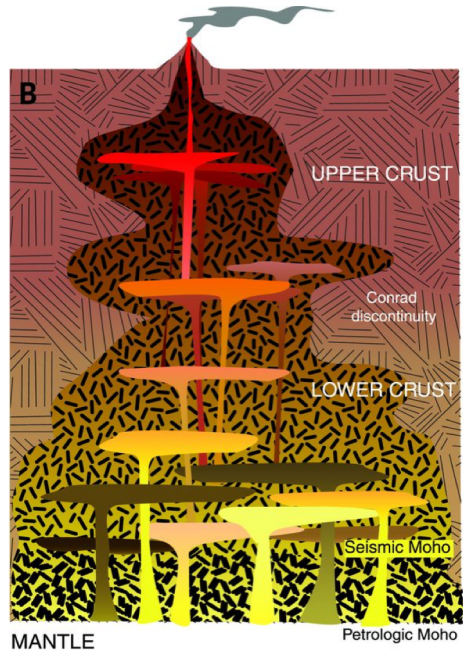
Spectrométrie des radionucléides en environnement hostile



Vincent Breton

**Crédit: Pierre-Jean Gauthier, Magali Magne,
Laurent Royer, Lucas Tassinato, Luca Terray**

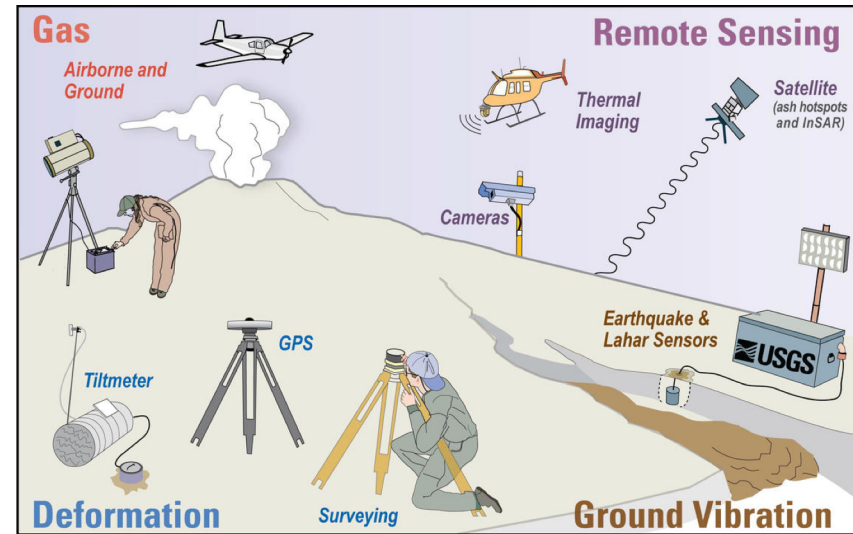
Ce qu'il se passe en profondeur...



*Transcrustal magmatic system
(Cashman et al., 2017)*

Une variété de processus magmatiques depuis la genèse des magmas par fusion du manteau jusqu'à leur émission en surface (fusion, injection, stockage, cristallisation, dégazage...)

Ce qu'on observe en surface...



Les processus profonds génèrent des signaux (physiques ou chimiques) mesurables depuis la surface.

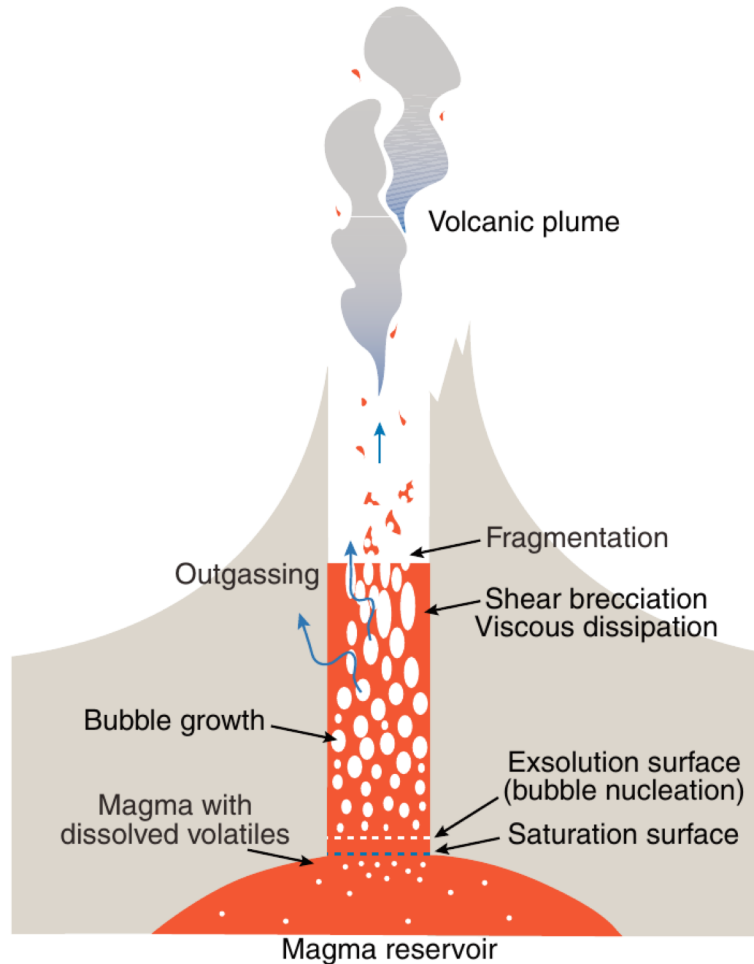
Les lois physiques contrôlant les processus sont relativement bien contraintes → possibilité d'exploiter les signaux de surface pour la prévision des éruptions.

Prédictibilité néanmoins limitée :

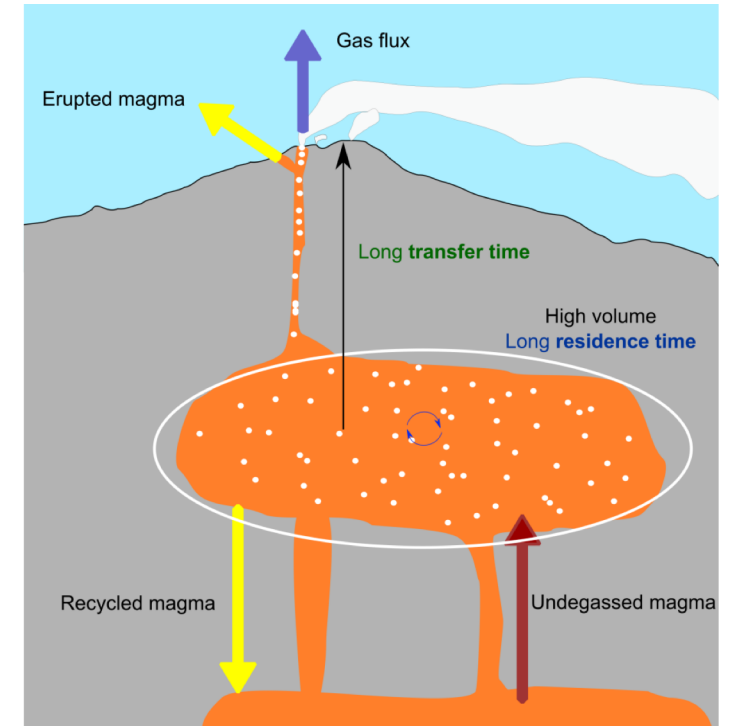
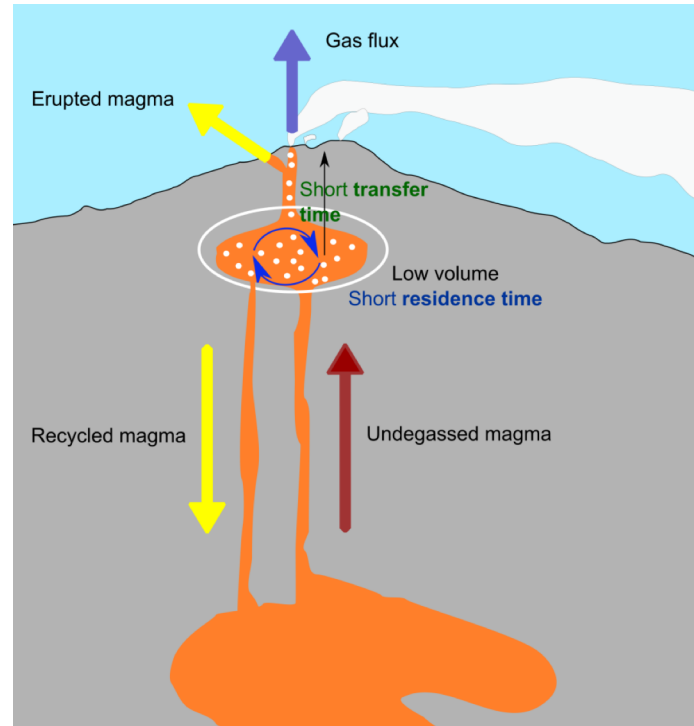
- Modélisation inverse → non-unicité des solutions
- Manque de contraintes, notamment temporelles

