

TOMOGRAPHIE DENSITOMETRIQUE TEMPORELLE PAR MESURE DE MUONS – T2DM2 –

Stéphane GAFFET, Pierre SALIN, Gilles BOGAERT et al.

Observatoire de la Côte d'azur

UMR Géosciences Azur

UMR Artemis

UMS Galilée

COLLABORATION

CEA/IRFU, Université de Sheffield, Géosciences Montpellier, Géophysique spatiale et planétaire (IPGP), Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse (EMMAH), Université de la Méditerranée (CPPM), CFN Lisbonne, CERN

INTERDISCIPLINAIRE

Astroparticules

Imagerie sismique

Gravimétrie

Hydrogéologie

Mécanique des roches

Imagerie EM

QUESTION FONDAMENTALE :

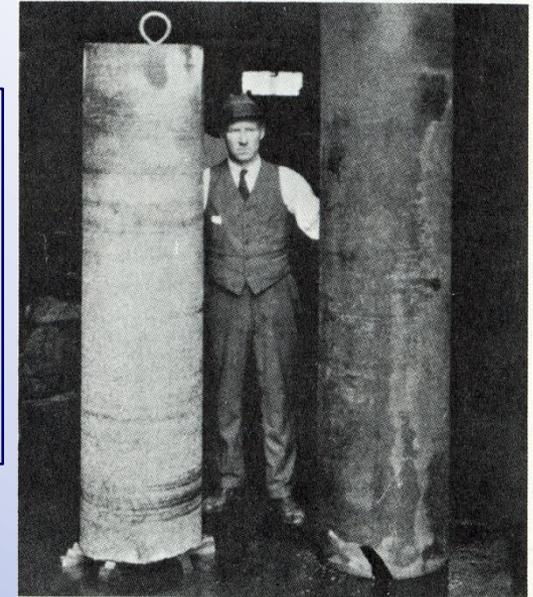
Quels sont les paramètres mécaniques de la roche à l'échelle d'un massif ?

- Mesures sur des échantillons de petites échelles ou de grandes tailles



**Les paramètres mécaniques
sont inconnus à l'échelle
d'un massif :**

**Contrainte effective ?
Friction effective ?
Endommagement ?**



- Méthodes empiriques

Mesure :
Paramètres
mécaniques à
petite échelle



Description qualitative de la
masse rocheuse (échelle,
fracturation, altération
hydraulique, ...)



Estimation:
Paramètres
mécaniques à
grande échelle

Bieniawski (1976), Hoek & Brown (1980)

Déterminer ρ ouvre un nouveau champ de mesure à l'échelle naturelle

Description de la roche dans l'approximation élastique :

- Coefficients de Lamé et densité : λ, μ, ρ

Vitesse des ondes dans le sol : $\alpha = ((\lambda+2\mu) / \rho)^{1/2}$, $\beta = (\mu / \rho)^{1/2}$

- Module d'Young et coefficient de Poisson : E, ν

Contrainte uniaxiale ($\sigma = E \epsilon$), $E = (3\lambda+2\mu) \mu / (\lambda+\mu)$, $\nu = (2-(\alpha/\beta)^2) / (2-2(\alpha/\beta)^2)$

- Coefficient de compressibilité et module de cisaillement : K, G

Modules et coefficients élastiques sont liés : $1/E = 1/9K + 1/3G$

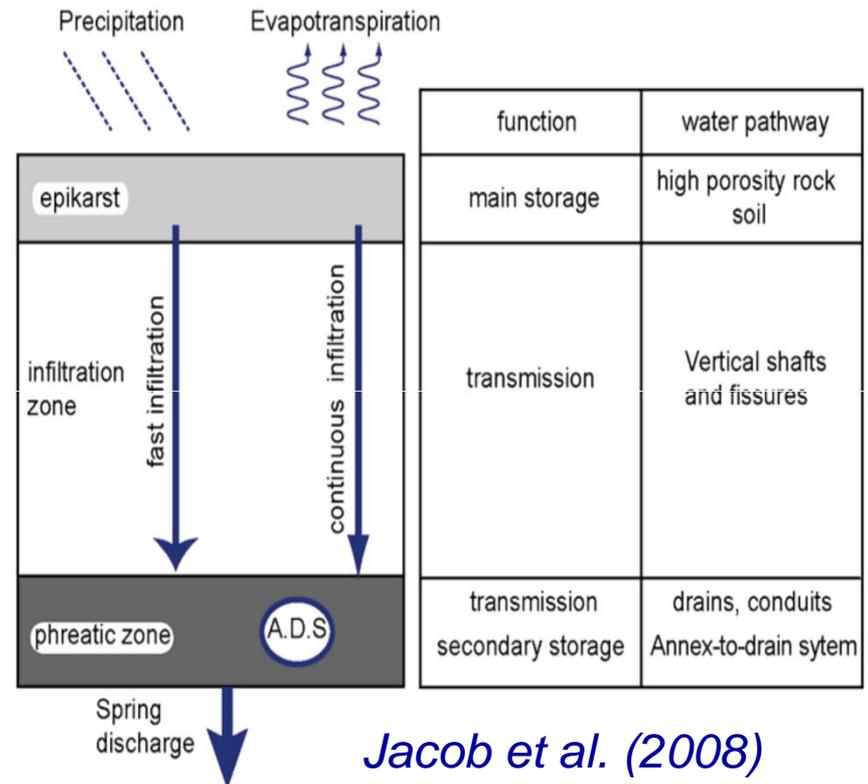
Problématique du massif réel

• Un édifice complexe

- Endommagement (évolution de la fracturation, érosion interne, ...)
- Circulation fluide (altération chimique, variation de la porosité, ...)

• Une évolution temporelle

- Phases pré/post-éruptives des volcans
- Gestion des ressources et des réserves (environnement, hydrologie des karsts)
- Milieu encaissant des stockages (CO_2 , déchets chimiques, nucléaires, ...)
- Ingénierie souterraine (ouvrages, mines)



DETERMINER ρ - PRINCIPES DE LA MESURE

1) Mesure de l'énergie des muons

Utilisation des rayons cosmiques dans le but de détecter la présence d'une chambre secrète dans la pyramide de Chephren (Alvarez, 1970) - Les muons traversant une cavité perdent moins d'énergie par interaction comparativement à la traversée de la roche calcaire composant la pyramide.

2) Mesure du flux de muons

Mise en évidence pour certains azimuts de différences entre le flux de muons attendu et le flux effectivement mesuré au niveau du détecteur sur le site de l'expérience de Chooz (Baldini et al., 1995) – Cette différence est attribuée à la traversée d'un niveau géologique de plus forte densité pour ces azimuts et zéniths spécifiques.

Dans le cas du volcan Asama, Tanaka et al. (2005) montre qu'il est possible de distinguer des contrastes de densité de l'ordre de 1 à 3%.



OBJECTIFS DU PROJET T2DM2

Accéder à une nouvelle mesure en géosciences pour la caractérisation mécanique des matériaux de subsurface

Générer un instrument versatile et modulable pour la communauté nationale

Méthodologie pour la muoscopie

Contrainte : Dimensions, géométrie du massif, échelle de temps des processus, ...

