



Effondrement de la cavité saline de Cerville: premiers résultats

*Séverine Bernardie
Philippe Jousset,
François Lebert
Jérémy Rohmer*

GISOS

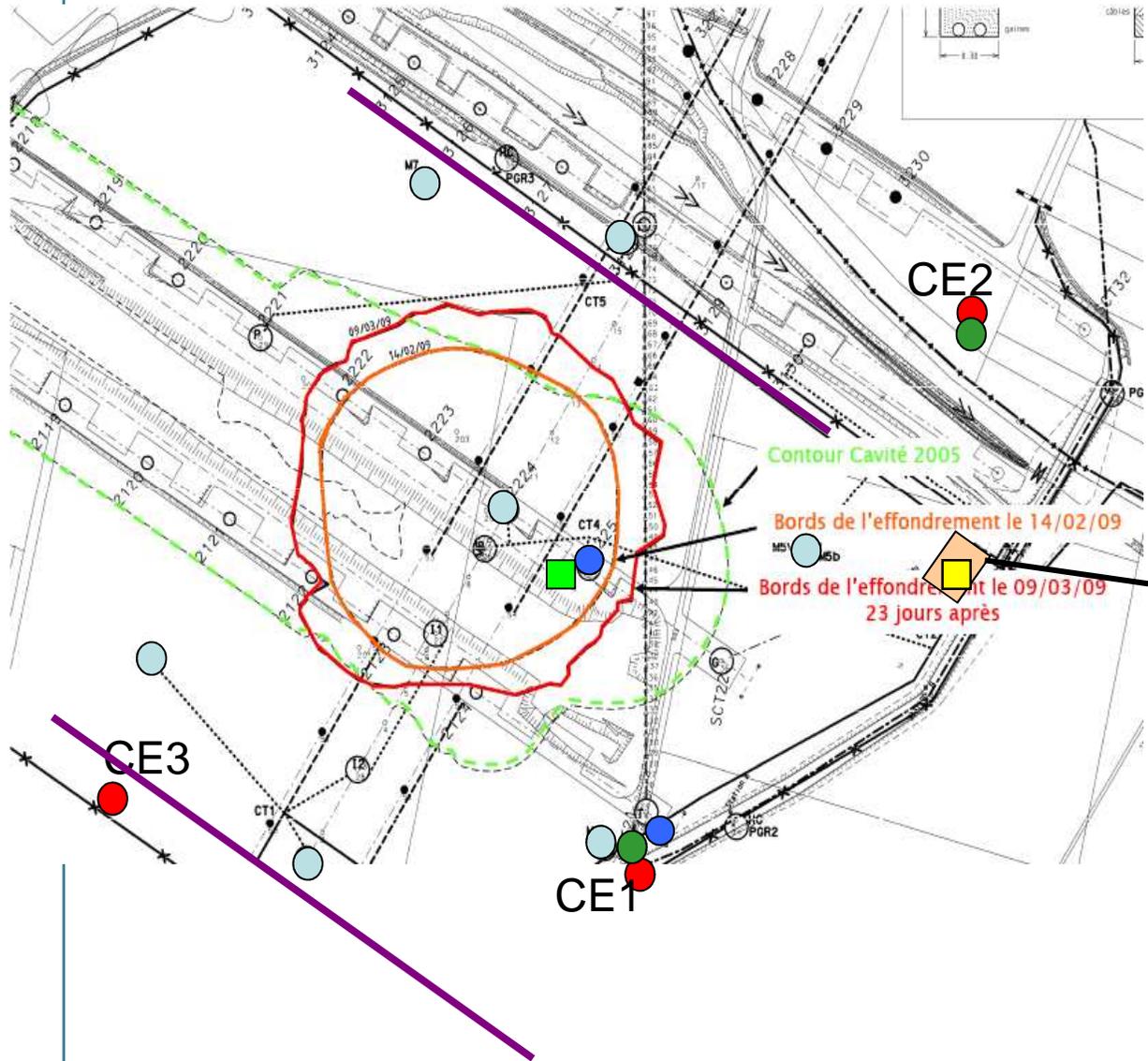
SOLVAY FRANCE



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Réseaux d'instruments



- 2 profil électriques
- 3 extensomètres
- 3 Hydrophones
- 3 stations large bande
- 2 accéléromètres
- Gravimètre
- Réseau INERIS

Local d'acquisition

Chronologie simplifiée de l'effondrement



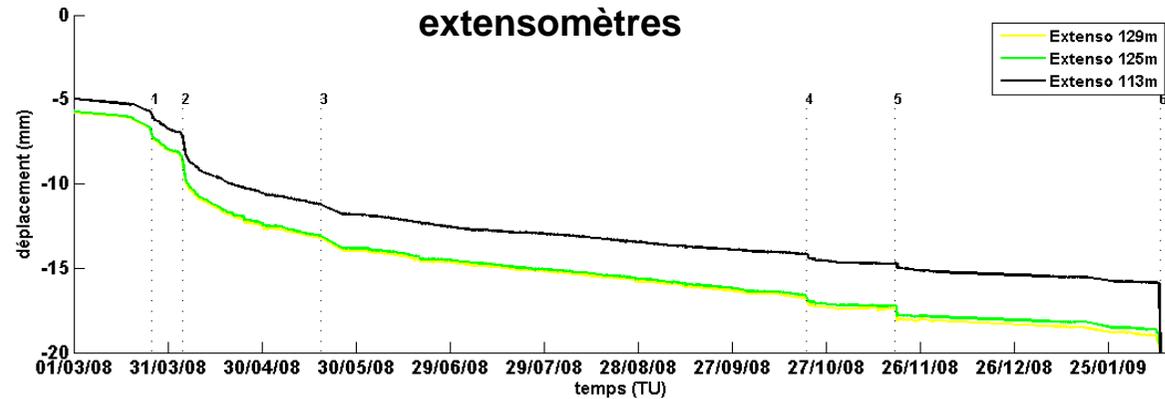
> **Ecroulement des marnes 2005-2009**

- Observations
- Essais de pression
- modélisation géomécanique

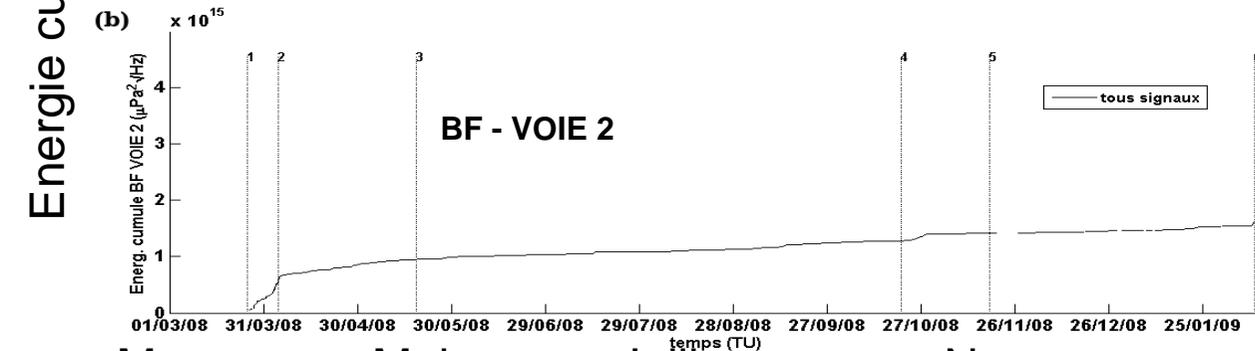
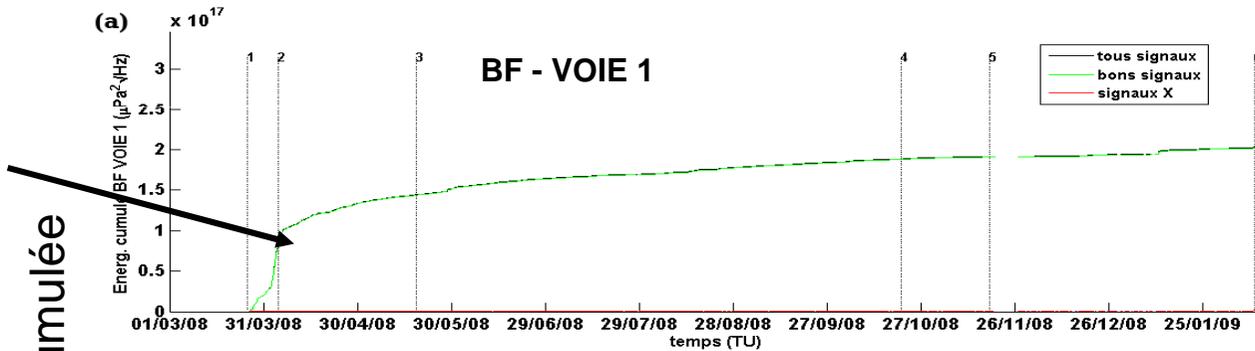
> **Effondrement de surface 9-13 février 2009**

- Observations hydroacoustiques
- Observations basses fréquences

Ecroulement des marnes - Hydroacoustique



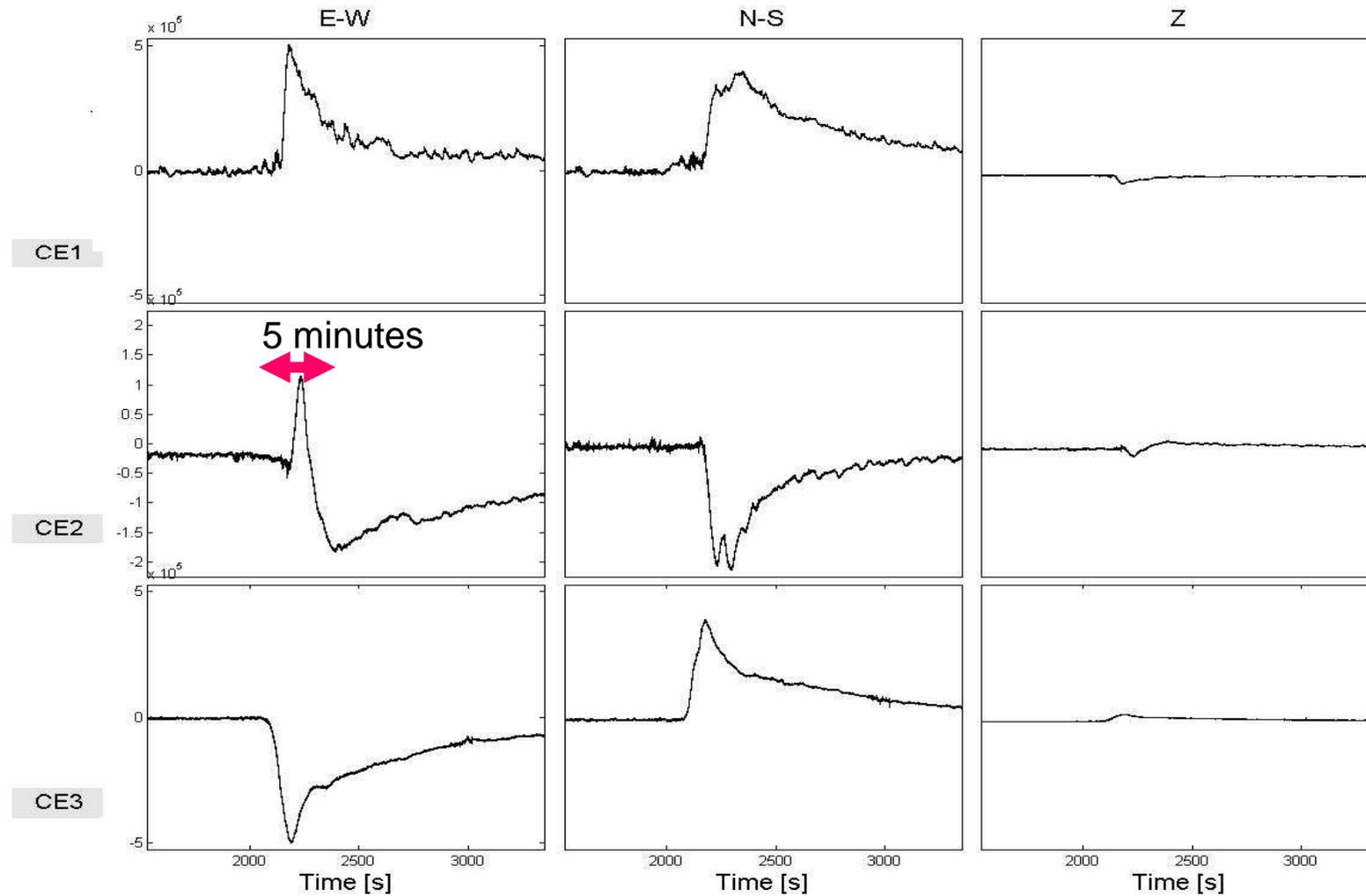
Crise majeure :
25 mars-4 avril 2008
effondrement des
marnes