L'exsolution des composés volatils et le dégazage des magmas jouent le rôle de moteur dans la remontée des magmas (densité, flottabilité) et l'activité éruptive (par ex., explosivité)

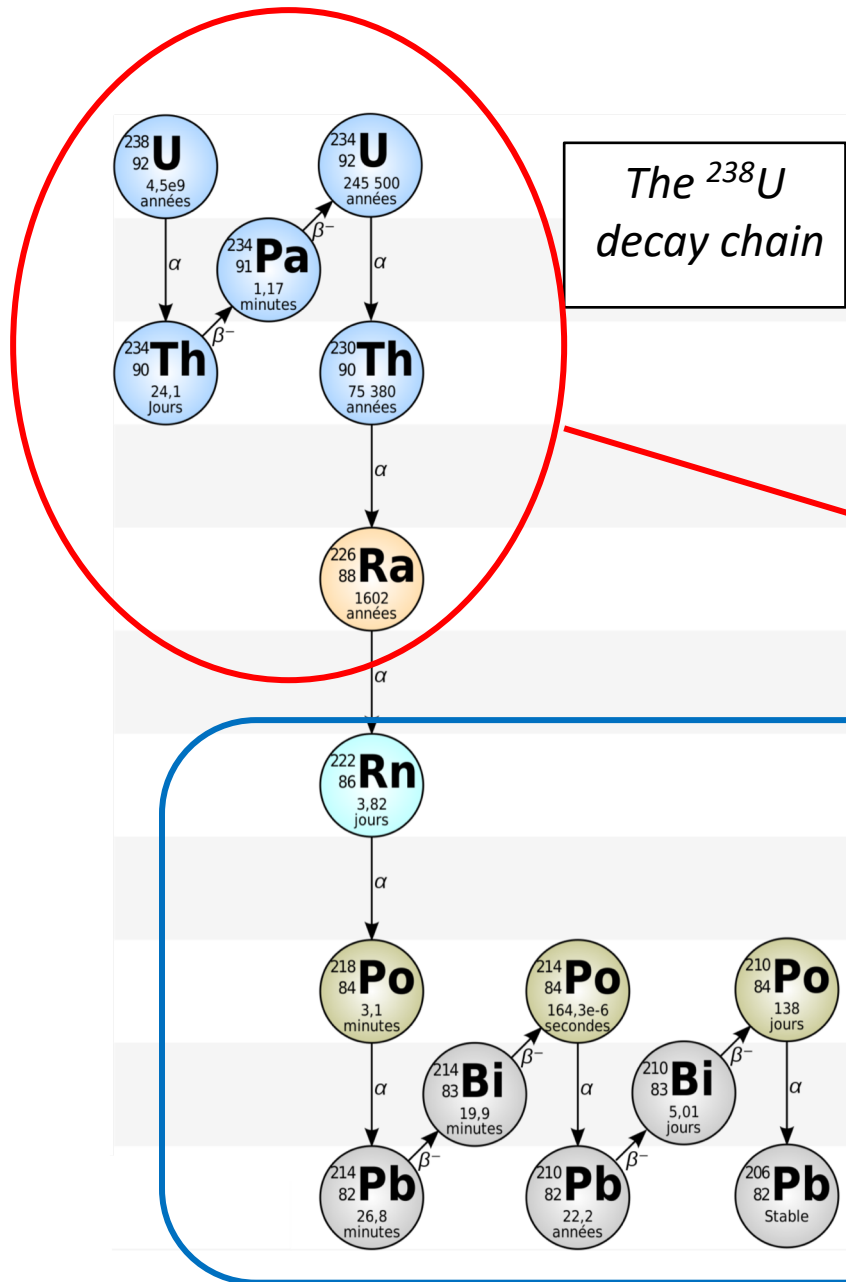
Que nous apprend la composition chimique des gaz libérés par les volcans (par ex. flux de SO_2 mesurés en surface) ?



Gonnerman & Manga, 2007



- Besoin de contraintes cinétiques et dynamiques
- Accessibles via radioactivité naturelle (chaîne de ^{238}U)

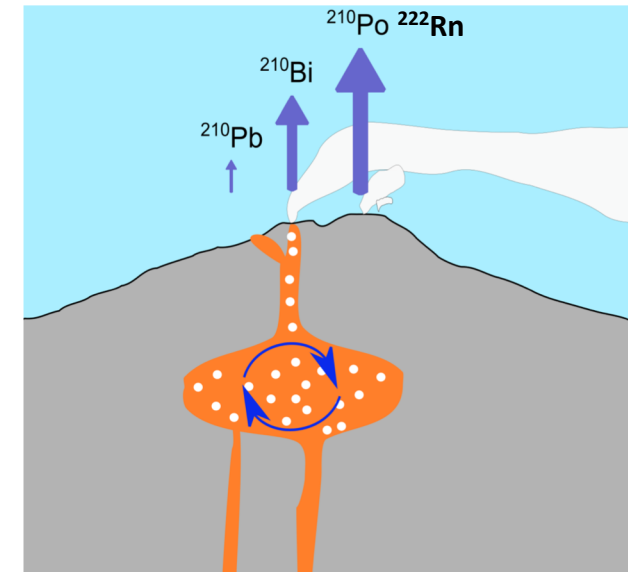


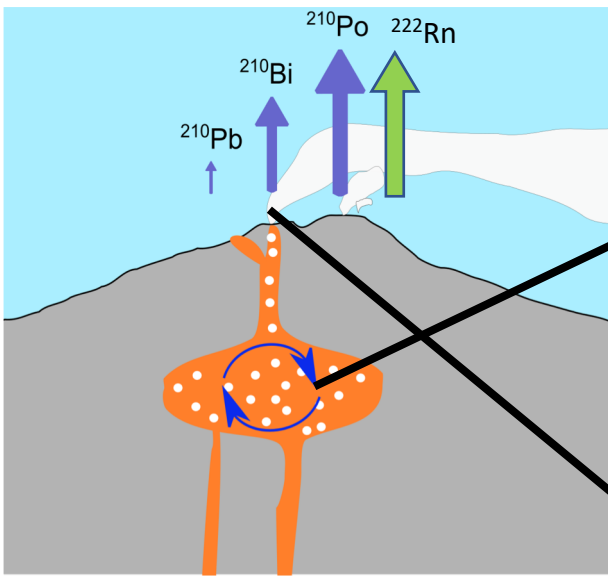
Une chaîne radioactive naturelle composée de :

- 1 isotope père radioactif (^{238}U)
- 1 isotope fils radiogénique (+primordial) stable (^{206}Pb)
- 13 isotopes intermédiaires à la fois radioactifs et radiogéniques
- 8 éléments différents avec des propriétés (géo)chimiques contrastées
→ fractionnement lors des processus magmatiques : création d'un déséquilibre radioactif (activités père-fils différentes)

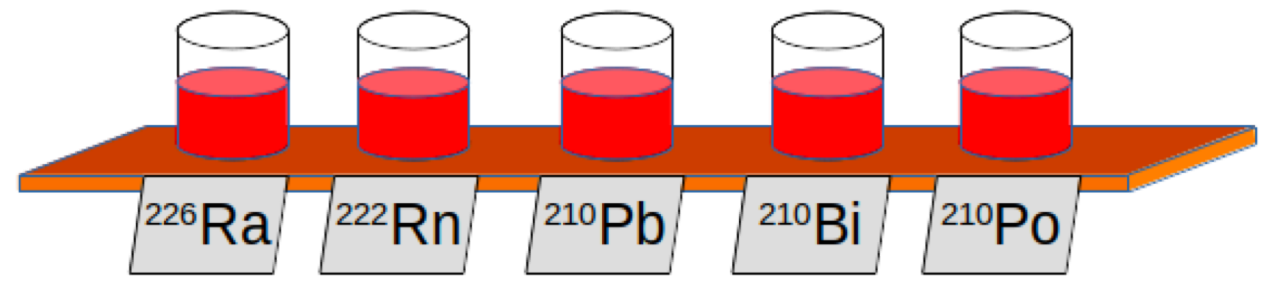
Quatre éléments incompatibles (= qui s'incorporent mal dans les solides = cristaux) et réfractaires (= peu ou pas volatils) → se concentrent dans les liquides silicatés (étude des processus profonds)