Simulation numérique (Music, Kudryavtsev et al., 2008) préalable pour calibrer :

- Durée d'exposition vis-à-vis de l'échelle de temps relative aux processus observés
- Couverture géométrique et topologie du réseau de télescope et précision du champ de vue et de la surface de chaque détecteur,
- Nombre de détecteurs
- Résolution spatiale possible en fonction de géométrie relative massif / réseau

Muoscopie - Densitométrie

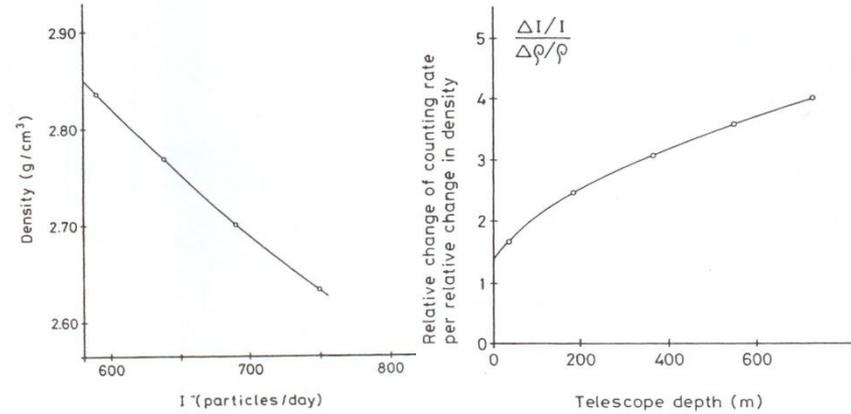
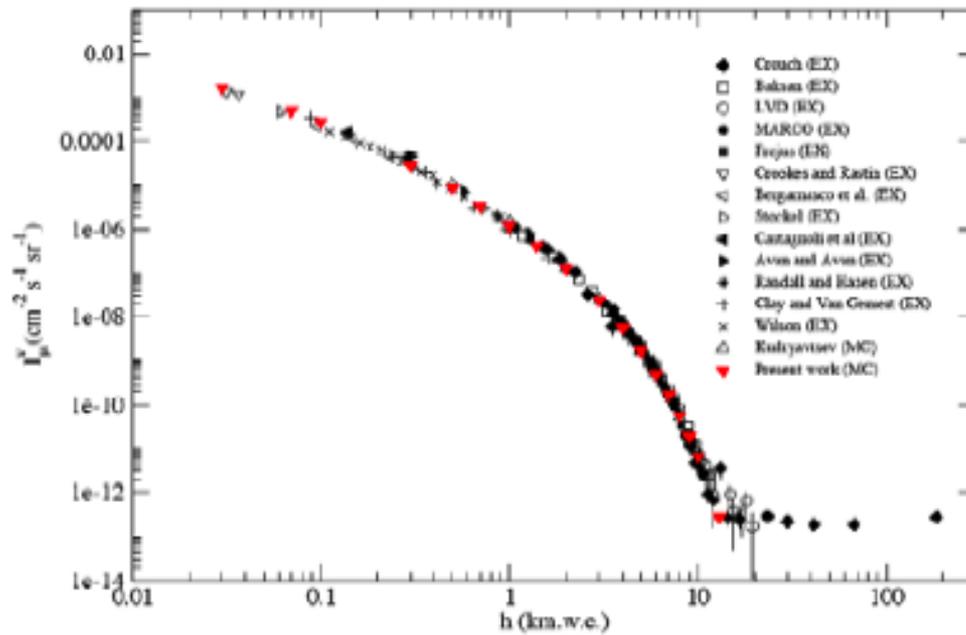
- Construction de 4 prototypes et mesures
- Mise en place des codes d'inversion tomographique /simulation (Géant, Music)
- Couplage entre imagerie densitométrique et imagerie sismique (module d'Young)
- Couplage des mesures spatio-temporelles de la densité et des variations du champ de pesanteur (localisation, dynamique des flux hydrauliques dans la ZNS)

CONCEPTION D'UN RESEAU DE TELESCOPES BASEE SUR LA SIMULATION

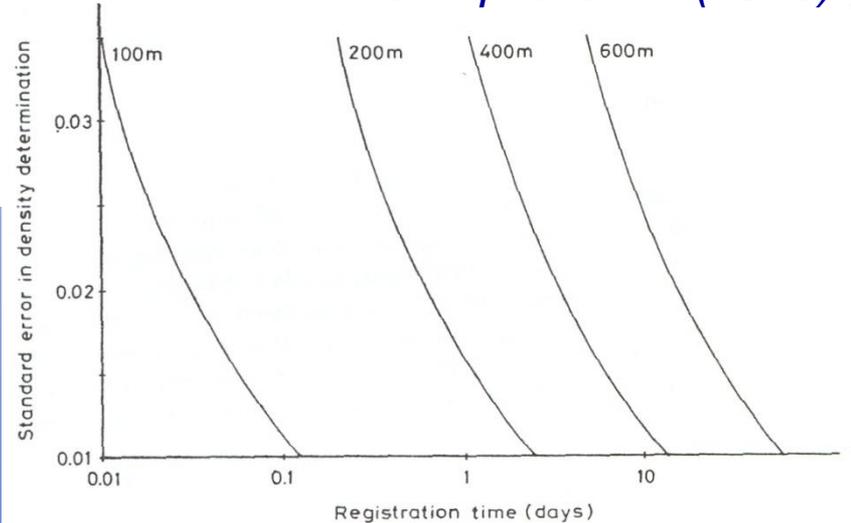
Pour chaque télescope (1/2):

- Taux de comptage

Nombre de muons par m² par jour par sr : fonction de l'épaisseur et de la densité a priori des matériaux traversés



$\Delta \rho$ (g/cm³) *Malmqvist et al. (1979)*



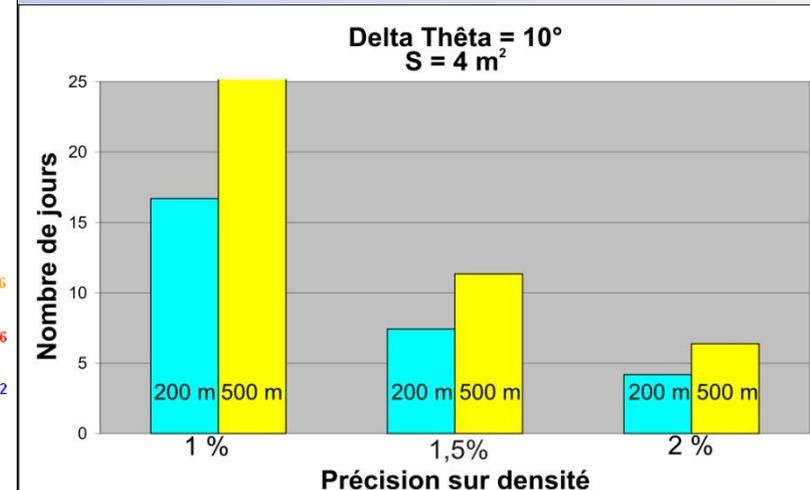
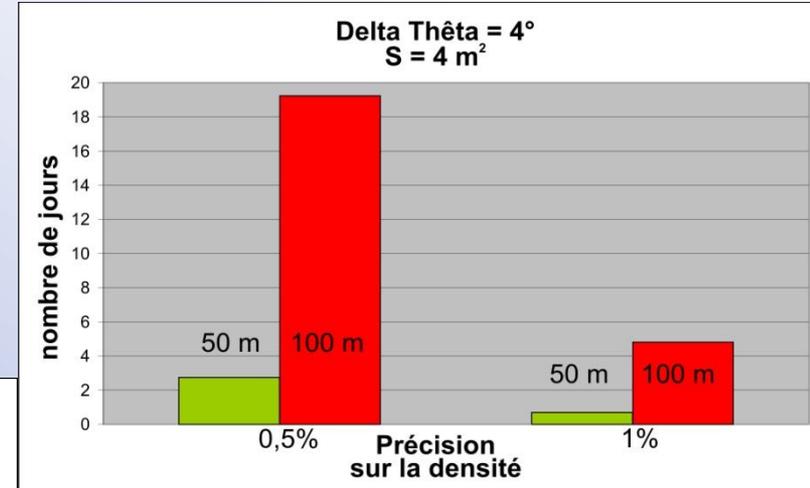
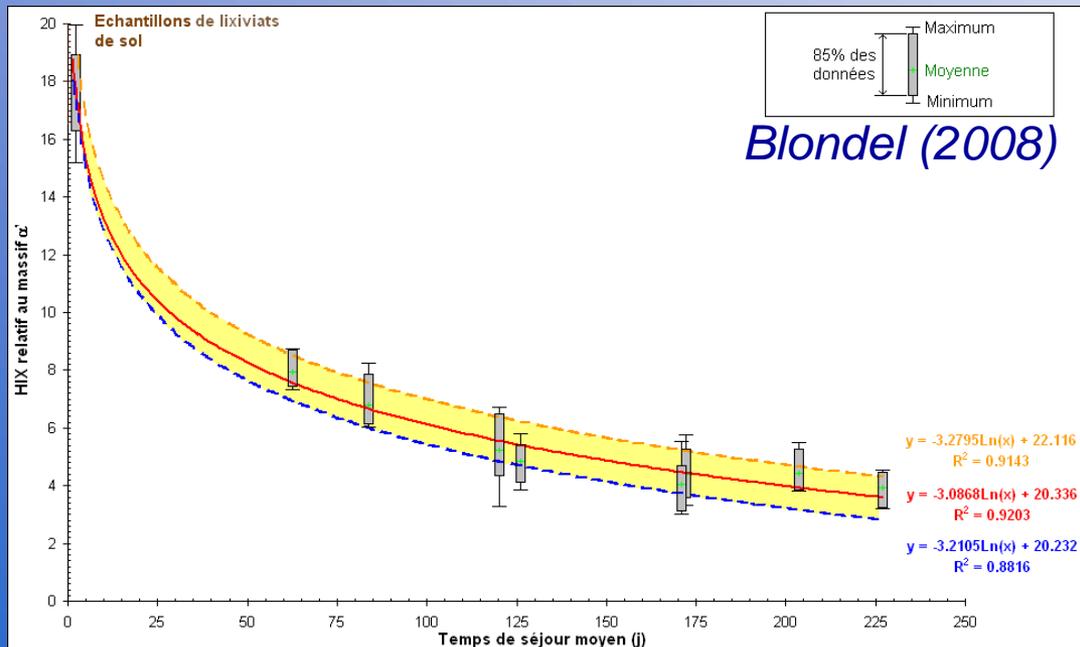
Particle data group, cosmic rays (2008)