Mars Mai Juillet Nov

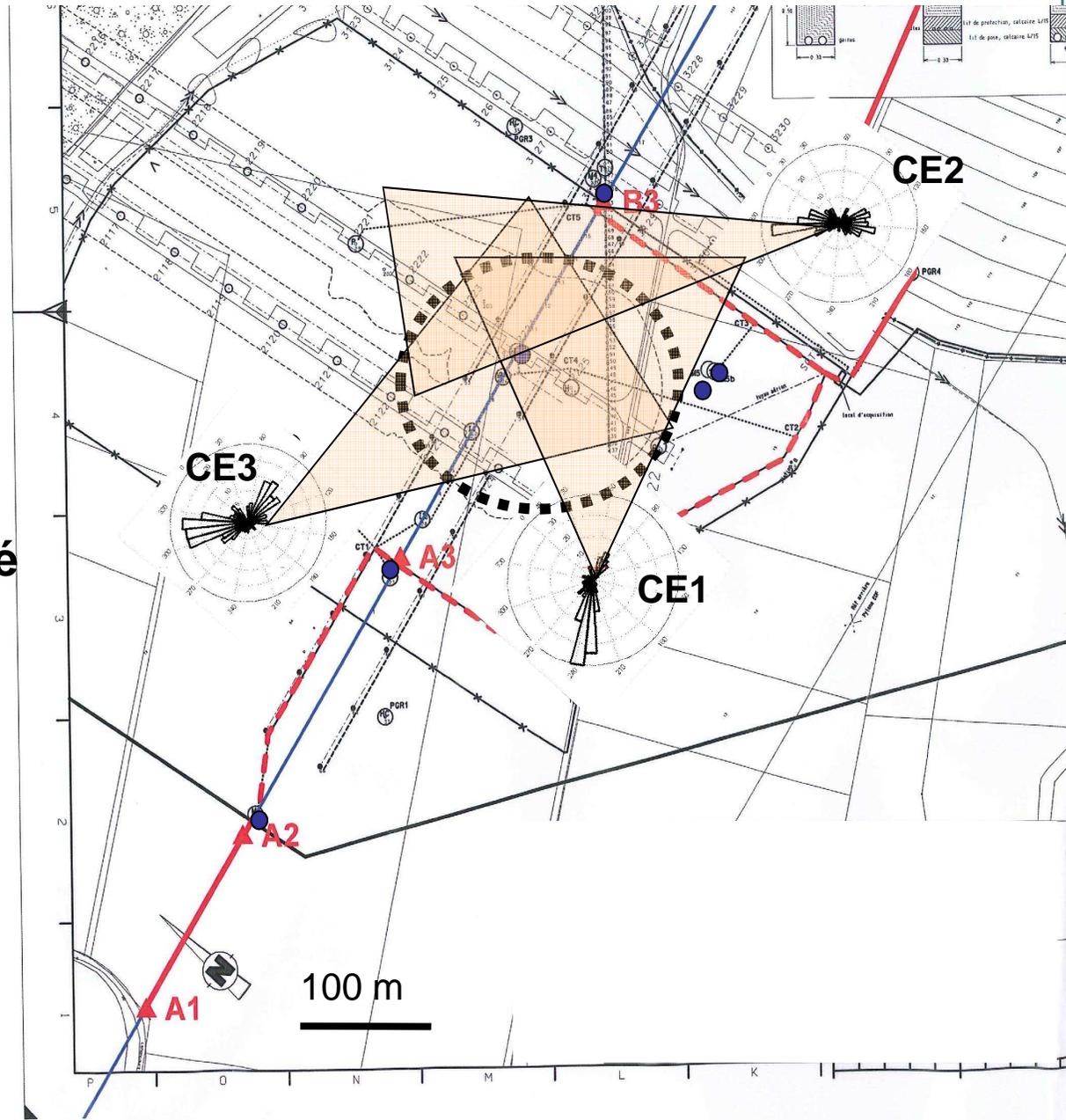


Eté 2008 - Signaux (non sismique) très longue période pendant les essais, sur les composantes horizontales



Polarisation vers la zone d'effondrement

- Effet probable d'une inclinaison
- Conséquence d'effondrements partiels de la cavité
- Relaxation des terrains suite à un poids moindre
- Difficultés à quantifier

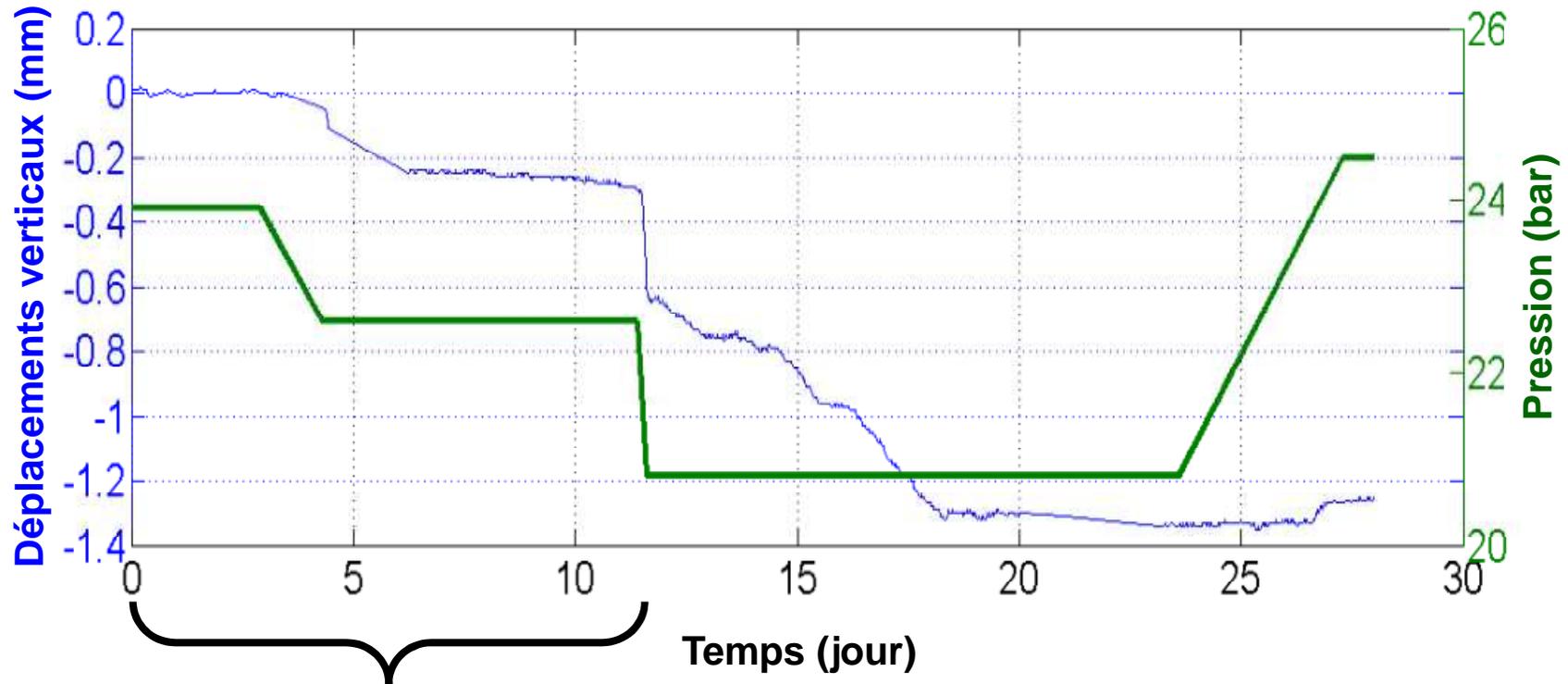


Ecroulement des marnes : modélisation mécanique

- > **Objectif:** meilleure compréhension du comportement et de la rupture du recouvrement de la cavité saline;
- > **Moyen:** rétro-analyse des essais de pressions et observations de déplacements associés via la modélisation couplée hydromécanique.

Essai de pression en 2005

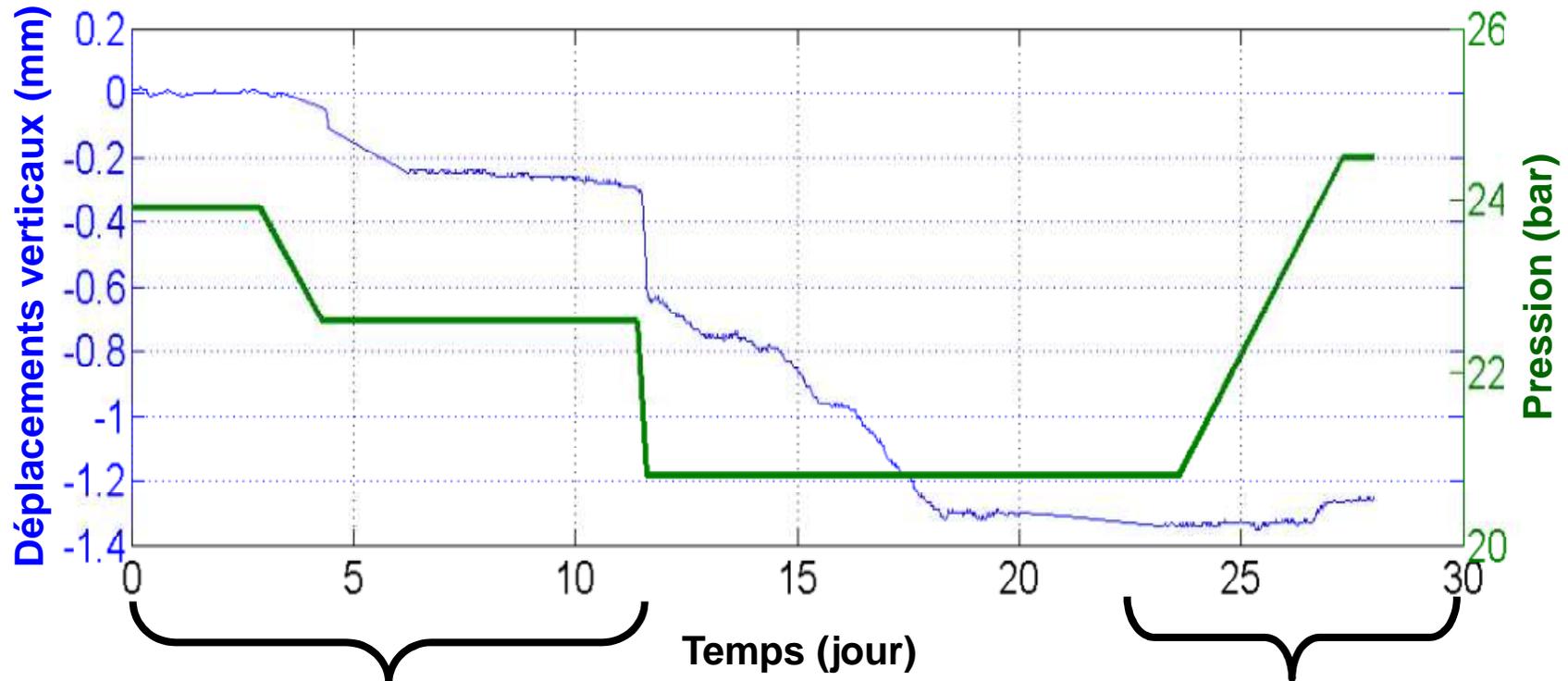
Observations à la base de
la Dolomie



évolution des déplacements suit
celle de la pression
HYPOTHESE:
COMPORTEMENT
« REVERSIBLE »