Quatre éléments incompatibles mais volatils aux températures magmatiques (Rn gaz rare, via composés halogénés pour Po, Bi, Pb) → se concentrent préférentiellement dans la phase vapeur (étude du dégazage)

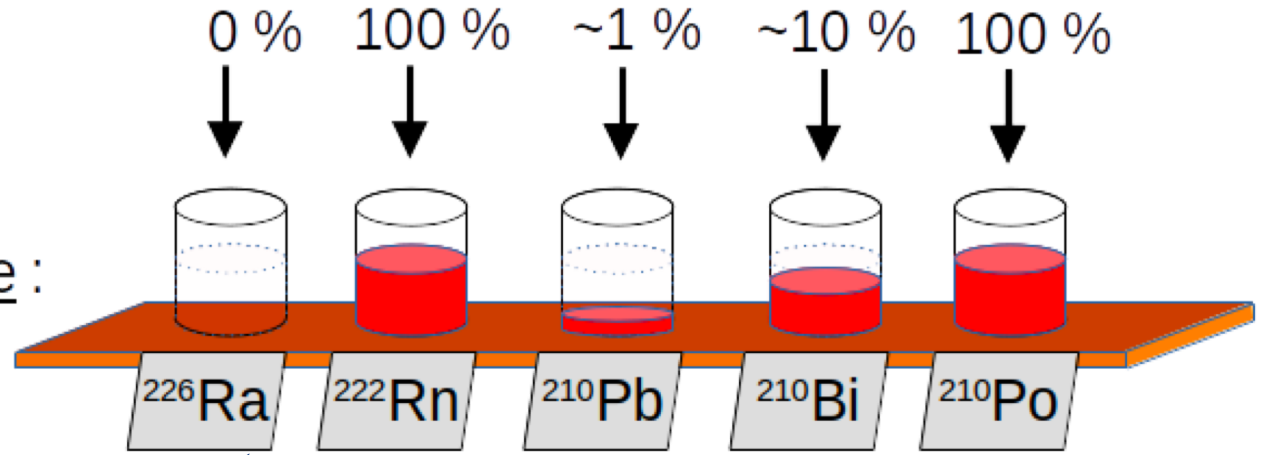




Magma :
équilibre
séculaire



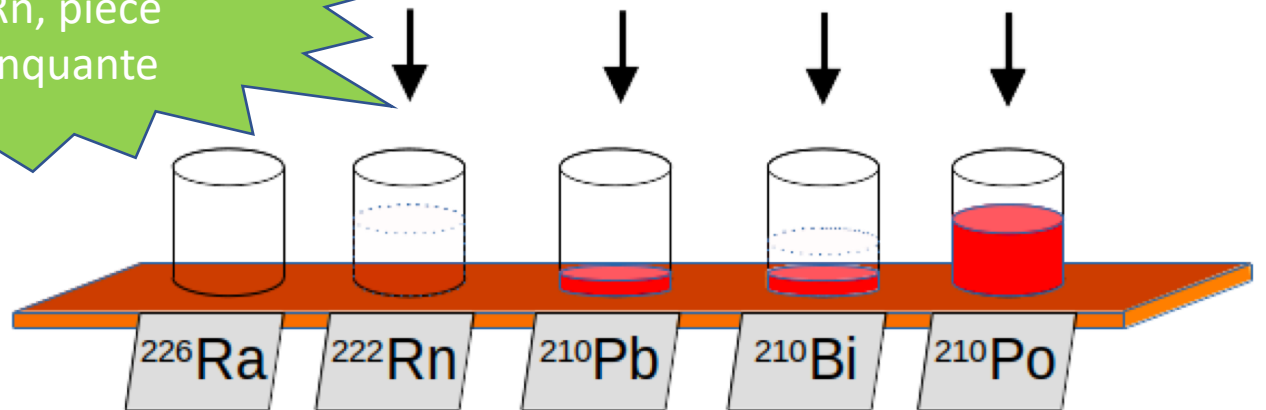
Gaz volcanique :
déséquilibre



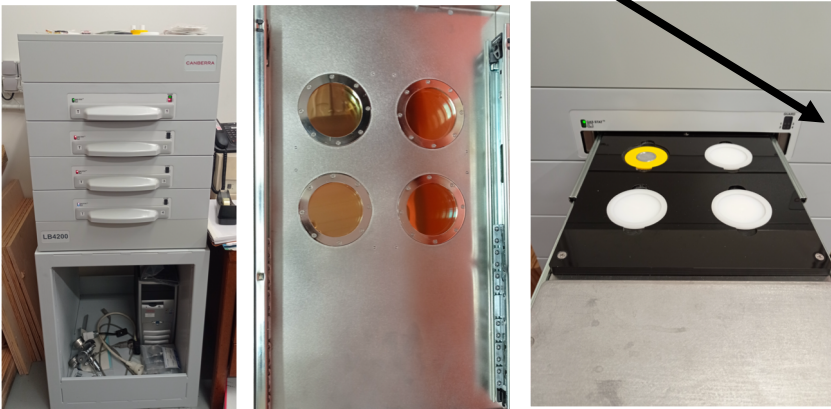
^{222}Rn , pièce
manquante

$$dA_i/dt = -\lambda_i A_i + \lambda_{i-1} A_{i-1}$$

Filtres :
décroissance



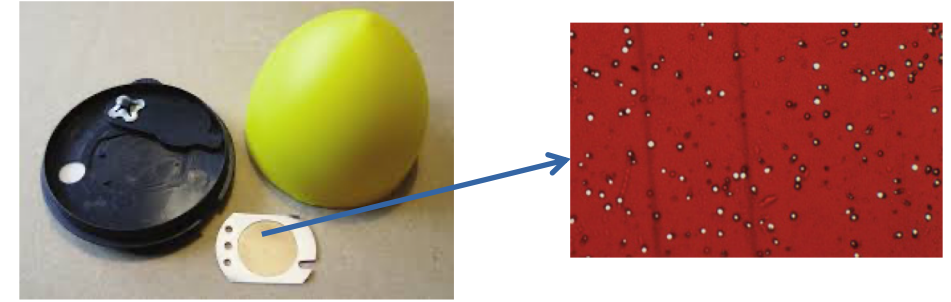
Avec t tel que : $T_{1/2}(^{222}\text{Rn}) \ll t < T_{1/2}(^{210}\text{Po})$