CONCEPTION D'UN RESEAU DE TELESCOPES BASEE SUR LA SIMULATION

Pour chaque télescope (2/2):

- Temps d'exposition vs surface du télescope

La résolution temporelle dépend de la vitesse des processus physiques observés, lesquels font varier la densité, et de la durée de résilience du milieu. La surface requise dépendra de l'échelle de temps des processus et du taux de comptage.



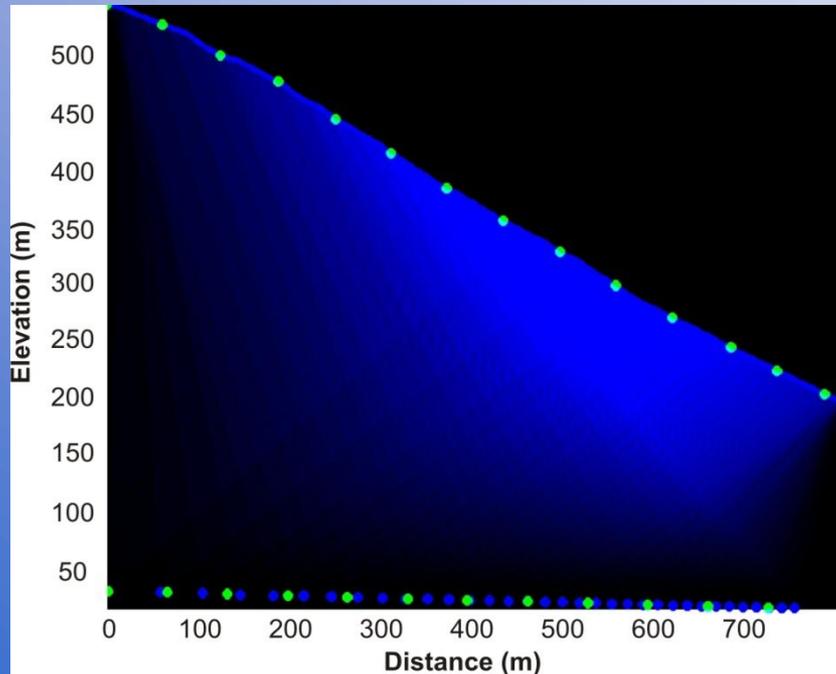
Temps de séjour et durées d'exposition en fonction de la profondeur et de la précision de mesure recherchée

CONCEPTION D'UN RESEAU DE TELESCOPES BASEE SUR LA SIMULATION

Pour constituer le réseau (1/2) :

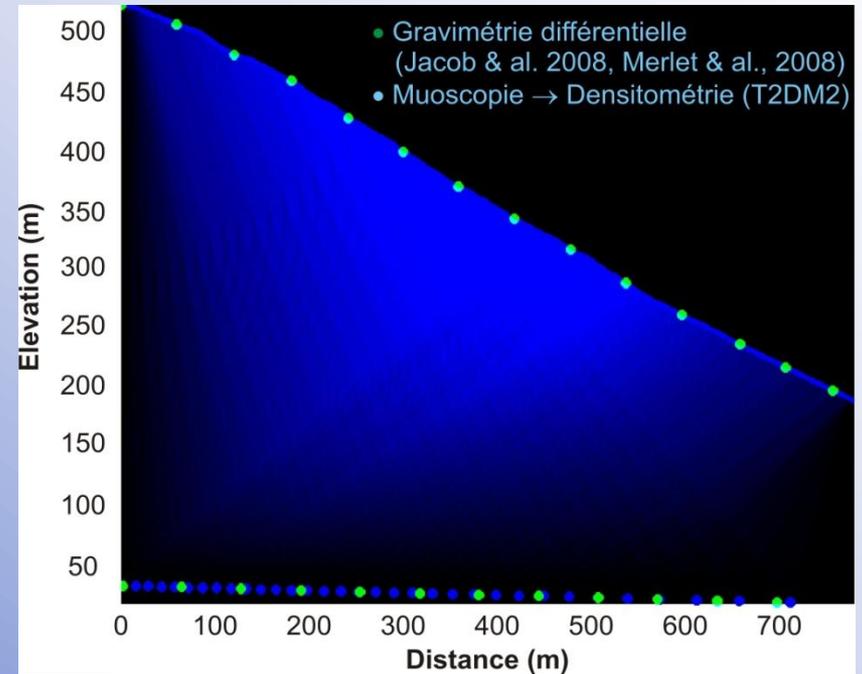
- Résolution spatiale et nombre de détecteurs

La tomographie requiert la redondance des mesures d'absorption suivant différents zéniths et/ou azimuts pour avoir un bon éclairage du milieu. Cela va contraindre l'ouverture globale et la résolution angulaire pour chaque télescope ainsi que la topologie du réseau à déployer et le nombre de télescopes qu'il contiendra.



Simulation

- Optimisation de la couverture
- Surface, ouverture et résolution



Inversion

- Processus itératif nécessitant la modélisation des flux attendus en fonction de la topologie (MUSIC, Kudryavtsev et al. 2008)