Essai de pression en 2005

Observations à la base de la Dolomie

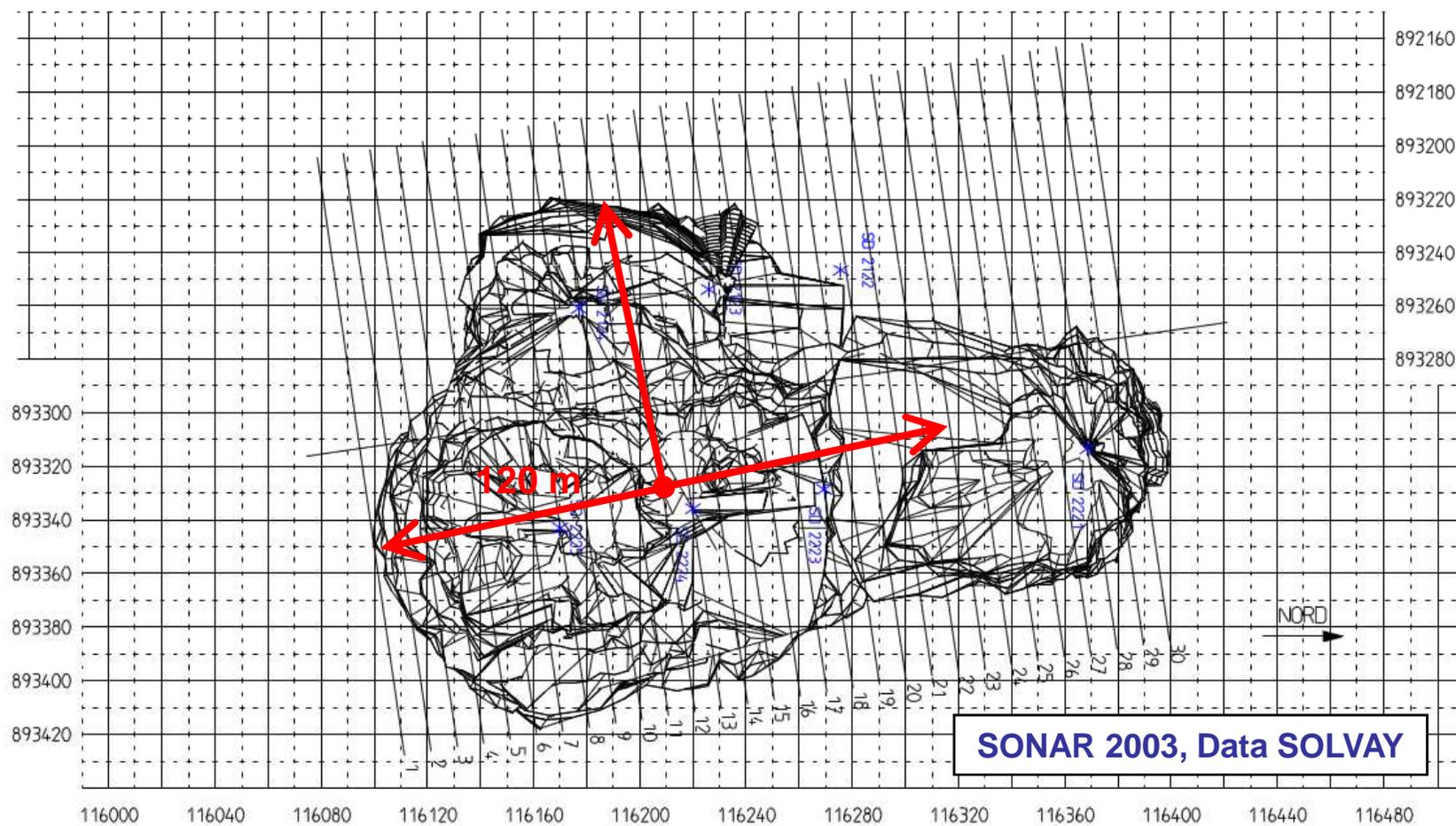


évolution des déplacements suit celle de la pression
HYPOTHESE:
COMPORTEMENT
« REVERSIBLE »

Plus d'évolution sur les déplacements alors qu'il y a augmentation de pression
HYPOTHESE:
COMPORTEMENT
« IRREVERSIBLE »

Cavité

| | | | | |
|----------------------|--------------------------------------|--|-------------------|---|
| | CLIENT : SOLVAY DATE : Avril 2003 | CAVITES : Pistes 2100 & 2200 N° CAMPAGNE: 3 | ECHELLE 1/2000 |  |
| Vue de dessus | | | | |



Modèle géométrique et conditions

Axe de symétrie

Conditions hydrauliques:

- Bord gauche : flux nul
- Bord droit : profil « colonne de saumure »
- Bord bas : flux nul

Conditions mécaniques:

- contraintes initiales isotropes

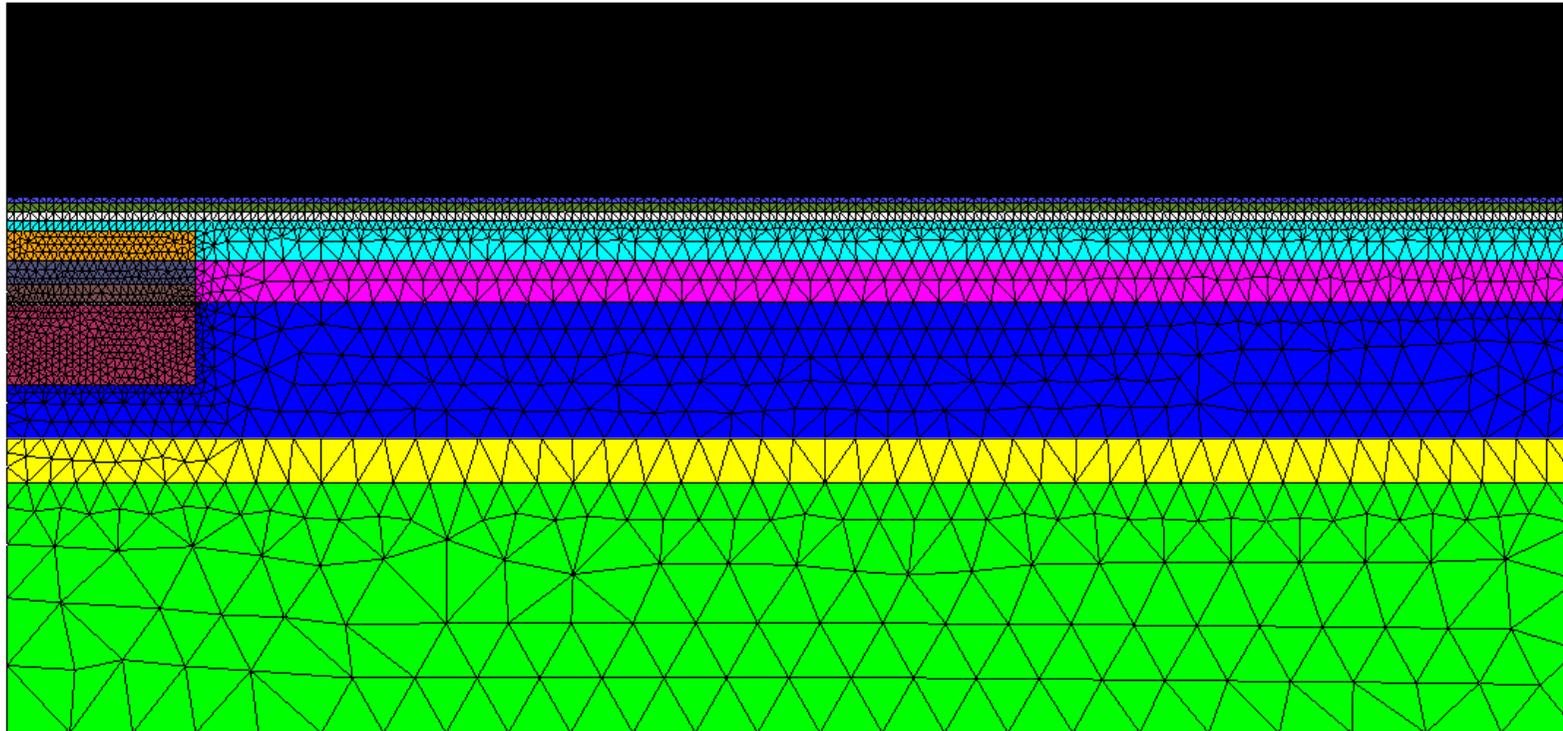
1000m

460 m



Matériaux

NO 3010, MA 12802



ADAPTE de :
Mercerat E. (2007) – Sismicité induite et modélisation numérique de
l'endommagement dans un contexte salin. Thèse de doctorat
LAEGO/INERIS et IPG Paris.



- Base
- Argile_bas
- Sel
- Marne_argile
- Marne_anhydrite
- Facies_anhydrite
- Dolomie
- Anhydrite
- Cavite_03
- Cavite_07a
- Cavite_07b
- Cavite_08a
- Cavite_08b
- Others...