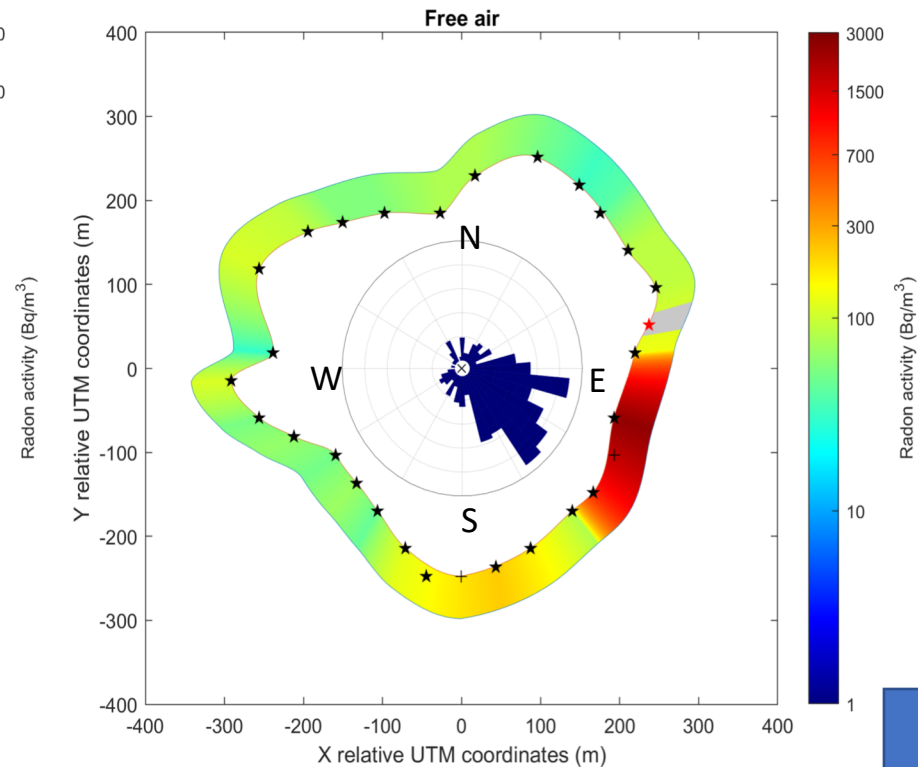
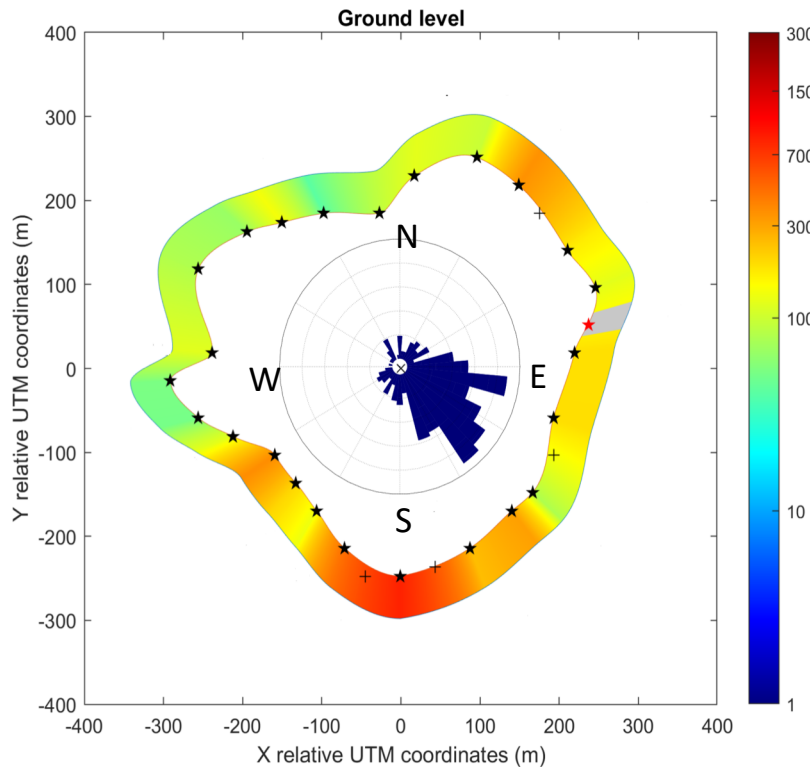
De l'ordinateur au terrain : un vide à combler pour la mesure du radon
→ Point de départ de la collaboration LPC-LMV en 2017

1^{ère} idée: utilisation de la dosimétrie passive pour mesurer le radon dans les gaz

Etude de la variabilité spatiale de l'activité radon dans l'air au niveau des cratères sommitaux de l'Etna (mai - octobre 2018)



Dosimètres DPR2 (film LR115), Algade



Mise en évidence pour la première fois d'un fort enrichissement en radon des gaz magmatiques primaires du panache de l'Etna

(Terray et al., 2020a)

Est-il possible de mesurer simultanément le radon et le déséquilibre $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Bi}/^{210}\text{Po}$ dans le panache ?

2^{ème} idée: spectromètre α - β - γ de terrain

Électronique

- acquisition de données (DAQ)
- alimentation HT/BT

+ 0.5 ETP (IE)

Mécanique

- châssis d'alignement
- intégration
- tropicalisation

+ 0.5 ETP (T)

Simulation Monte-Carlo

- modélisation de la réponse du détecteur (efficacité)

Métrologie

- étalonnage
- modélisation statistique de l'incertitude

mesure du radon via ses descendants de vie courte piégés sur filtre



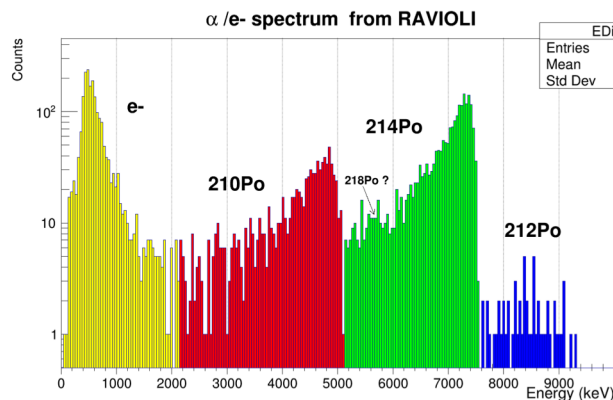
Performances : **x300** en sensibilité, **/7** en encombrement

Indicateurs :

30 keuros
3 ETP

5 ans
2 stagiaires

6 missions
2+ publications, **1** prix



Cassette porte-filtre

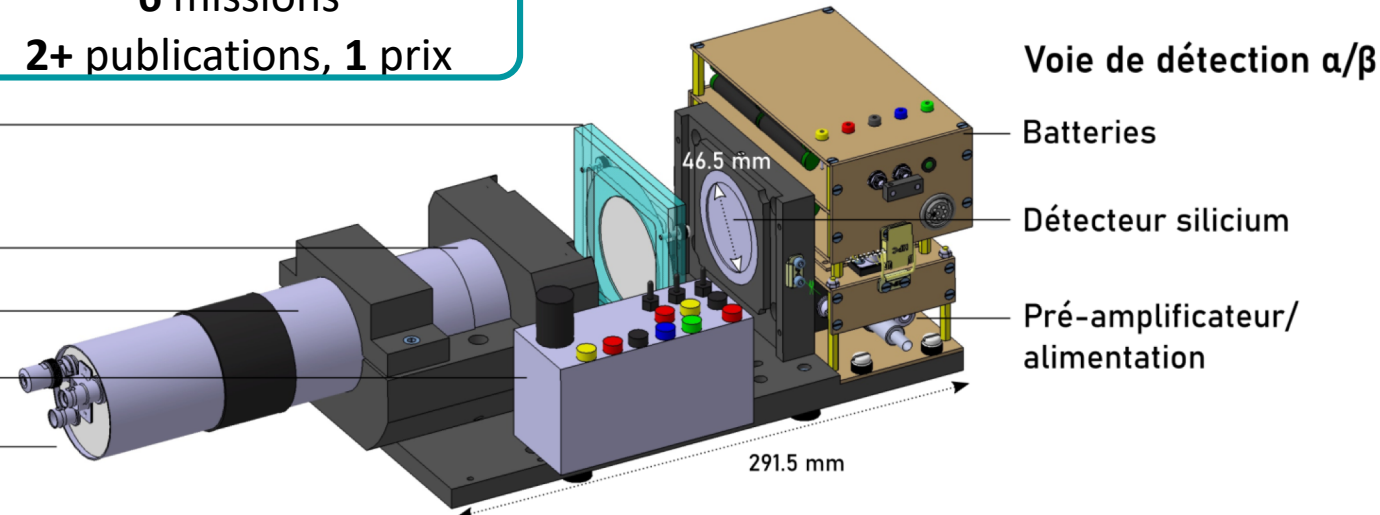
Voie de détection γ

Cristal scintillant

Photo-multiplicateur

Générateur HT

Pré-amplificateur/
alimentation



Pourquoi développer un système d'acquisition?