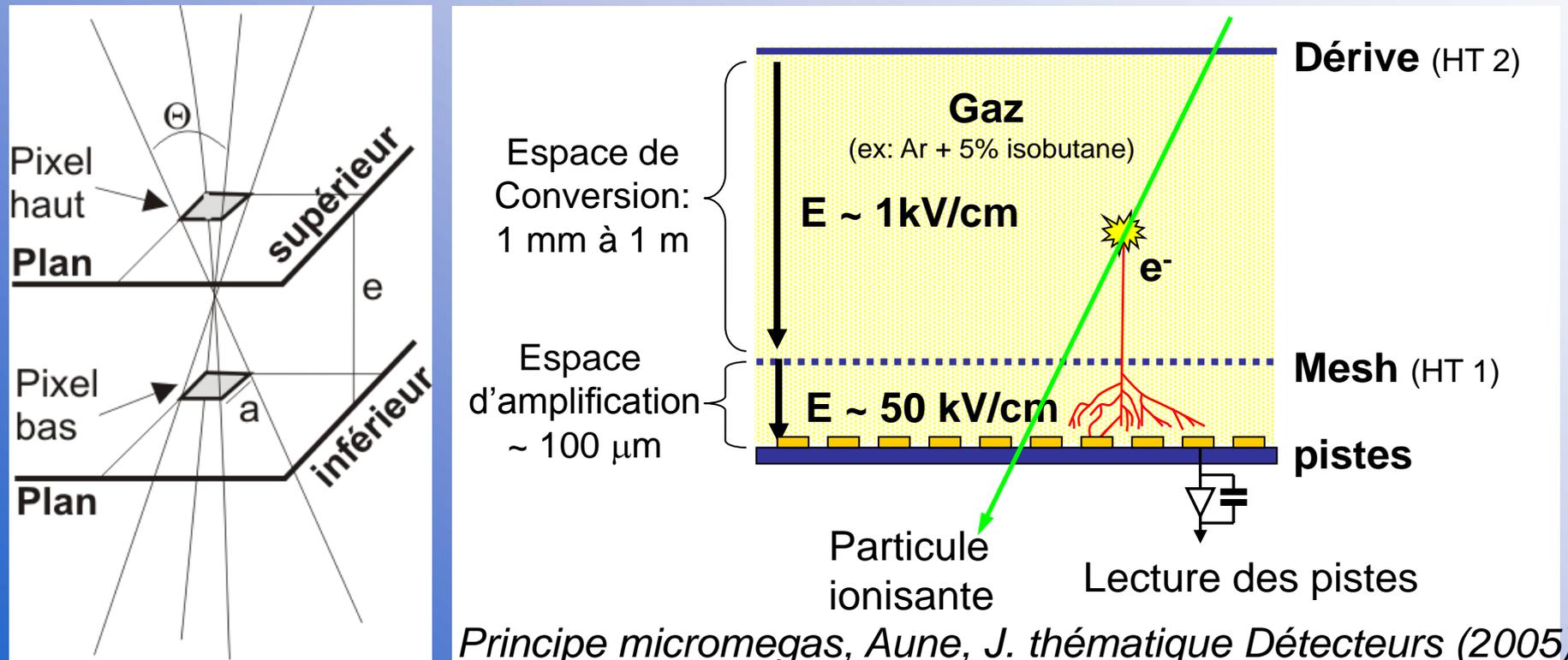
CONCEPTION D'UN RESEAU DE TELESCOPES BASEE SUR LA SIMULATION

Pour constituer le réseau (2/2) :

- Pixellisation

La résolution angulaire impose la taille des pixels pour chaque télescope, la surface des télescopes va donc contraindre le nombre de pixels et l'électronique requise pour le traitement en temps réel, la discrimination et l'acquisition des détections.

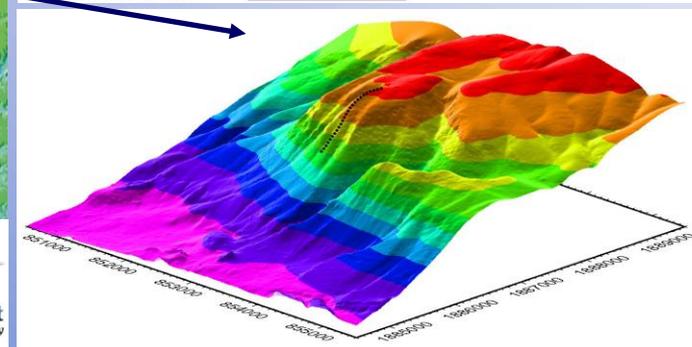
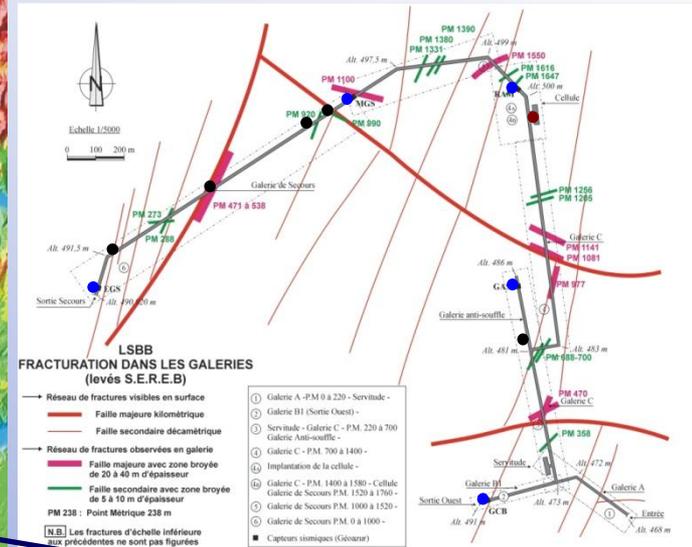
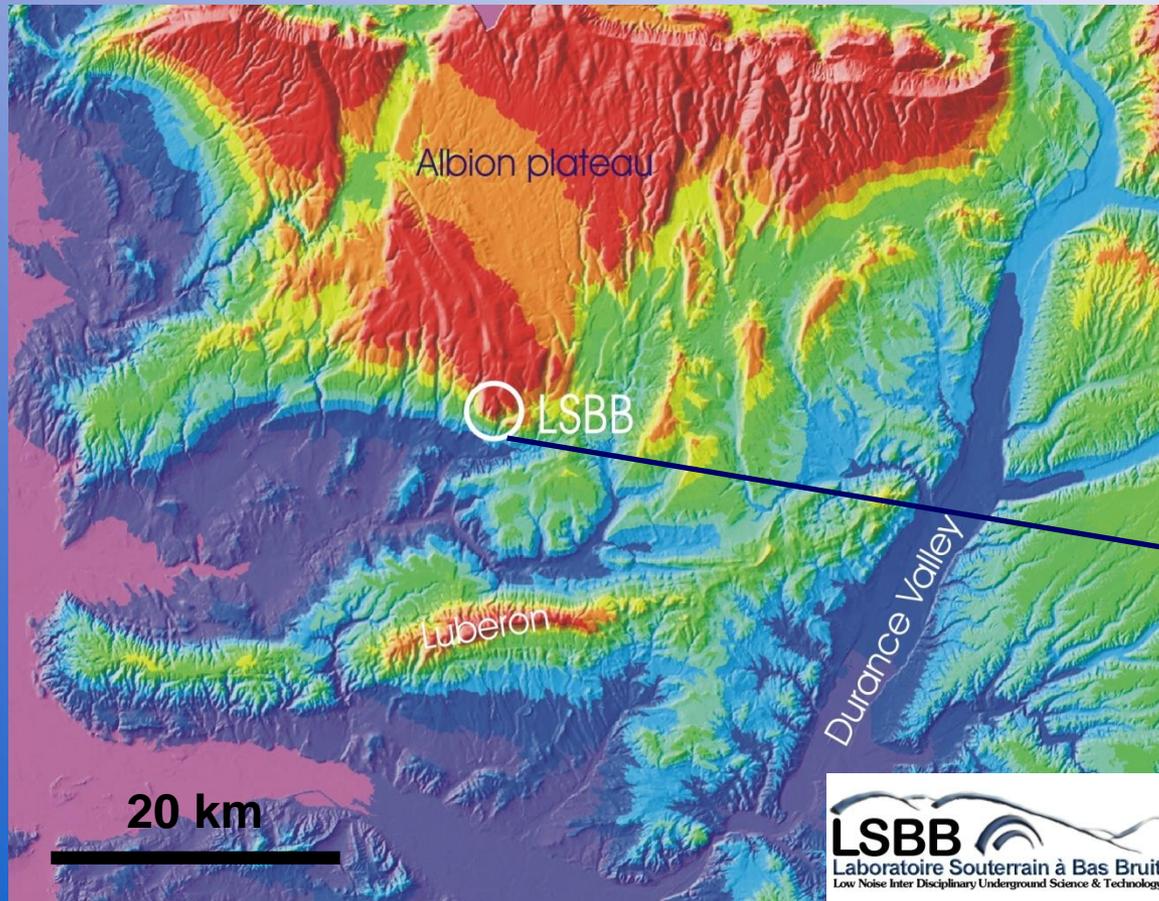
La résolution angulaire, l'ouverture, la surface exposée peut varier pour chaque télescope, il faut donc concevoir un dispositif versatile et modulable