Hypothèses matériaux

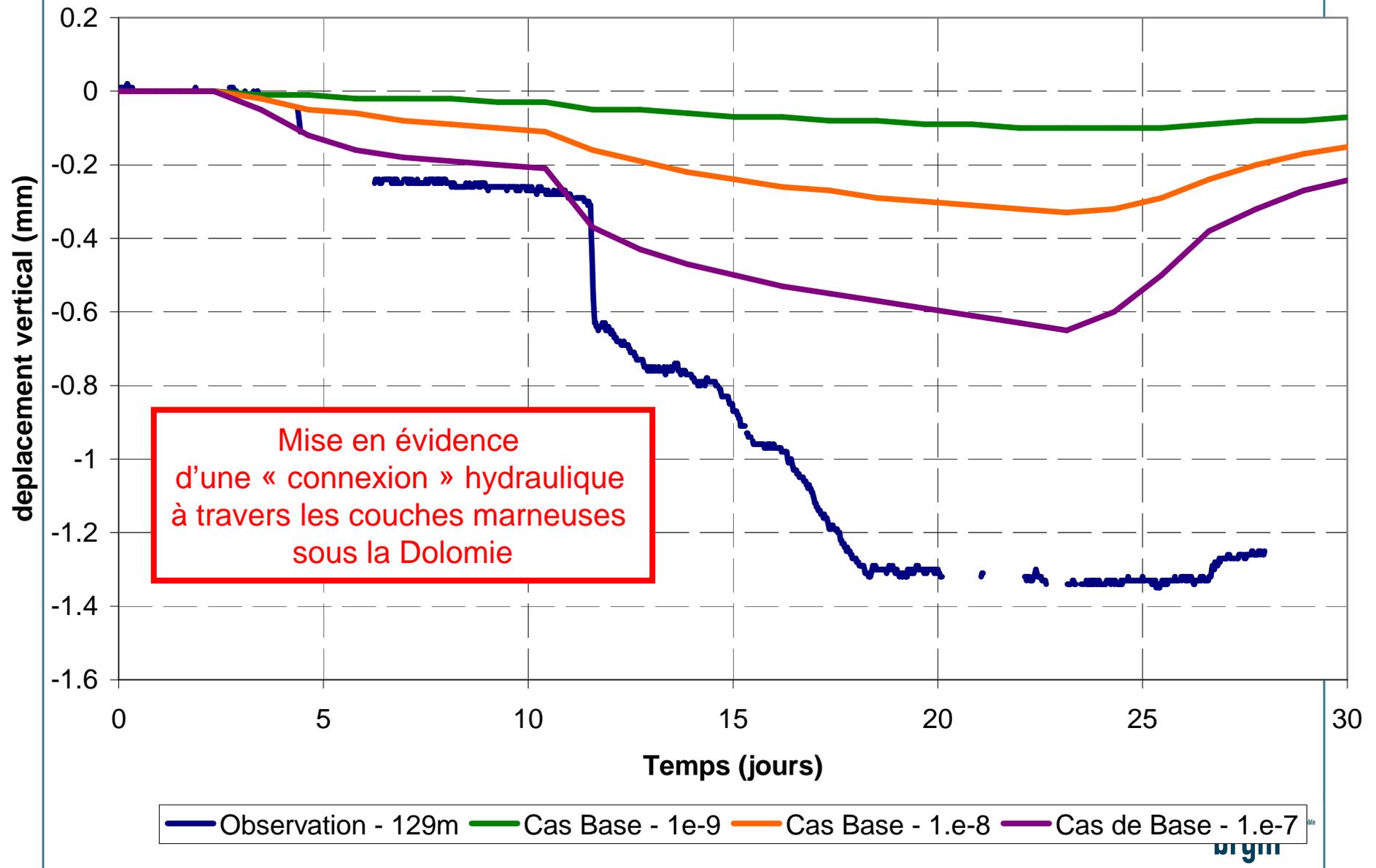
| COUCHE | Epaisseur | Profondeur du toit / sol=0 | volumique sec | Module de Young | coeff Poisson | cohésion | Coeff de frottement |
|-------------------------------------|-----------|----------------------------|---------------|-----------------|---------------|------------|---------------------|
| Unité | <i>m</i> | <i>m NGF</i> | <i>kg/m3</i> | <i>Gpa</i> | - | <i>Mpa</i> | ° |
| couche proche sol | 122 | 0 | 2500 | 16.5 | 0.25 | 0.8 | 29.7 |
| Anhydrite | 4 | -122 | 2910 | 88 | 0.29 | 9.4 | 48.6 |
| Dolomie de Beaumont (rigide) | 5 | -126 | 2890 | 79 | 0.27 | 14.3 | 51.6 |
| Faciès anhydrite | 6 | -131 | 2657 | 40 | 0.3 | 1.84 | 11.54 |
| Marnes anhydritiques | 25 | -137 | 2657 | 21 | 0.16 | 1.84 | 11.54 |
| Marnes à argiles | 26 | -162 | 2657 | 12 | 0.36 | 1.84 | 11.54 |
| Sel | 86 | -188 | 2150 | 30 | 0.28 | 4 | 20.8 |
| Argile | 28 | -274 | 2500 | 12 | 0.36 | 0.5 | 25 |
| Calcaire | 158 | -302 | 2500 | 21 | 0.25 | 1.1 | 34.4 |

ADAPTE de :
Mercerat E. (2007) –
Sismicité induite et modélisation
numérique de l'endommagement
dans un contexte salin. Thèse de
doctorat LAEGO/INERIS et IPG Paris.

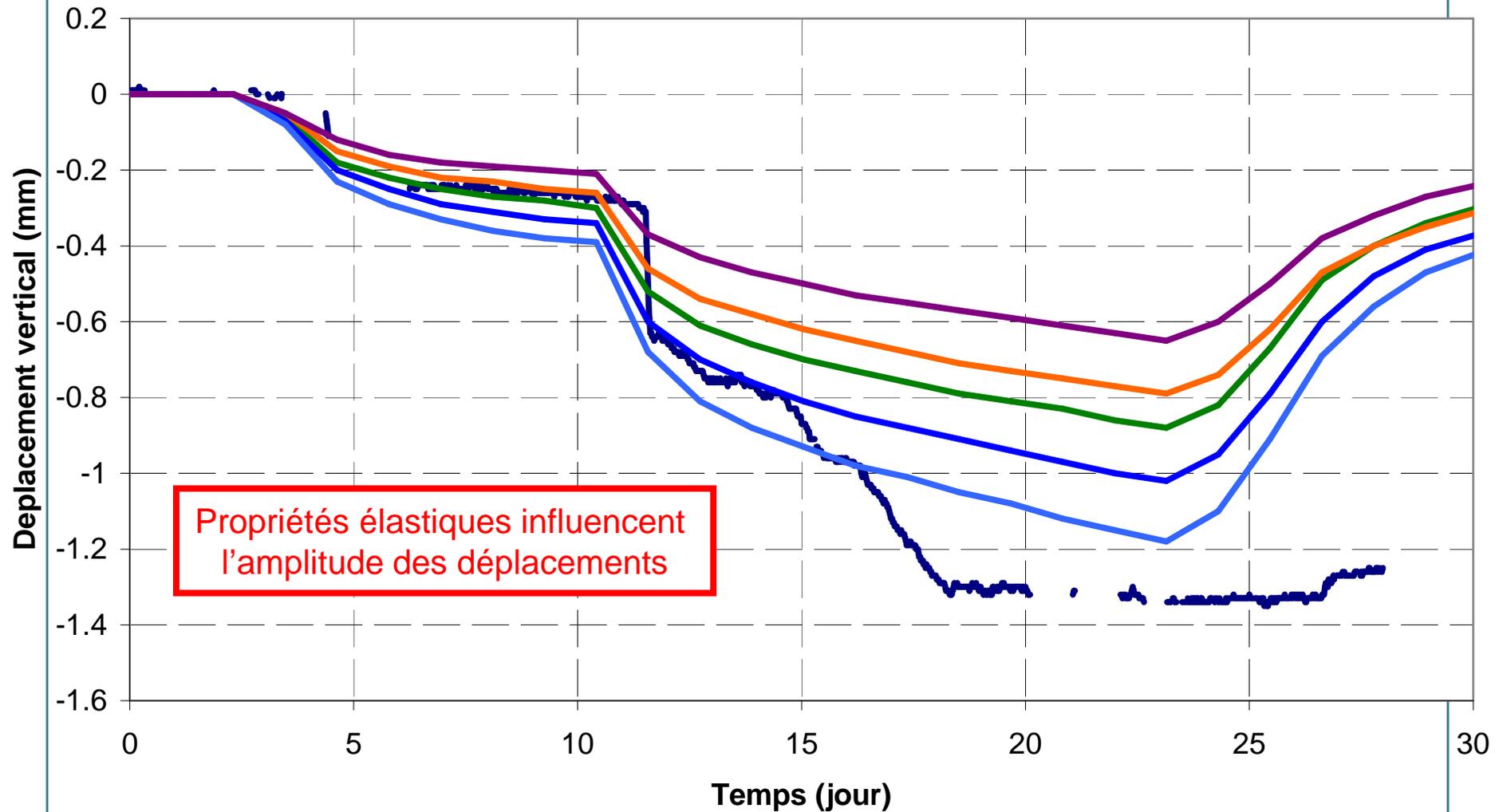
CODE de CALCUL: Gefdyn ©
RHEOLOGIE « SIMPLE »:
Comportement Drucker-Prager
isotrope.

Notations:
E module de Young (GPa),
nu coeff. Poisson,
k conductivité hydraulique (m/s)

Influence de la conductivité (m/s) des couches marneuses



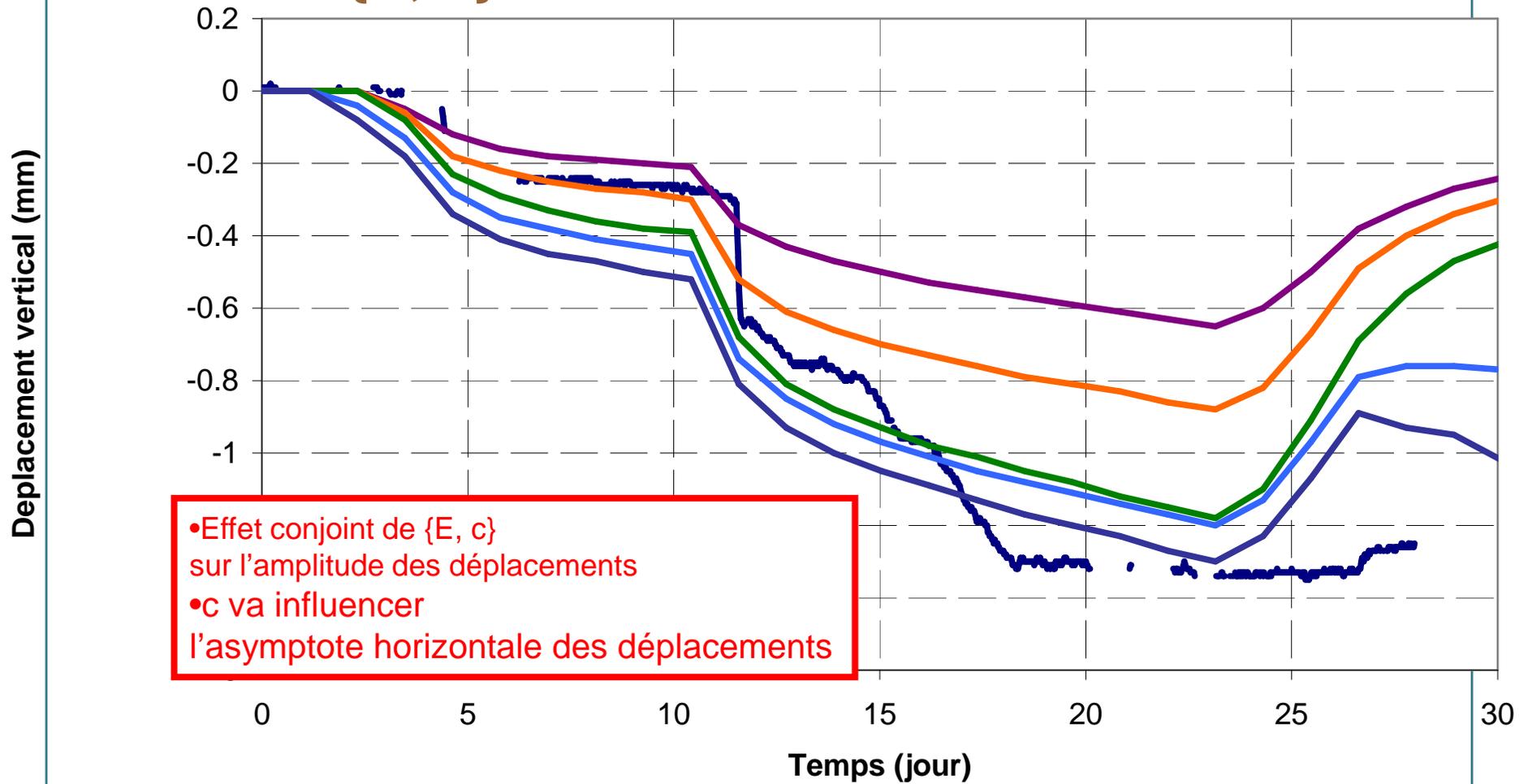
Influence $\{E, \nu\}$ des couches marneuses



— Observation - 129m — Cas Base - E12, k=1.e-7 — Cas Base - nu 0.16 k1.e-7
— Cas Base - E12nu0.16k1.e-7 — Cas Base - E8nu0.16k1.e-7 — Cas Base, k=1.e-7



Influence {E, c} des couches marneuses



- Observation - 129m
- Cas Base, $k=1.e-7$, $c=1.20$
- Cas Base, $k=1.e-7$, $c=1.10$, $E=12$
- Cas Base, $k=1.e-7$
- Cas Base, $k=1.e-7$, $c=1.20$, $E=12$
- Cas Base, $k=1.e-7$, $c=1.05$, $E=12$