- Avant 2020 : version utilisée sur le terrain basée sur des composants sur étagère



Pc portable
Pour l'interfaçage avec le système
d'acquisition et le stockage des
données

Système de prise de mesure du
commerce CAEN
+ batterie d'alimentation

Détecteur PIPS + pre-ampli
+ alim détecteur
+ socle de positionnement du filtre
pour la mesure

1^{ER} bilan du système à cette époque :

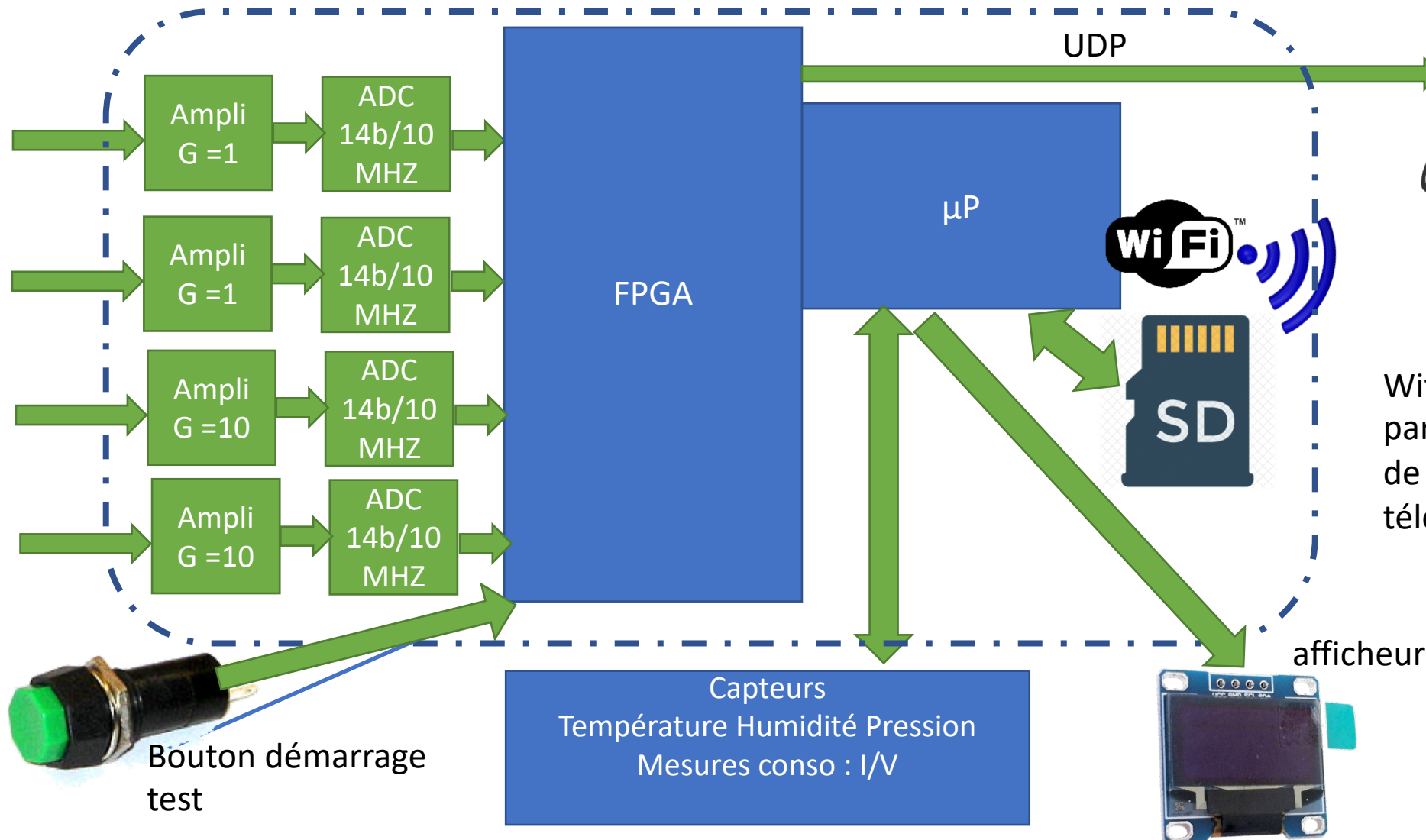
- Compatible Détecteur PIPs 😊
- Compatible Détecteur PMT 😊
- Acquisition des données provenant du capteur :
 - Analyse en direct : 😊
 - Stockage des données 😊
- Portabilité : bof 😞
- Mise en œuvre simple du système : 😞
- Consommation électrique :
 - ➔ beaucoup de batteries
 - ➔ peu d'autonomie 😞

➔ Objectif :

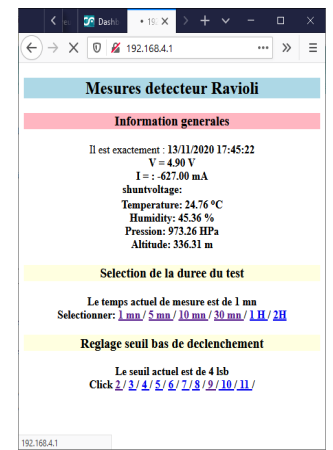
- ➔ **Système plus compact**
- ➔ **moins énergivore**
- ➔ **Portable**
- ➔ **Tout en gardant la qualité des données mesurées**

systeme d'acquisition: Hardware

Acquisition des données pour réglage du système où connaissance du détecteur



Wifi: donnée de paramétrisation et visualisation de l'état du système sur téléphone

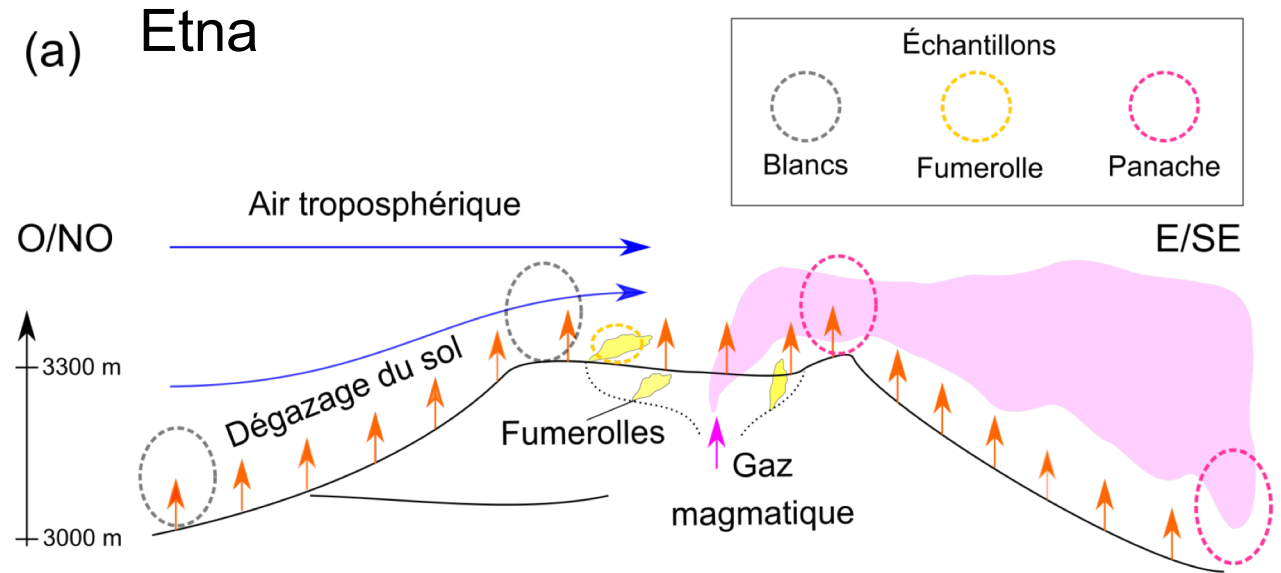


Apports et limites du RAVIOLI à l'Etna

2018-2020: mesures avec le spectromètre RAVIOLI à l'Etna:

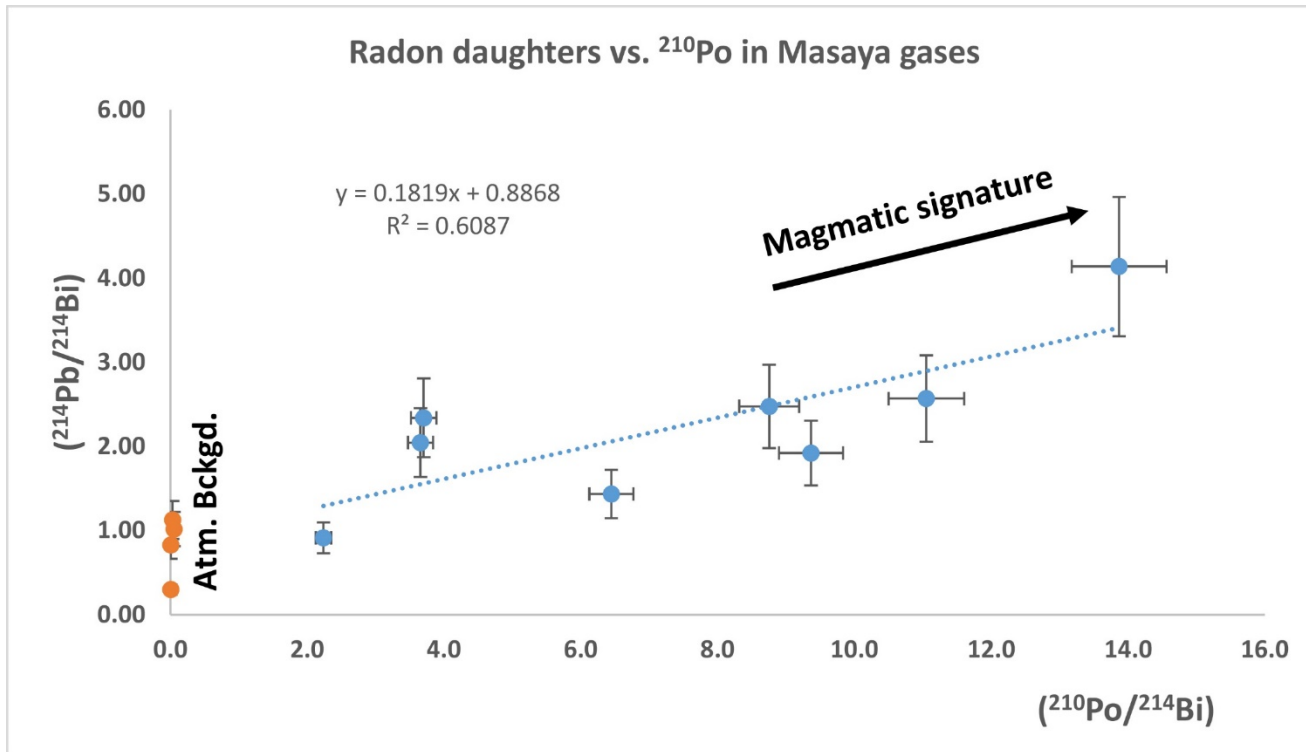
- problème de maîtrise du bruit de fond en présence de panache dilué
- > limite supérieure sur le radon dans le panache

2021-2022: mesures avec RAVIOLI sur le volcan Masaya au Nicaragua



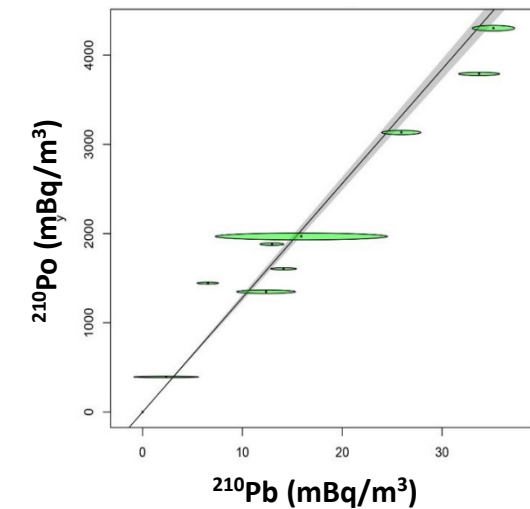
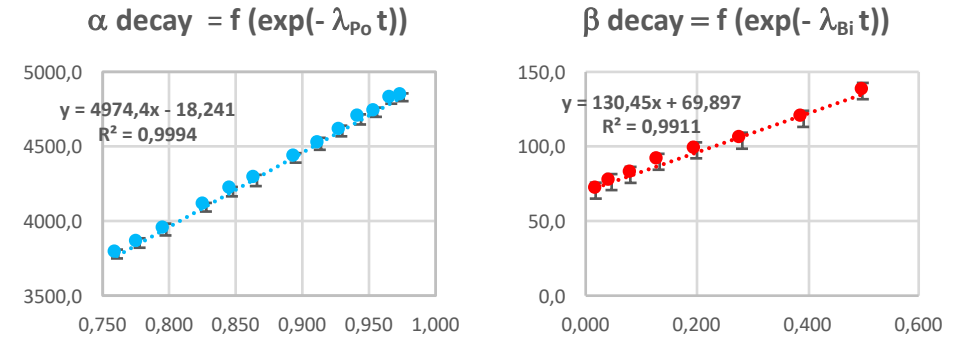
Utilisation de RAVIOLI sur le Masaya, Nicaragua

Analyse in situ et temps réel des descendants de vies très courtes de ^{222}Rn (^{218}Po à ^{214}Po) prélevés sur filtres



Première mise en évidence d'un excès de radon dans les gaz du Masaya par la mesure indirecte de ses descendants

+ Analyse différée au LMV des descendants de vies courtes de ^{222}Rn (^{210}Pb à ^{210}Po) sur les mêmes filtres par comptage global α - β (LB4200 Mirion)





Intégration du déséquilibre ^{222}Rn - ^{210}Pb - ^{210}Bi - ^{210}Po dans le modèle de dégazage

→ Contraintes accrues sur la dynamique du processus de dégazage en relation avec l'activité éruptive actuelle (dégazage à conduit ouvert depuis un lac de lave)

→ Temps de transfert des gaz : ~ 2.2 j ($z \sim 5\text{km}$)

- Plutôt superficiel

→ Temps de résidence magmatique : ~ 3500 j ($V = 1.8 \text{ km}^3$)

- Plutôt grand

Equivalent au volume de magma impliqué dans la **dernière éruption Plinienne** (remodelage caldeira 2000 BC)

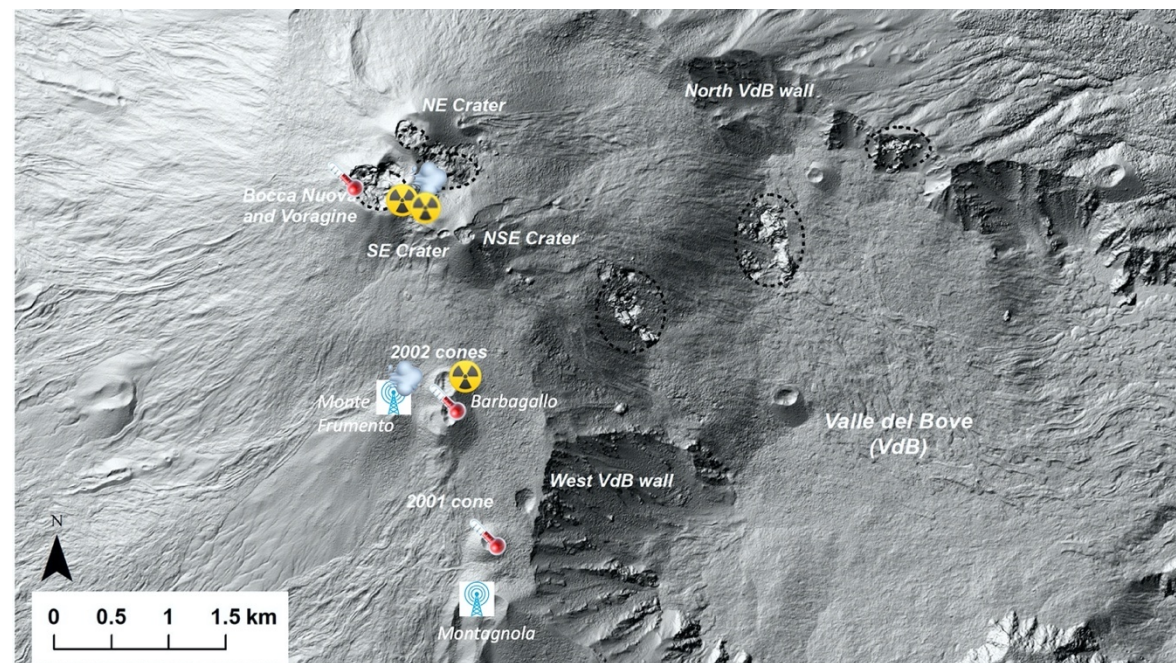
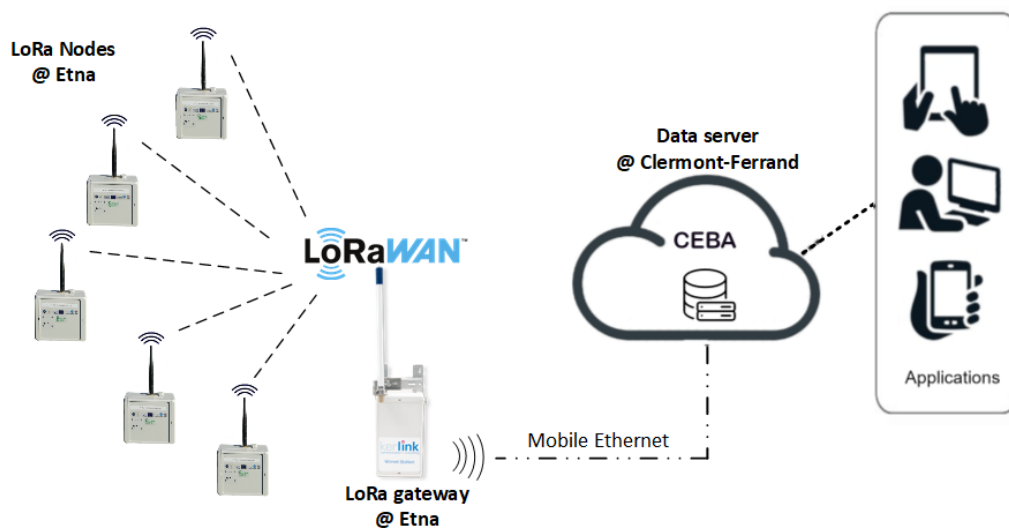
→ Le potentiel pour un nouveau paroxysme est actuellement présent sous le volcan