DEVELOPPEMENT ET MISE AU POINT



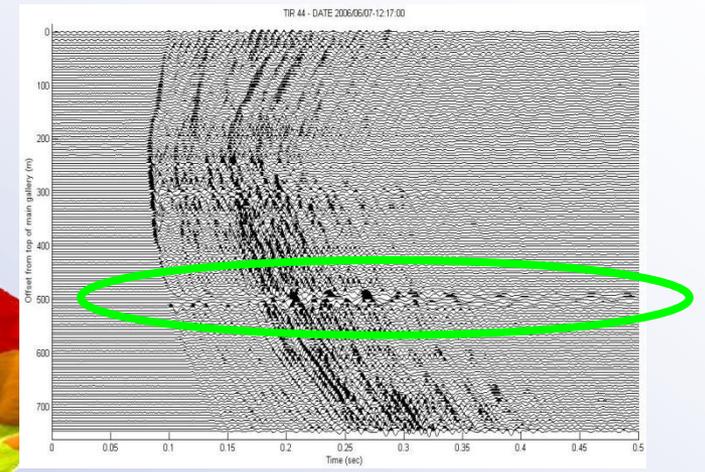
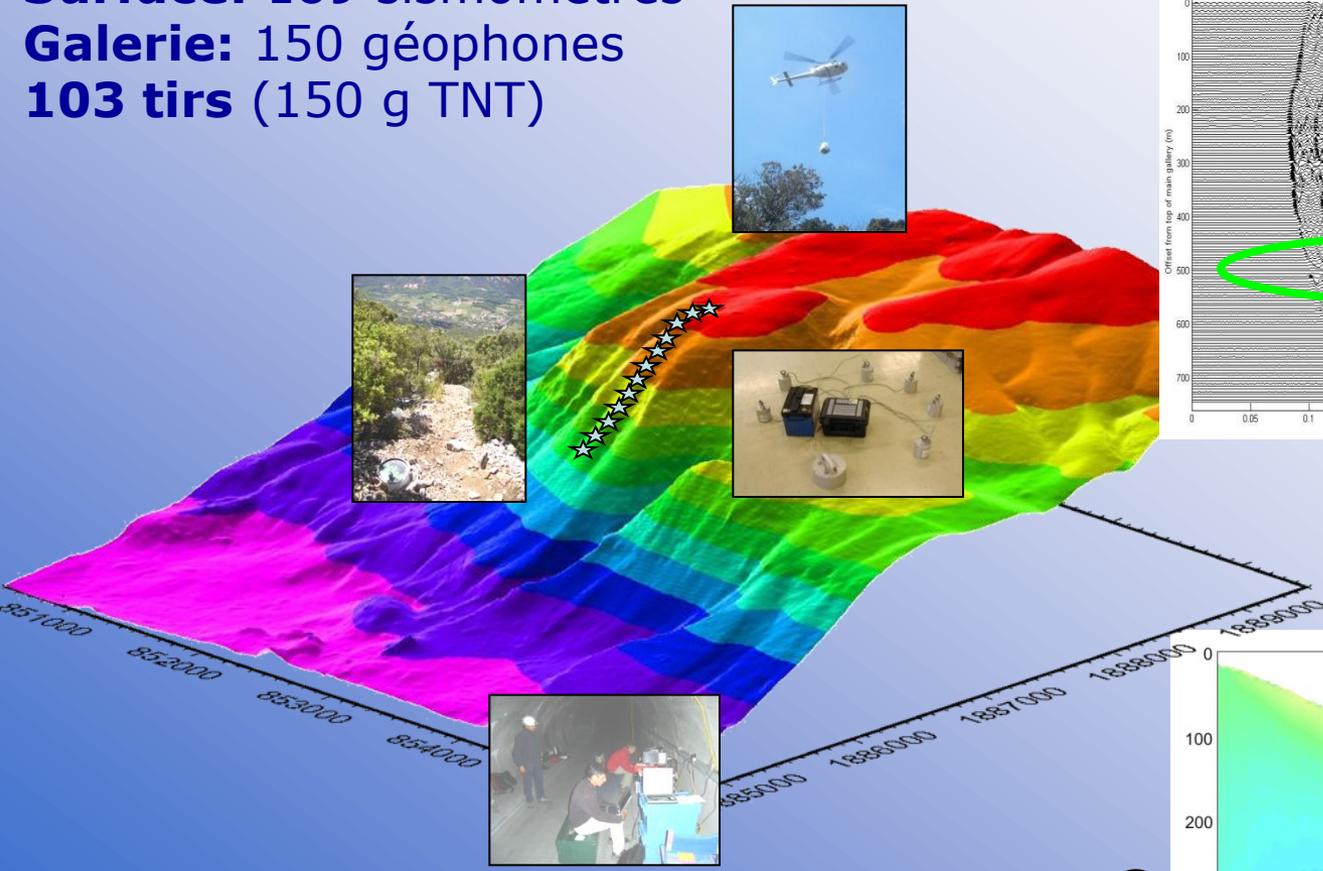
Mise au point expérimentale au LSBB à Rustrel (karst) pour bénéficier de l'association des mesures pluri-paramétriques issues des différents projets scientifiques menés au laboratoire



PROJET INTERIMAGES (2006) : IMAGERIE DES PROPRIETES SISMIQUES

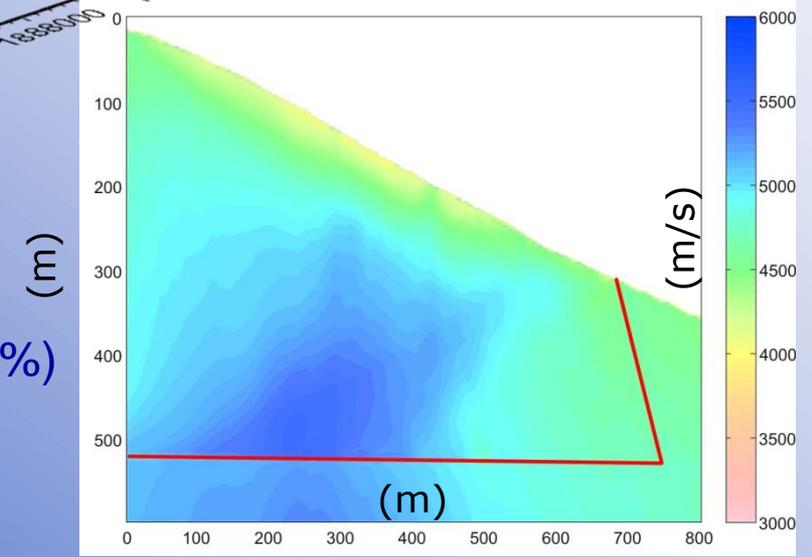
Coll. Géosciences Azur, MIGP, Univ Paris-Sud, Univ J. Fourier, UNAM

Surface: 189 sismomètres
Galerie: 150 géophones
103 tirs (150 g TNT)



Maufroy et al. (2008)

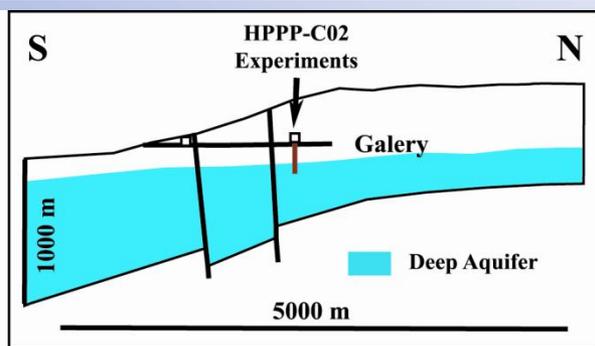
- Zone de forte atténuation (Faille ?)
- Faibles vitesses (vert) Calcaires très poreux (> 7%)
- Fortes vitesses (bleu) Calcaires compacts