Synthèse

- > **Hypothèse: « Connectivité » hydraulique sel – marne – dolomie**
- > **Calage des essais:**
 - Propriétés des marnes « faibles » :
 - $E [10 -20] \text{ GPa}$
 - $\nu \approx 0.16$
 - $C = [1.10 -1.25] \text{ MPa}$,
- > **Les couches marneuses sont « proche » de la rupture lors des essais.**



Effondrement de surface: 9-13 février 2009

Hydroacoustique Phénomènes longues périodes



GISOS

SOLVAY FRANCE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mesures et objectifs

Hydrophones 1 et 2 :

- Basse Fréquence (BF) : de 30Hz à 3kHz
- Haute Fréquence (HF) : de 30kHz à 180kHz
- Fréquence intermédiaire (FI) : de 3kHz à 30kHz

2 types d'enregistrement :

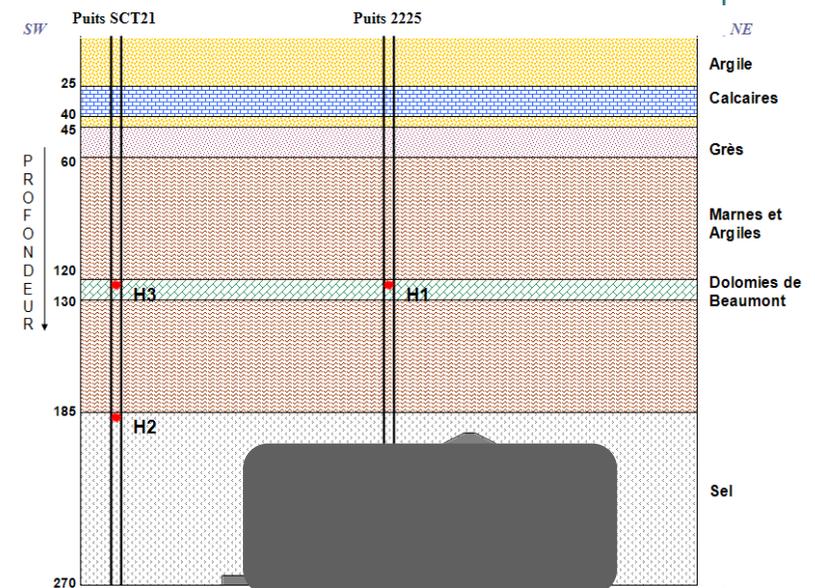
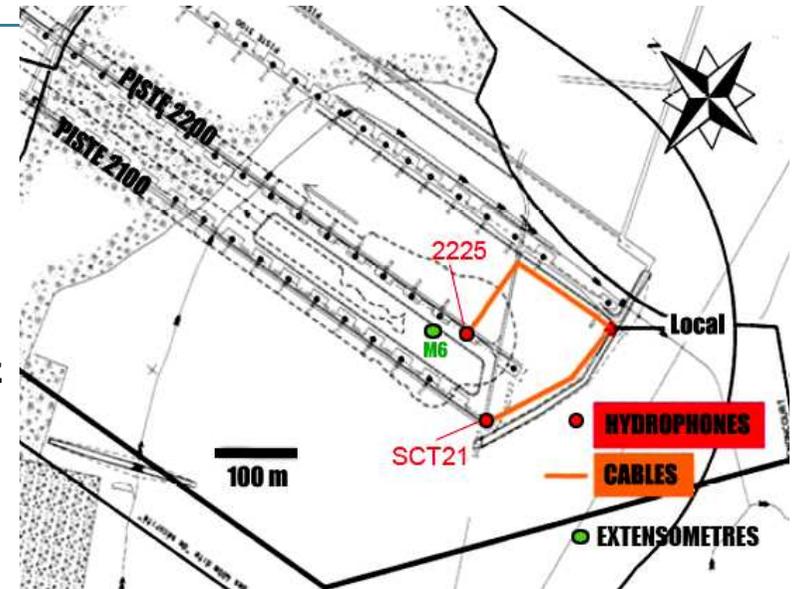
- Événementiel (HF, BF)
- Continu (Toutes)

Hydrophone 3 :

- Haute Fréquence (HF) : de 3kHz à 180kHz

1 type d'enregistrement :

- Événementiel



Suivi temporel de l'effondrement

PLAN

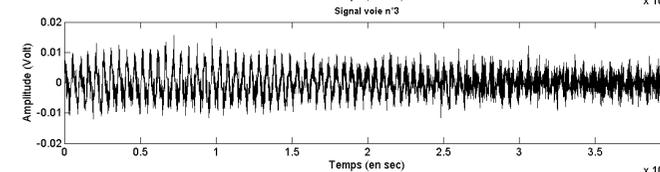
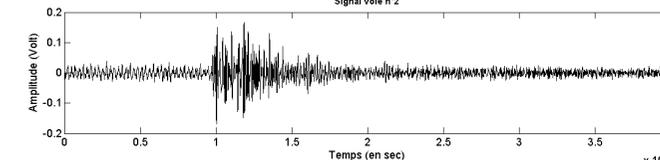
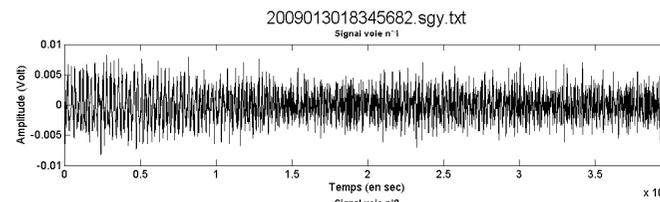
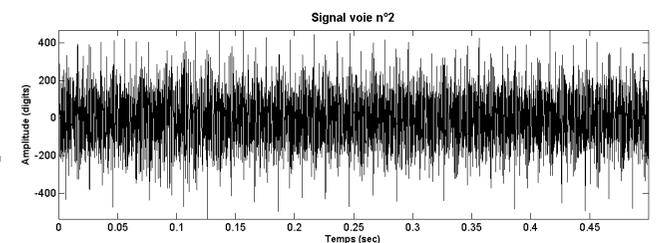
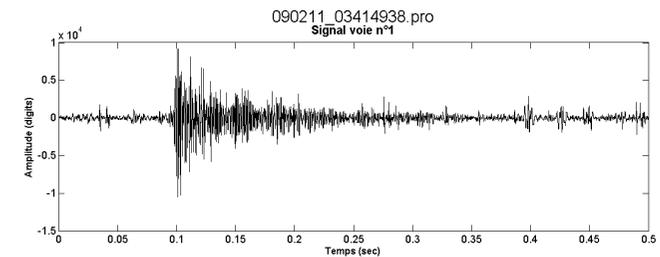
1. Traitement et analyse des événements Basses Fréquences BF (voies 1 & 2)

- déclenchement sur seuil
- durée 0.5 s
- Fréquence d'échantillonnage: 10kHz
- 2 120 768 événements (2008-2009)

2. Traitement et analyse des événements Hautes Fréquences HF (voies 1, 2 & 3)

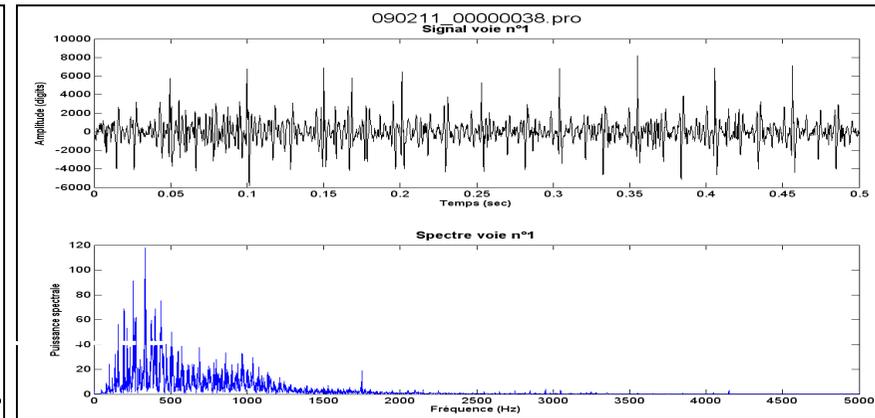
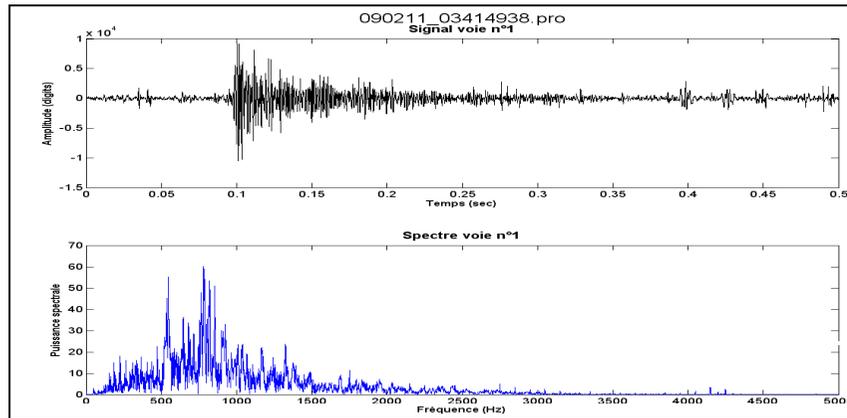
- déclenchement sur seuil
- durée : 4 ms
- Fréquence d'échantillonnage: 1MHz
- 378 861 événements (2008-2009)

3. Présentation et analyse des résultats



Signaux BF - TYPOLOGIE

Deux familles :

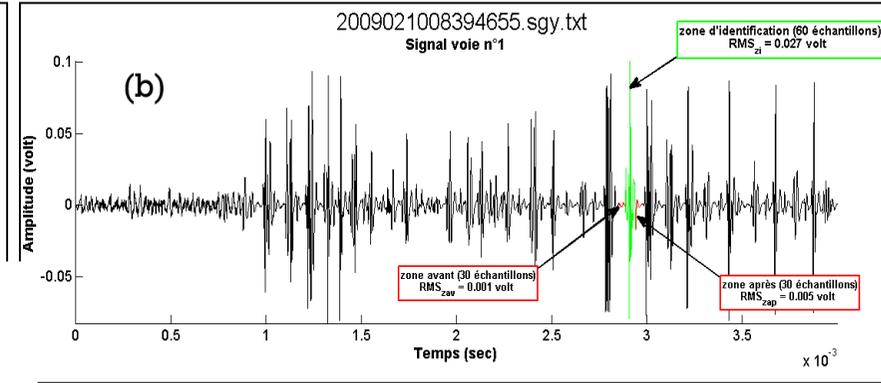
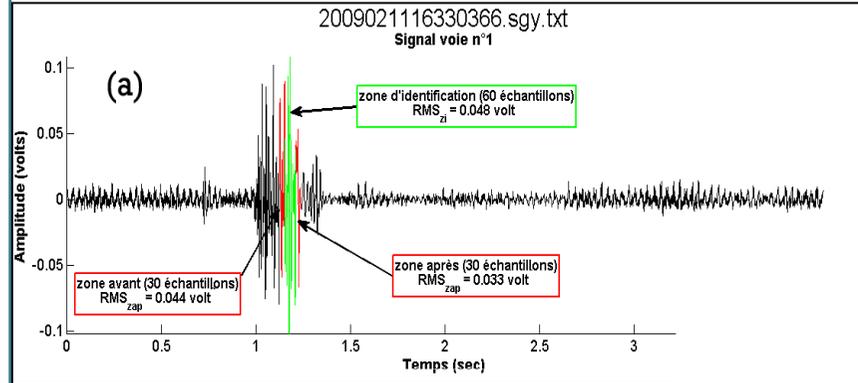


1 – « **Bons** » signaux : formes
« classiques »

2 – **Signaux X**: formes de type
impulsionnel

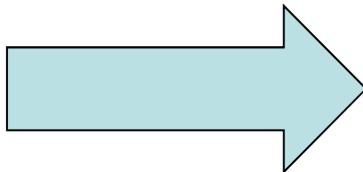
Signaux HF - TYPOLOGIE

Deux familles :



1 – « **Bons** » signaux : formes
« classiques »

2 – **Signaux X**: formes de type
impulsionnel



Mécanismes différents?