3^{ème} voie : mesure continue du radon par un réseau de balises radon

Déploiement d'une chaîne opérationnelle complète du capteur au cloud basée sur les technologies de l'Internet des Objets (IoT)
Développements innovants @LPC *et al*:

- nœuds communicants
- lac de données (Data Lake)

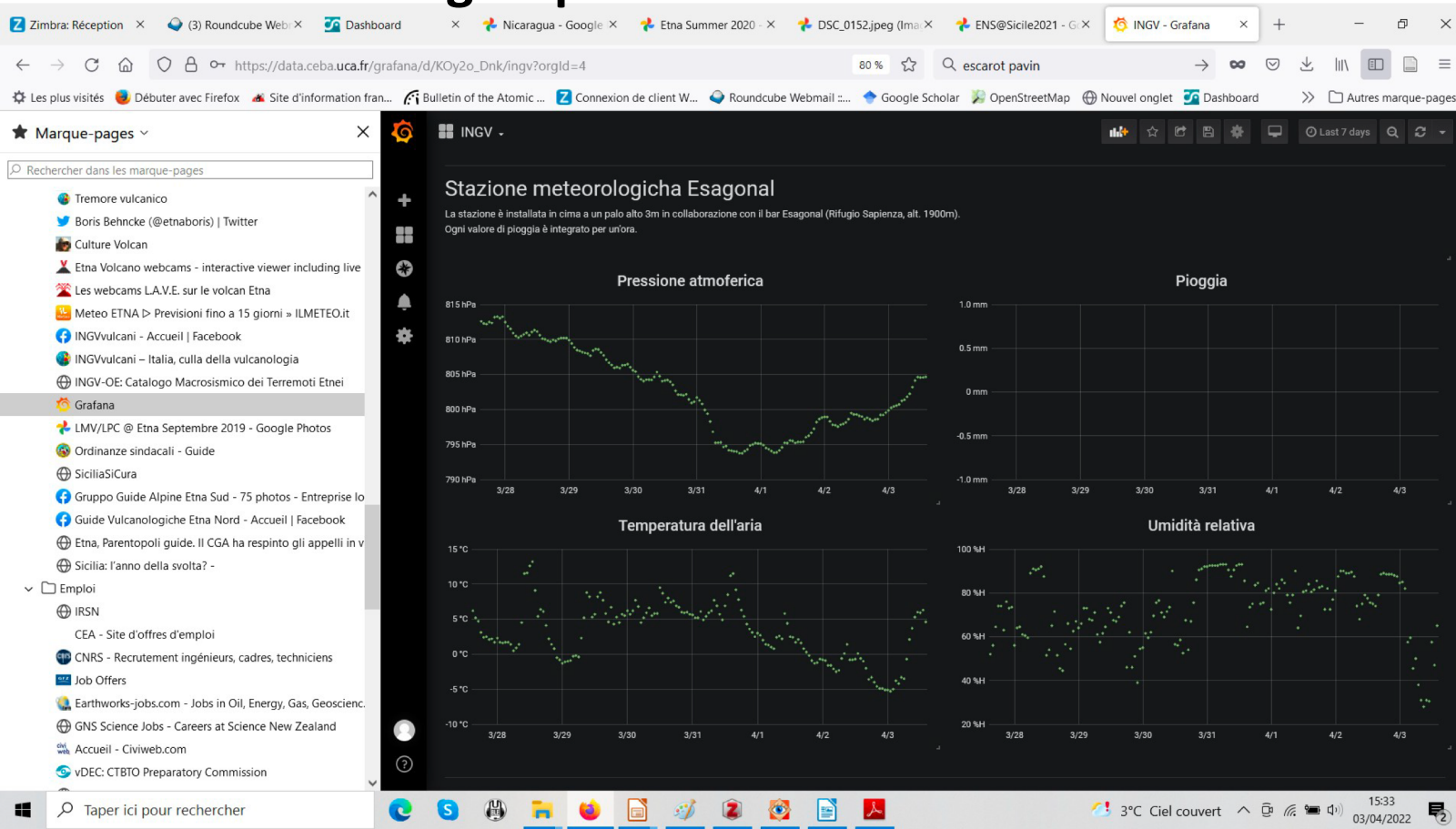


Des résultats prometteurs, mais aussi des défis à relever...

Tropicalisation indispensable

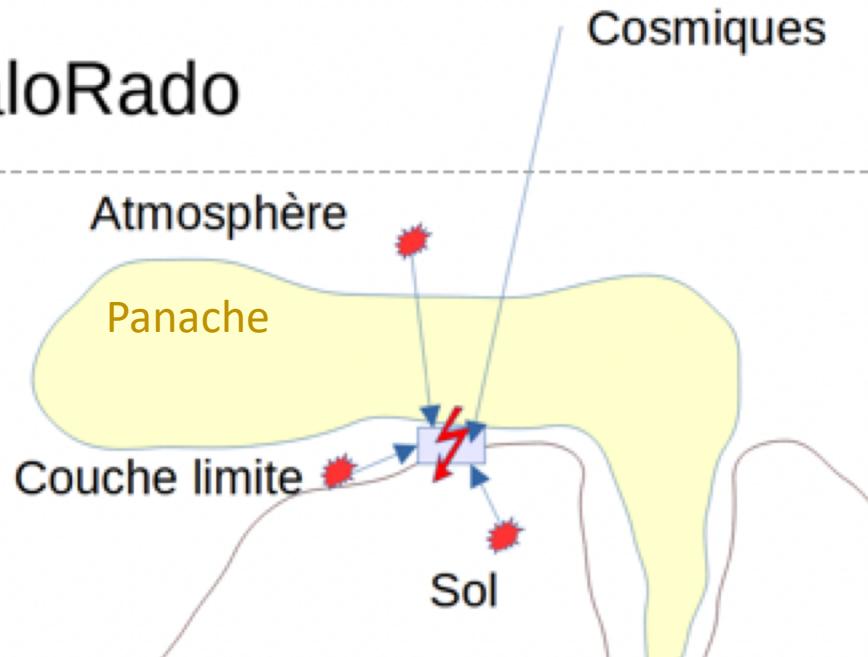
Matériel exposé en cas d'éruptions (>60 paroxysmes en 2021)

Autonomie énergétique



4^{ème} voie : mesure continue du radon avec un spectromètre autonome => le projet CALORADO

CaloRado



Principaux défis:

- extraction du signal radon issu du panache
- tropicalisation
- autonomie énergétique



Alimentation HT et BT:



Détecteur :
PMT +
cristal NaI

Système d'acquisition



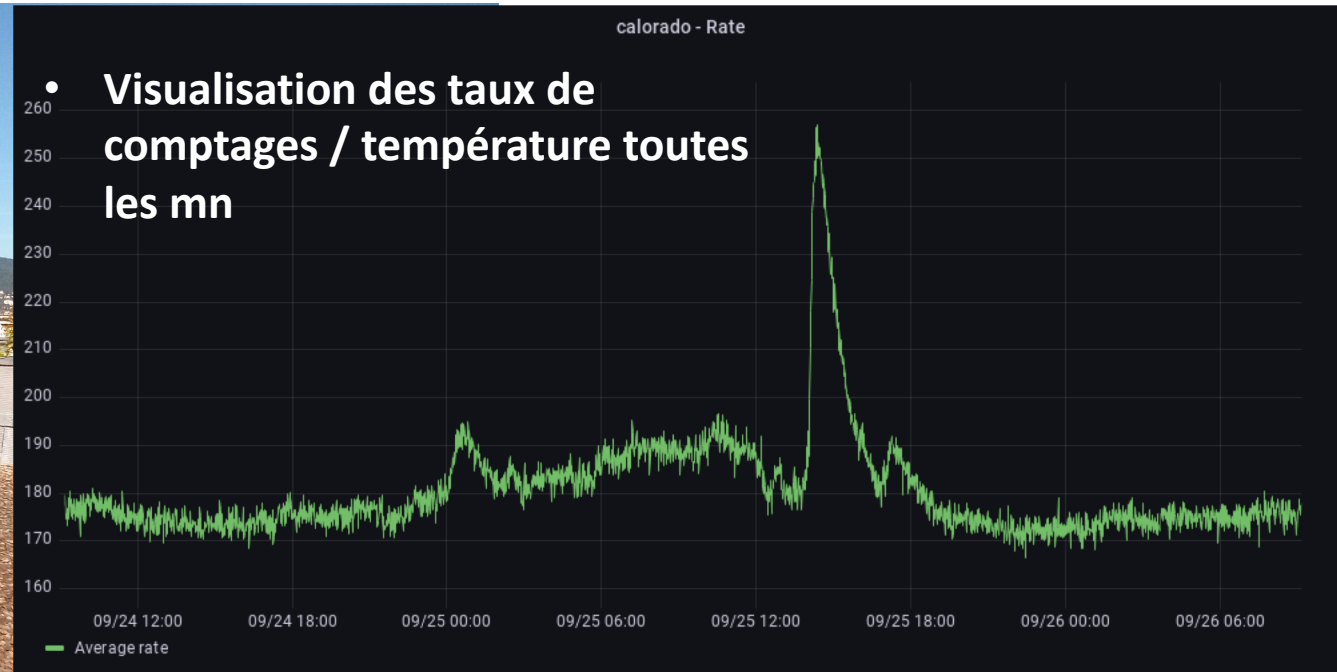
Taux de comptage réel: ~70 cps /s

Installation sur le toit du LPC

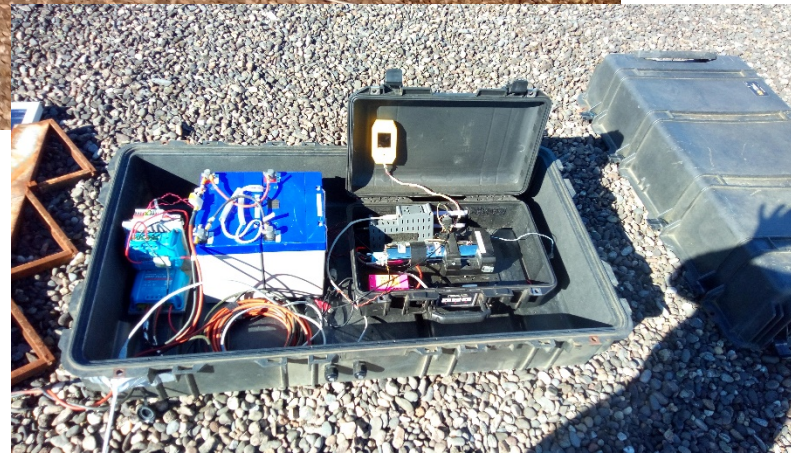


Panneaux solaires pour l'alimentation du système

Câble Ethernet pour la connexion au réseau du labo

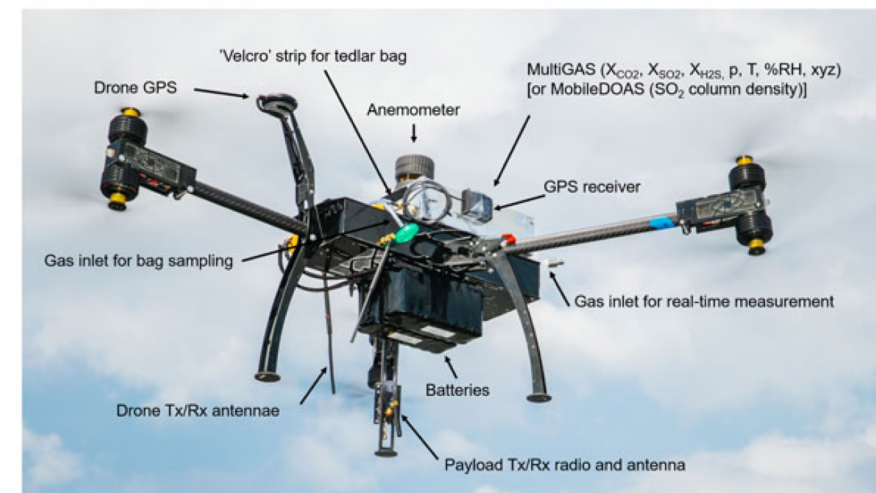
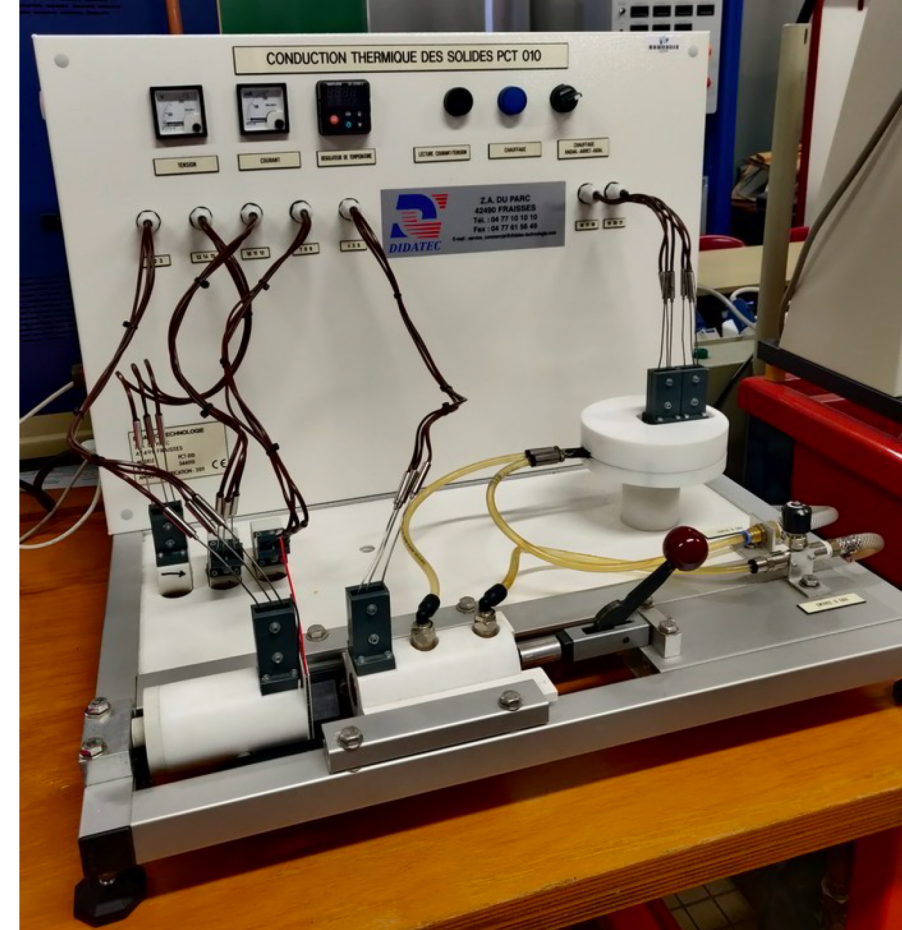


- En cours:
 - Analyse des séries temporelles
 - Simulation inverse des sources e rayonnement



Conclusion - perspectives

- La mesure des déséquilibres radioactifs dans le panache des volcans actifs apporte des informations fondamentales sur la dynamique des éruptions
 - Mesure du radon essentielle à l'interprétation des déséquilibres
- Depuis 5 ans, le LPC développe une instrumentation nucléaire originale et innovante en collaboration avec géochimistes et volcanologues de l'INSU. Les défis:
 - Tropicalisation
 - Autonomie énergétique
- Perspectives
 - Mesure continue par calorimétrie
 - 5^{ème} voie: mesure sur drone



Merci pour votre attention