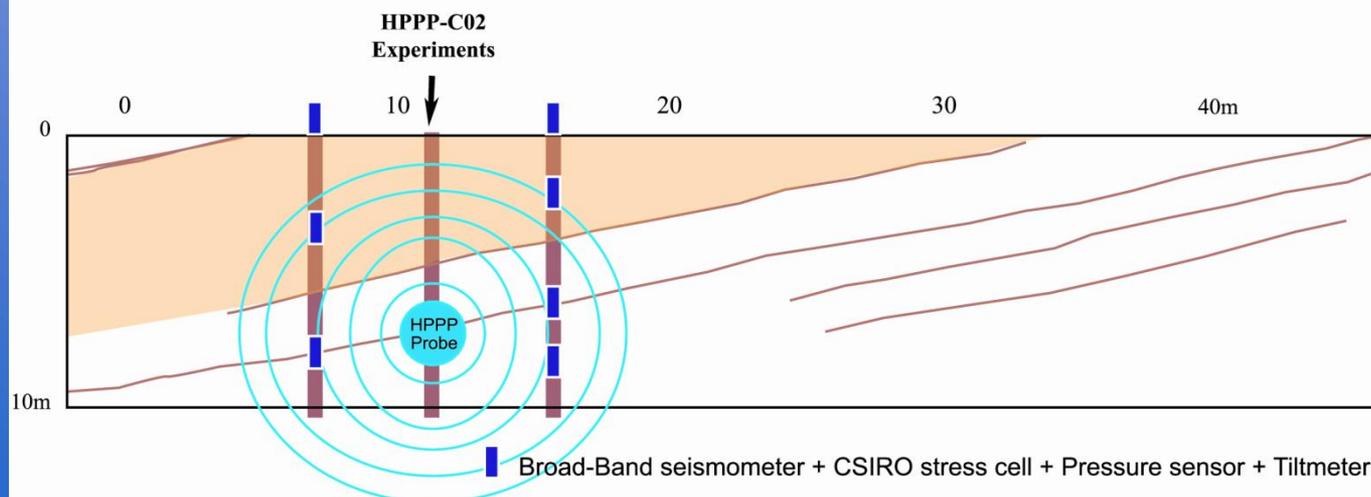
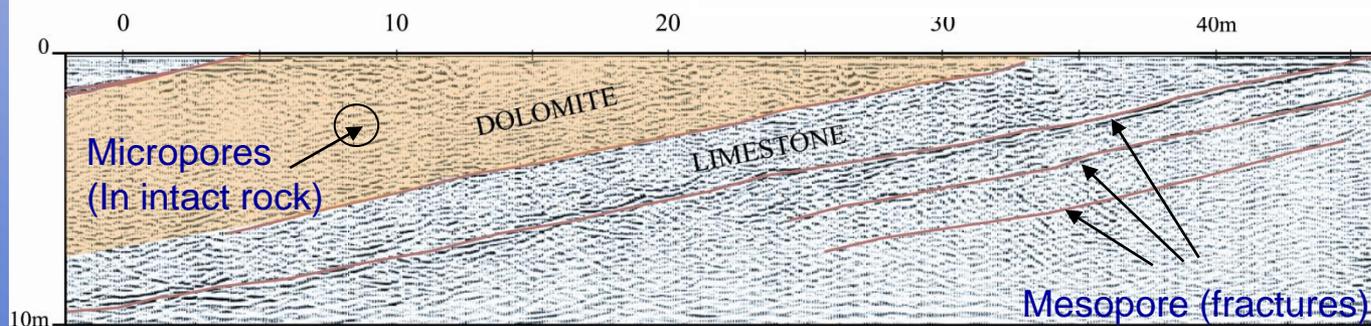
IMAGERIE DE LA DYNAMIQUE DES PROCESSUS PORO-ELASTIQUES

dans un milieu fracturé, partiellement saturé avec une porosité mésoscopique

Coll. ANR HPPPCO2 (in situ), ANR 2008 MAXWELL (EM), ANR 2009 LINES (Gravimétrie)



Projets associés thématiquement ANR HPPPCO2, MAXWELL et LINES. Investigation in-situ en forage de la réponse poro-élastique du milieu aux injections fluide (échelle métrique) – Imagerie EM en galerie et variation de la permittivité (pénétration 10-50m) – Variation du champ de pesanteur suivant l'infiltration météorologique (échelle 100-1000m)



METROLOGICAL DEVELOPMENTS

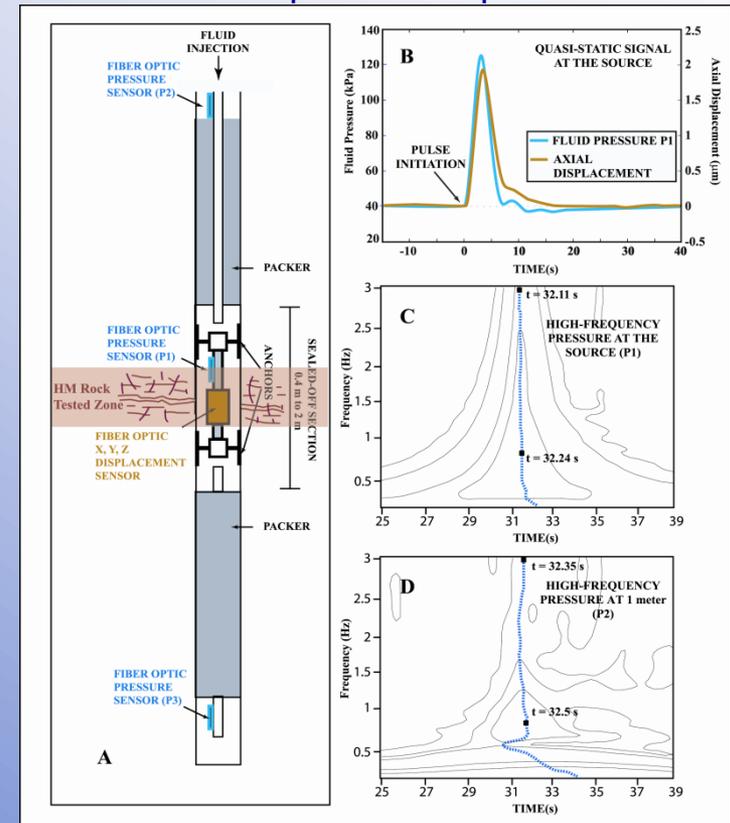
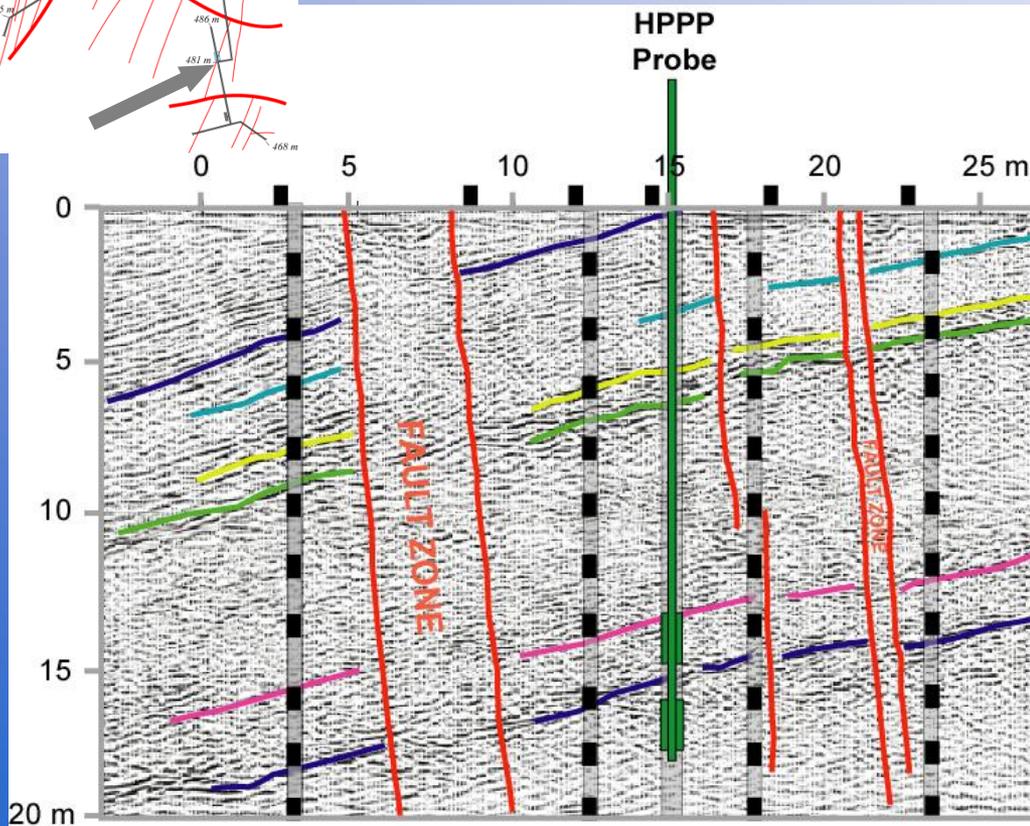
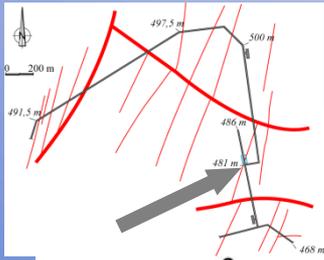
The High Pulse Poroelasticity Protocol (HPPP)