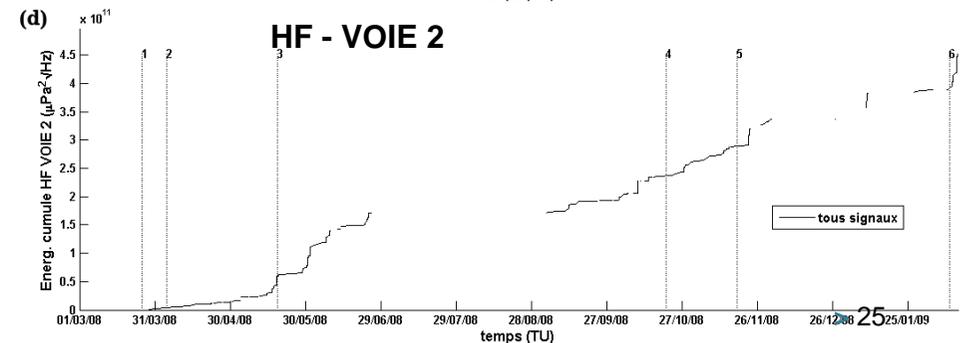
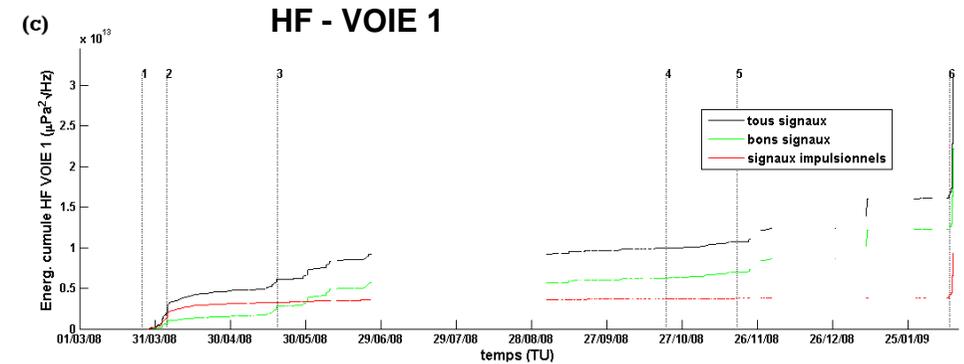
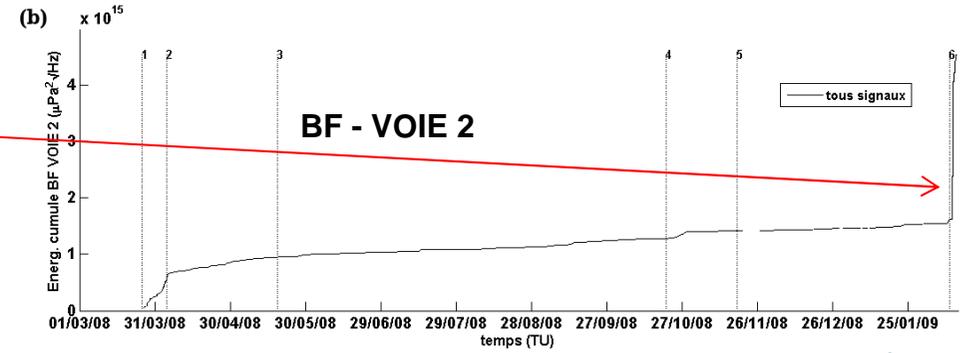
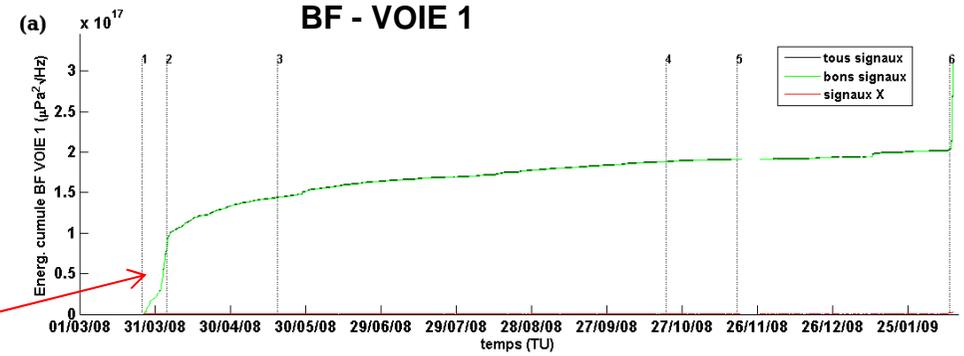
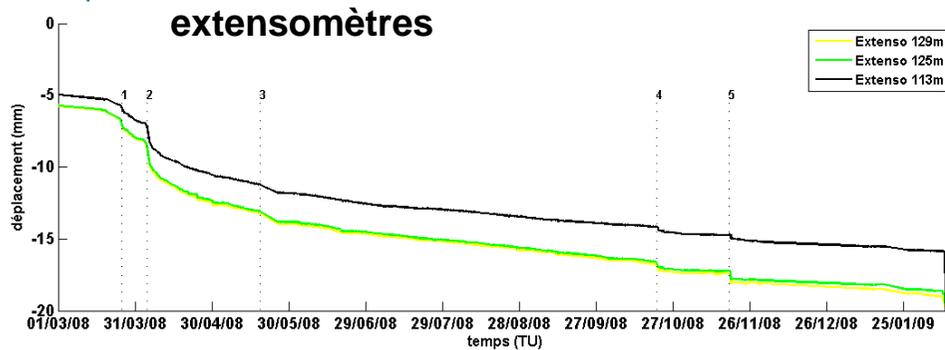
Enregistrements 2008-2009

2 Crises majeures:

1/ 25 mars-4 avril 2008
effondrement des marnes

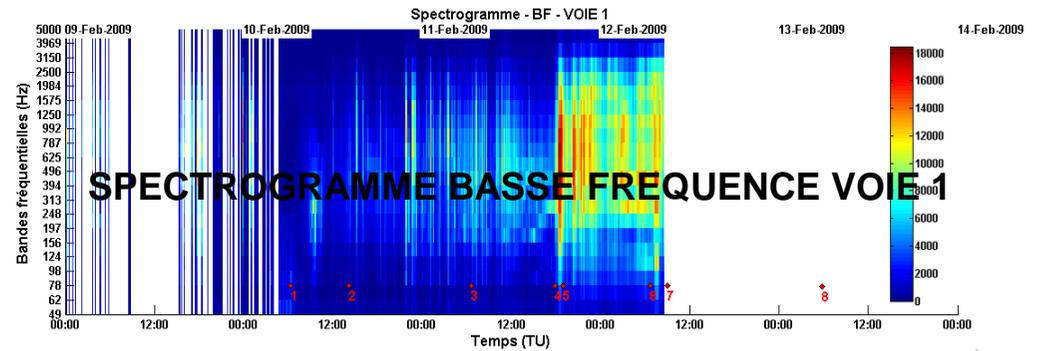
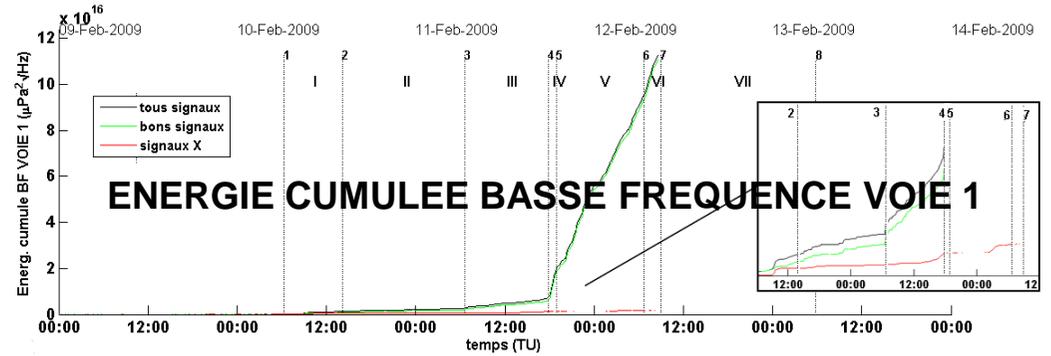
2/ début 9 fév. 2009
effondrement provoqué de la
cavité

**Système expérimental
adapté**

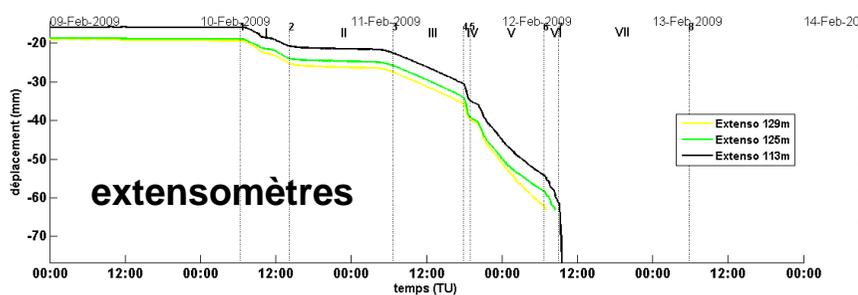
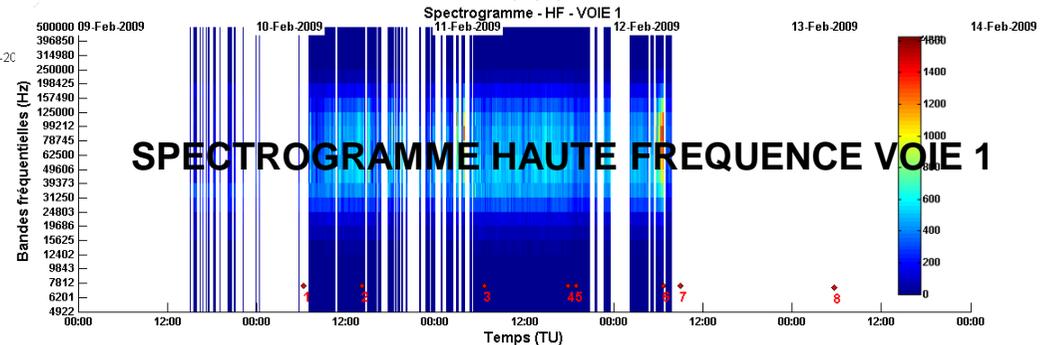
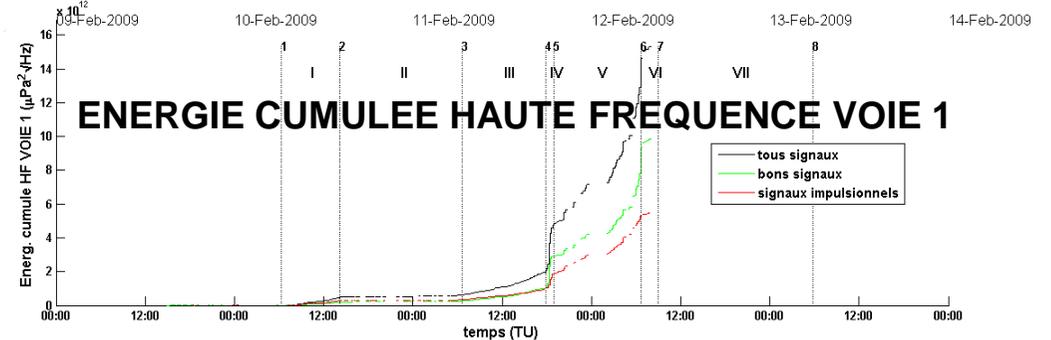
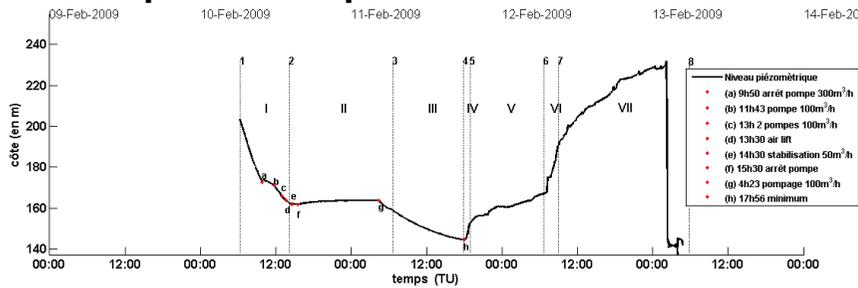


Effondrement : Enregistrements Voie 1

| étapes | phases |
|----------------|--------|
| 1- 10/02 6h20 | |
| 2- 10/02 14h10 | |
| 3- 11/02 6h40 | |
| 4- 11/02 17h50 | |
| 5- 11/02 19h00 | |
| 6- 12/02 6h40 | |
| 7- 12/02 9h20 | |
| 8- 13/02 5h45 | |

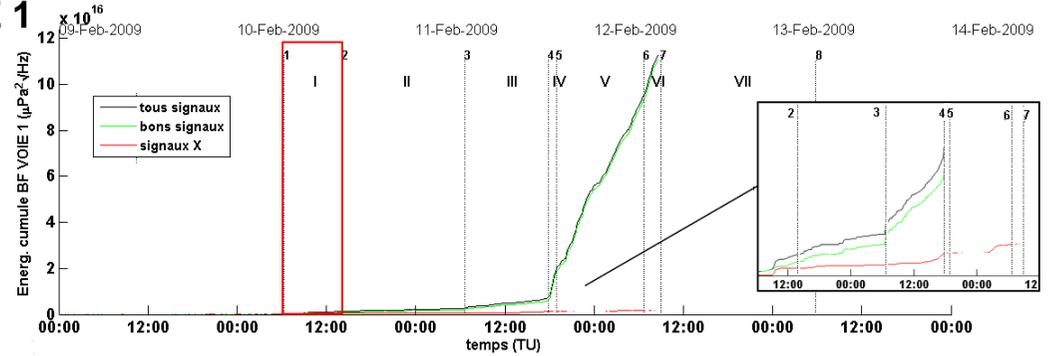


niveau piézométrique

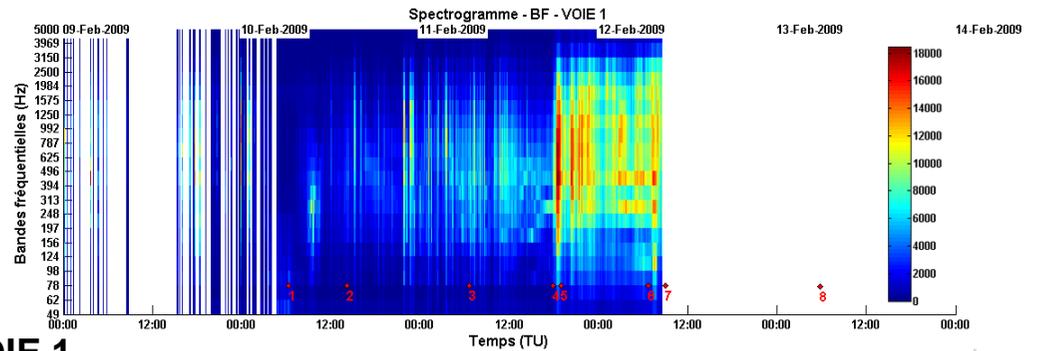


Effondrement : Enregistrements Voie 1

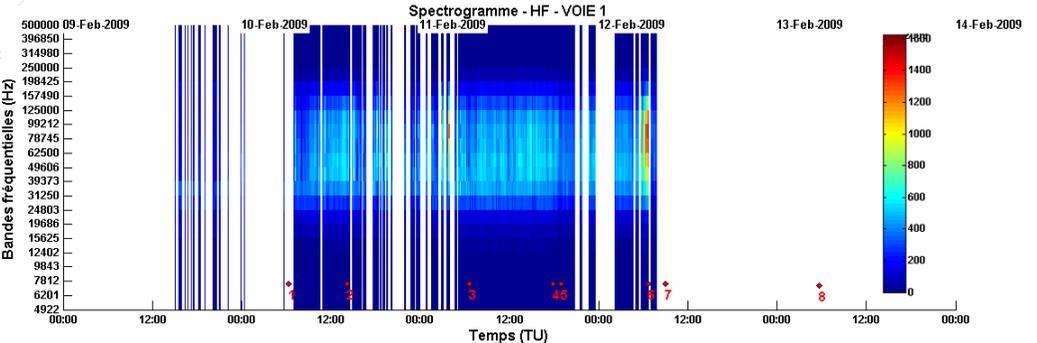
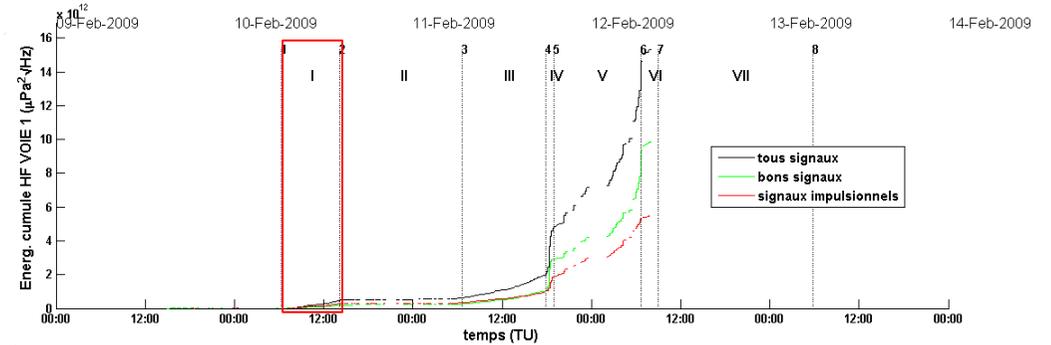
BF – VOIE 1



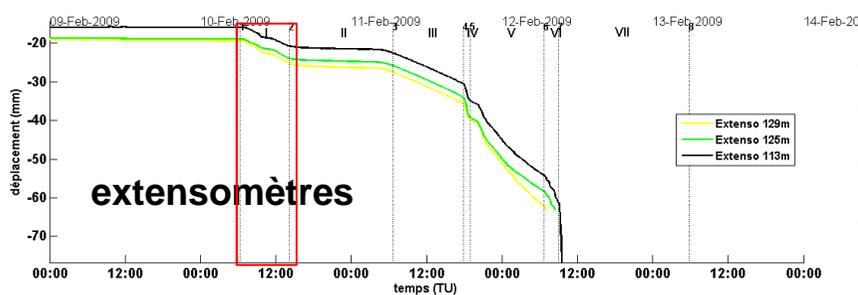
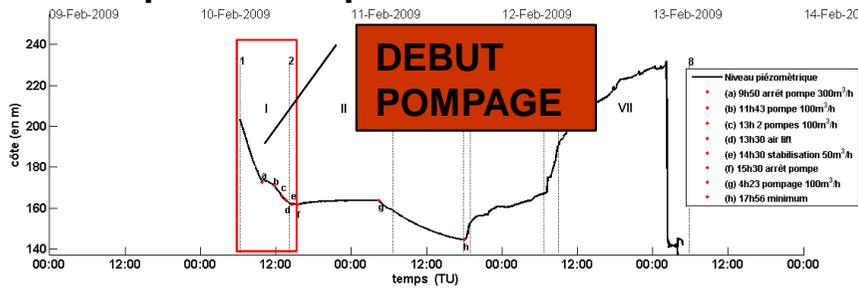
| étapes | phases |
|----------------|--------|
| 1- 10/02 6h20 | I |
| 2- 10/02 14h10 | II |
| 3- 11/02 6h40 | III |
| 4- 11/02 17h50 | IV |
| 5- 11/02 19h00 | V |
| 6- 12/02 6h40 | VI |
| 7- 12/02 9h20 | VII |
| 8- 13/02 5h45 | |



HF – VOIE 1

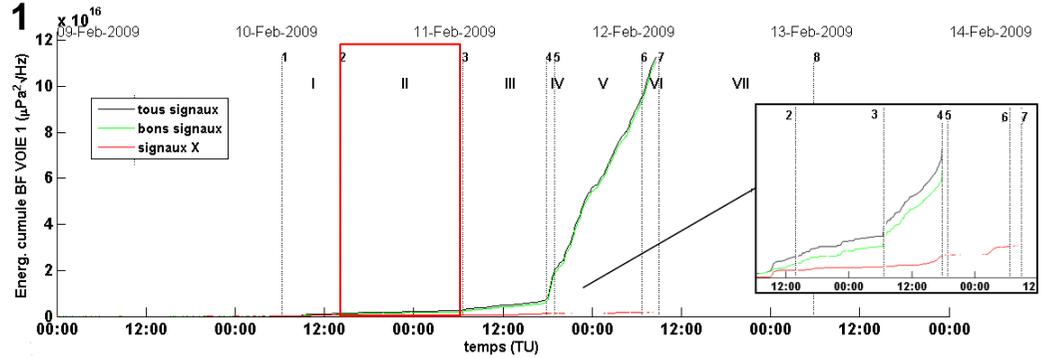


niveau piézométrique

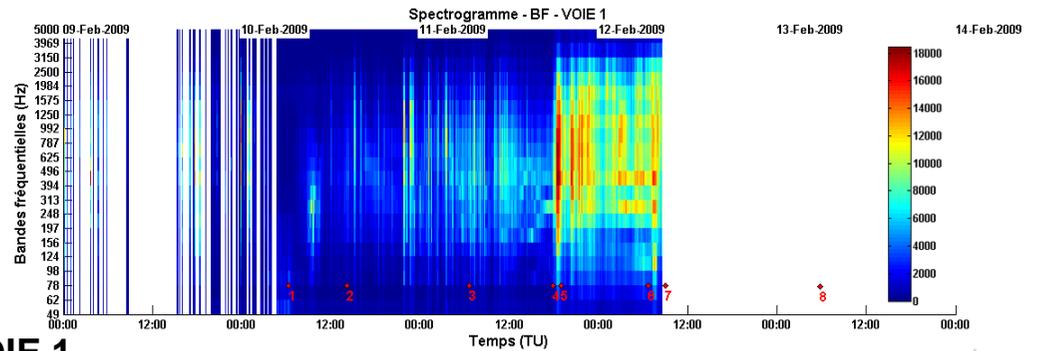


Effondrement : Enregistrements Voie 1

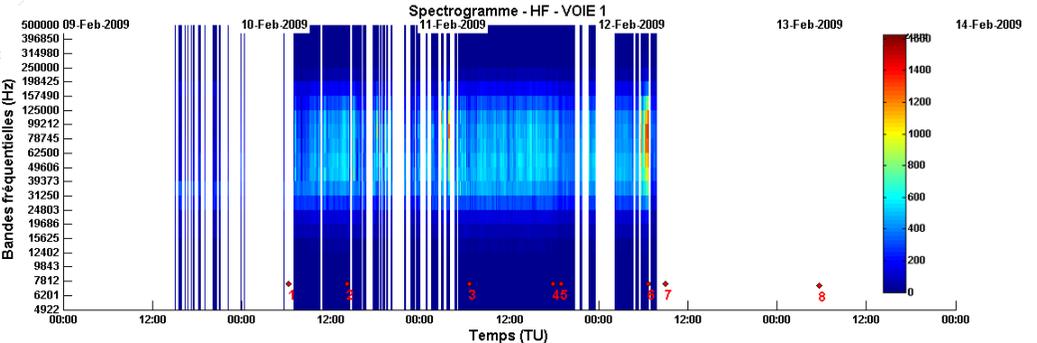
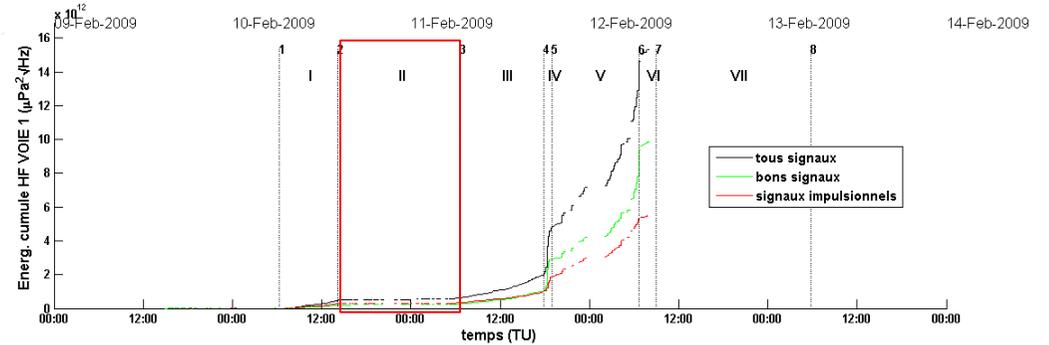
BF – VOIE 1