PI Y. Guglielmi – Coll. GSRC, Géosciences Azur, LBL, Stanford

ANR HPPPCO2 (<http://hPPP.unice.fr/>)

Development of innovative protocol for synchronous measurements of fluid pressure, mechanical displacement

Pulse Test: **Test duration:** 0 - 20 secondes
Injected volume: 0 – 10 liters
Induced pressure: 0 – 20 MPa
Sampling frequency: 0.01 – 1 kHz
Accuracy : 10⁻⁷ m
Maximum depth operability: 1 km
Low-temperature dependent



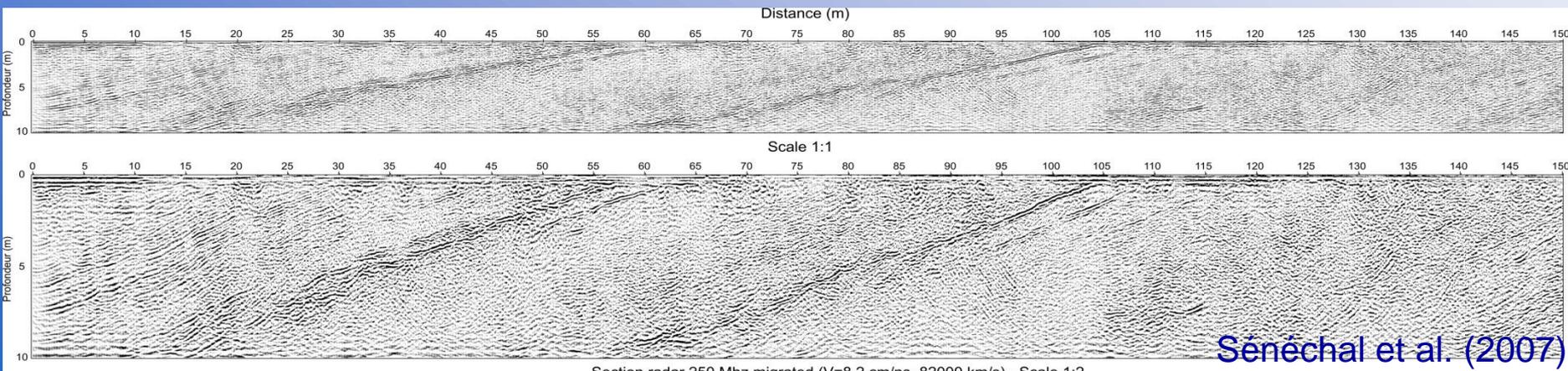
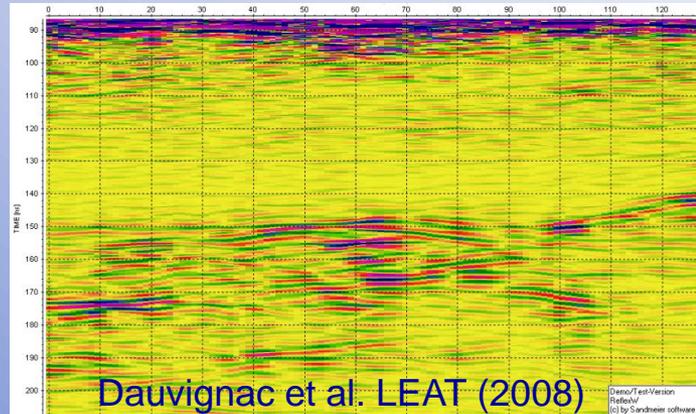
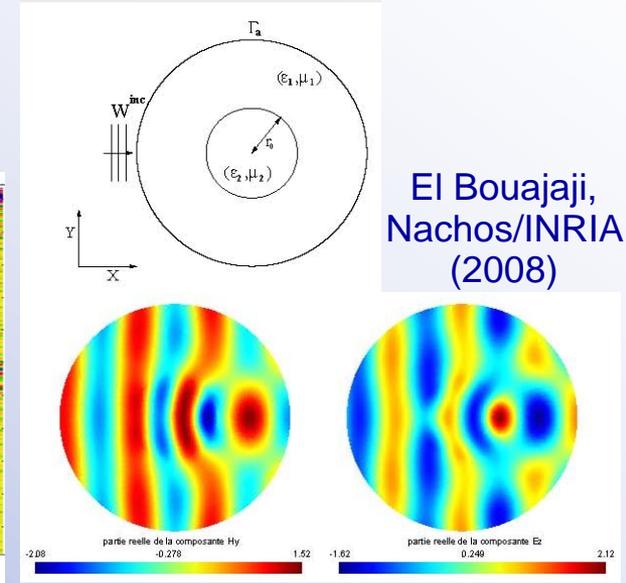
BROADBAND ELECTROMAGNETIC IMAGING

Methodology for imaging (broadband metrology, forward modelling & inversion)

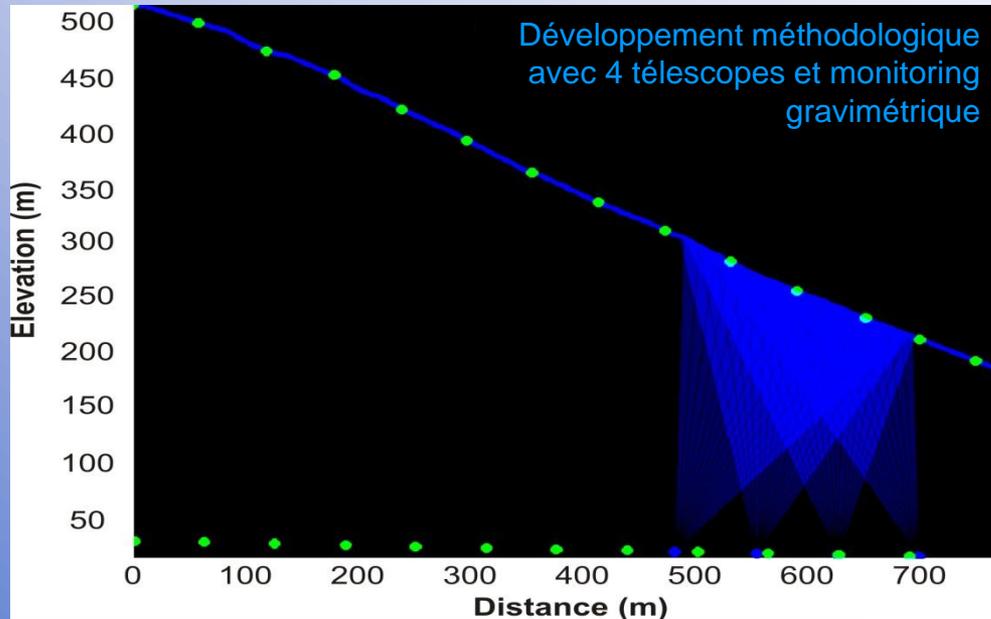
PI C. Pichot – Coll. LEAT, UBC, MIGP, Géosciences Azur, INRIA

ANR MAXWELL (<http://leat.unice.fr/pages/anr-maxwell/anr-maxwell.html>)

Ultra-wideband (0.1-2 GHz), bistatic, multipolarization, wide offset, microwave data acquisition, microwave imaging, and inversion for permittivity



PROSPECTIVES A MOYEN ET LONG TERMES – 5-10 ans



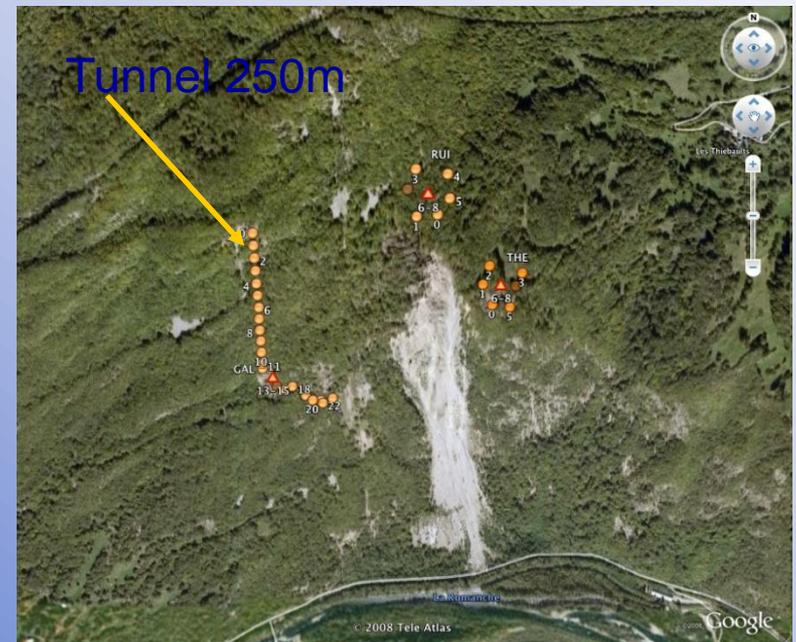
Via le projet T2DM2 :

- Fournir les outils numériques permettant la modélisation du dispositif d'acquisition et l'inversion
- Développer un site web pour diffuser la connaissance de cette mesure
- Fédérer une communauté d'intérêt et définir le contour des questions fondamentales qui peuvent être étudiées avec la muoscopie

Au-delà du projet T2DM2 :

- Exploration dans des problématiques différentes : endommagement dans le cadre des mouvements gravitaires (ex. tunnel de Séchillienne, gneiss), monitoring environnemental dans le cadre du stockage souterrain (Bures, argiles)
- Créer un réseau national de télescopes portables (nombre 50 à 100 télescopes ?)

Génération de projets ANR, Région, Europe



Séchillienne, OMI

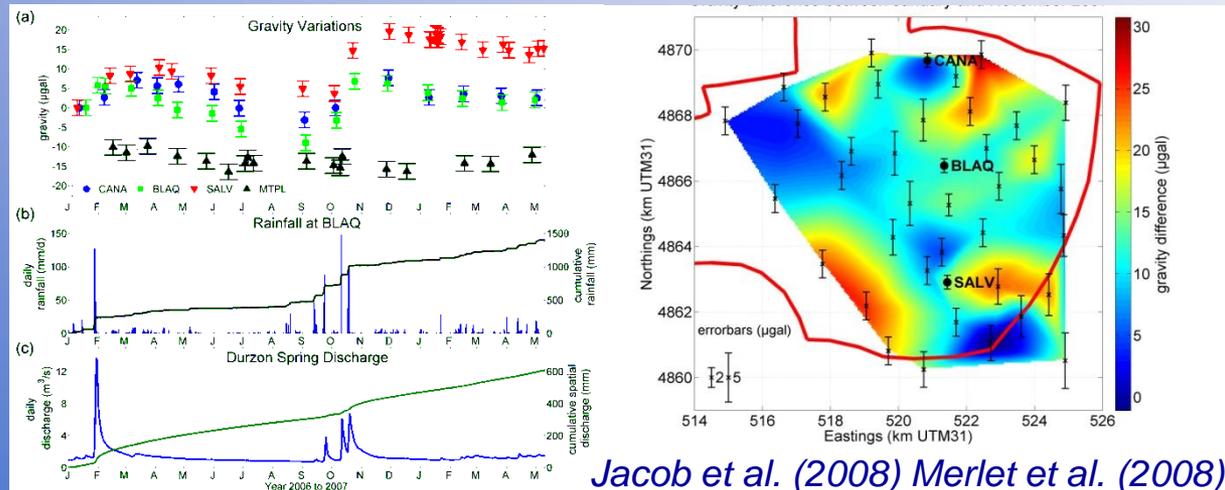
CONCLUSION / DISCUSSION

Une association pluridisciplinaire pour la réalisation d'une nouvelle mesure en Géosciences pour la connaissance des propriétés mécaniques de subsurface

- Muoscopie → Mesure des variations spatio-temporelles de densité
Géologie → Description atomique de la géologie
RESULTAT → **Tomographie densitométrique (simulation + inversion) $\Rightarrow \rho$**
- Sismique → Cartographie vélocimétrique des ondes (α , β)
Tomographie ρ → Cartographie densitométrique du milieu (ρ)
RESULTAT → **Etat mécanique du massif $\Rightarrow E$ & ν**
- Hydro-géologie → Quantification des flux hydrauliques
Gravimétrie → Modélisation de la répartition spatio-temporelle des masses
Tomographie ρ → Cartographie densitométrique du milieu (ρ)
RESULTAT → **Dynamique des flux hydrauliques \Rightarrow DYKARST-R2C2**

Valorisation vers les partenaires industriels

- ANDRA
- Association française des tunnels et de l'espace souterrain (AFTES)



Synoptique électronique d'un télescope MICROMEAS

Version électronique TPC de T2K
CEA-IRFU-SEDI

Plan μ MEGAS
« X » & « Y »
Fabrication CERN

Échantillonnage continu
Mémoire analogique
Résolution en temps 10ns

CARTES FEC
(Frontal-End Cards)

DCC (Data Concentrator Card)
CARTE « XILINX » PPC405

CARTE FEM
(Front-End Mezzanine)

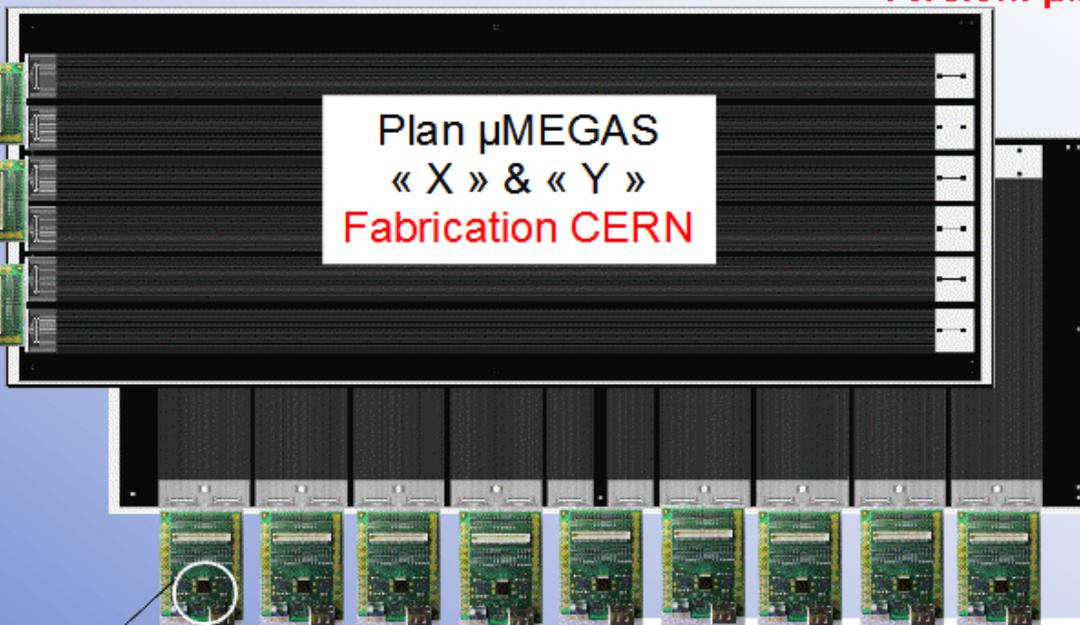
Vers le PC

Circuit ASIC
« AFTER » 72
voies

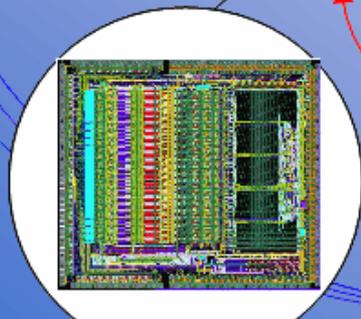
Liaison Ethernet
Optique 10 Gb/s

Synoptique électronique d'un télescope MICROMEGAS

Version: μ MTPCROC+SRU-SRS (CERN)



- À développer:**
- Hybride ASIC : μ TPCROC
 - Cartes Protection+ASIC
- À acheter:**
- Adaptateur+protections+ASIC
 - FEC
 - SRU (Scalable Readout Unit)
- Système complet avec ASIC APV25 (128 ch), FEC+SRU+Alimentation pour 4096 ch \approx 8000€



- Différents Hybrides ASIC APV25**
- (CERN)
 - AFTER-or AGET (IRFU-CEA)
 - μ TPCROC OMEGA-IN2P3...
 - (TDC+TimeStamp+ADC+OR)

Câbles « HDMI »