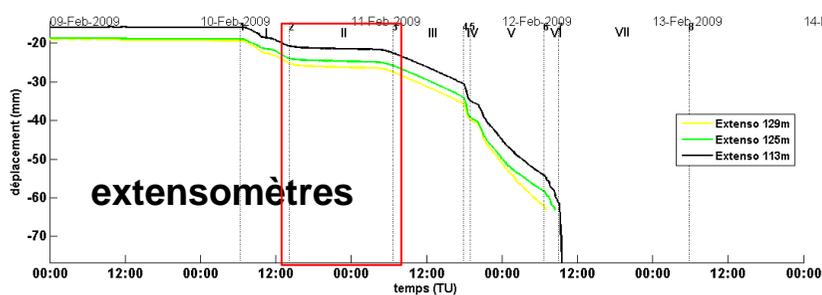
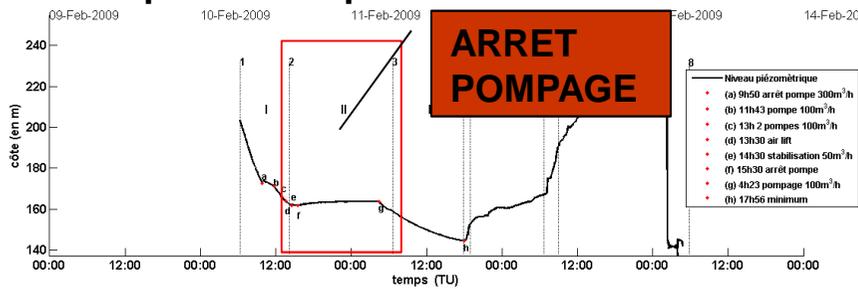
| étapes | | phases |
|----------|-------|--------|
| 1- 10/02 | 6h20 | |
| 2- 10/02 | 14h10 | |
| 3- 11/02 | 6h40 | |
| 4- 11/02 | 17h50 | |
| 5- 11/02 | 19h00 | |
| 6- 12/02 | 6h40 | |
| 7- 12/02 | 9h20 | |
| 8- 13/02 | 5h45 | |



HF – VOIE 1



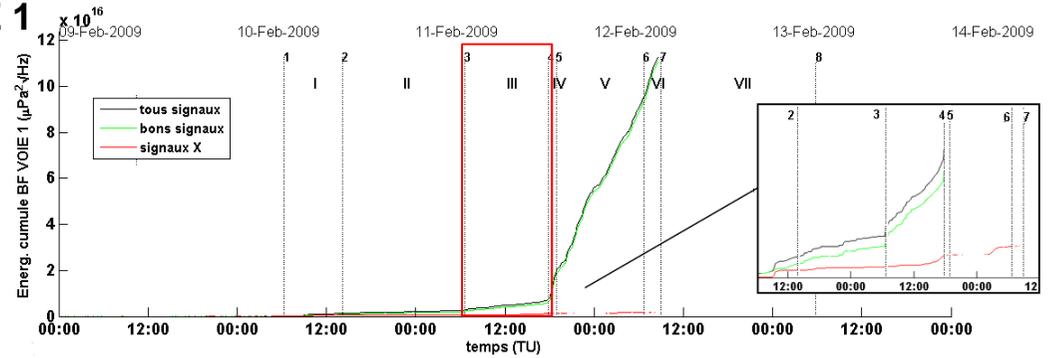
niveau piézométrique



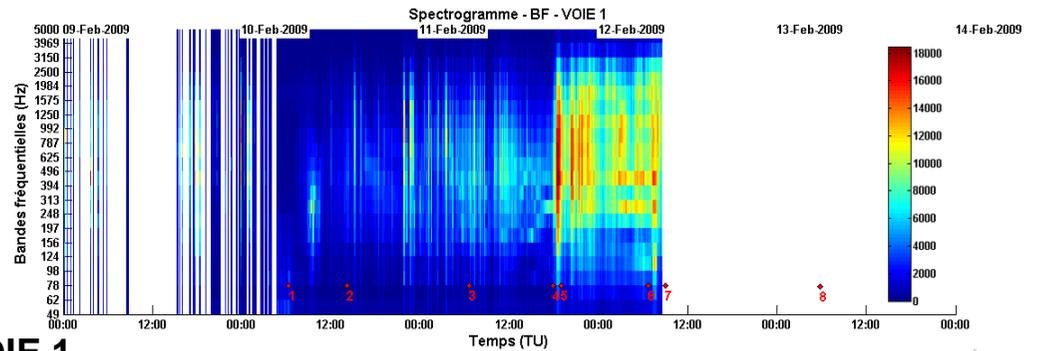
extensomètres

Effondrement : Enregistrements Voie 1

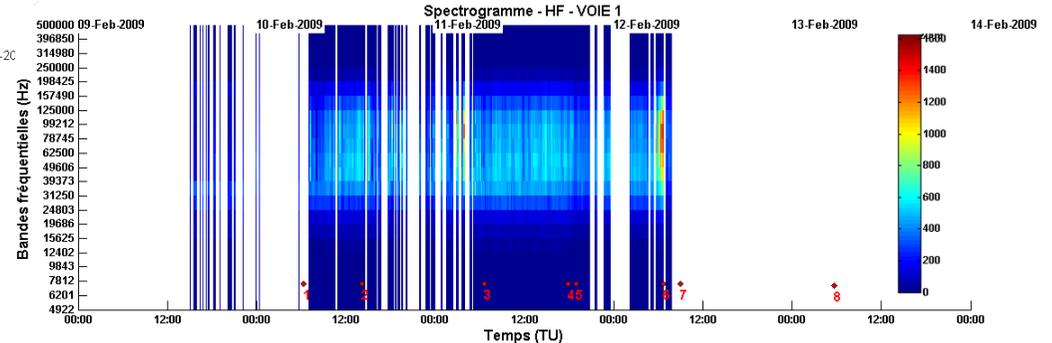
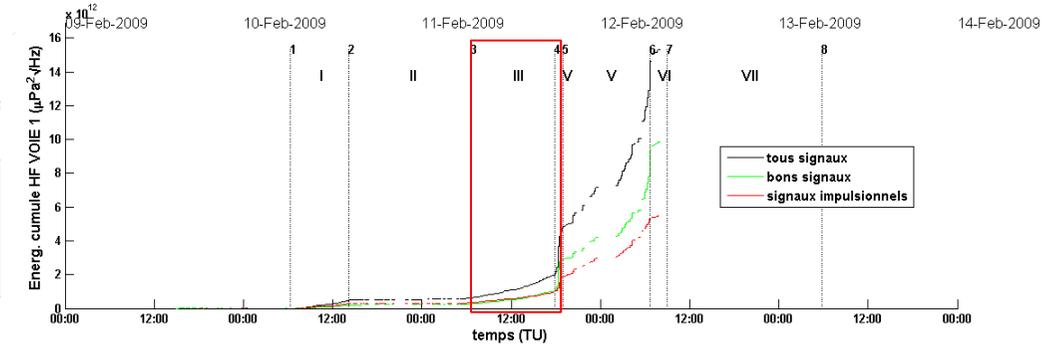
BF – VOIE 1



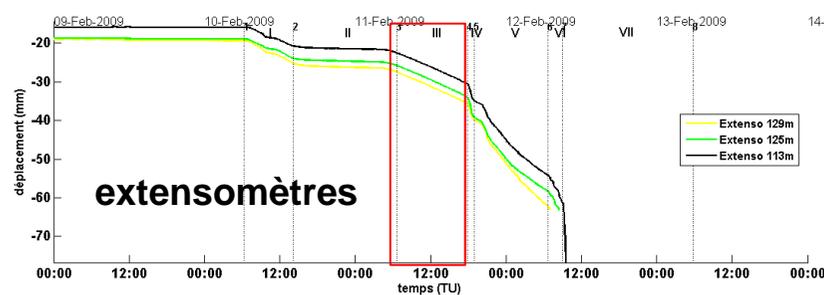
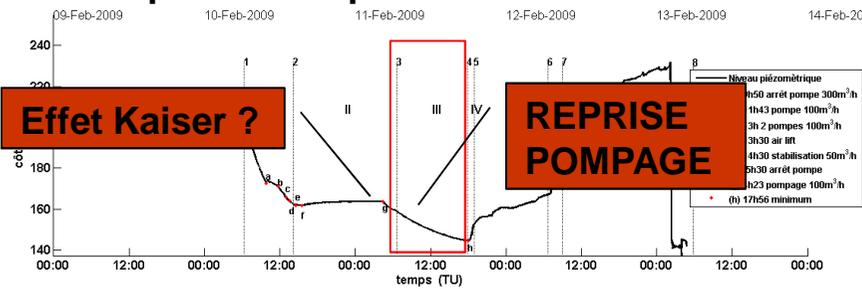
| étapes | phases |
|----------------|--------|
| 1- 10/02 6h20 | |
| 2- 10/02 14h10 | |
| 3- 11/02 6h40 | |
| 4- 11/02 17h50 | |
| 5- 11/02 19h00 | |
| 6- 12/02 6h40 | |
| 7- 12/02 9h20 | |
| 8- 13/02 5h45 | |



HF – VOIE 1

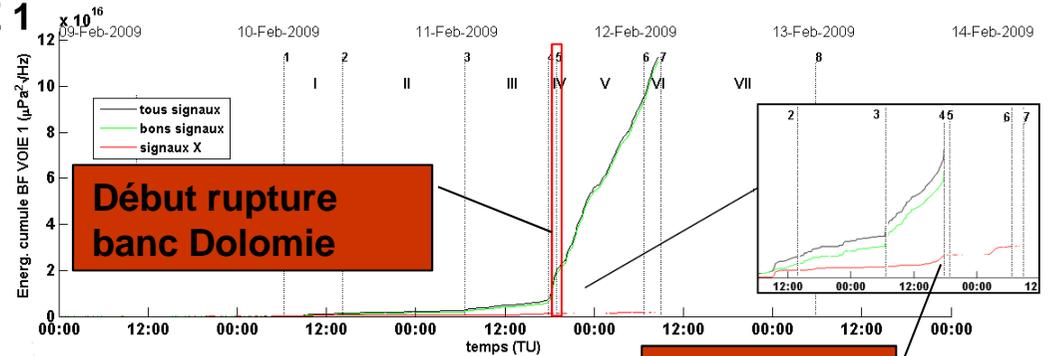


niveau piézométrique

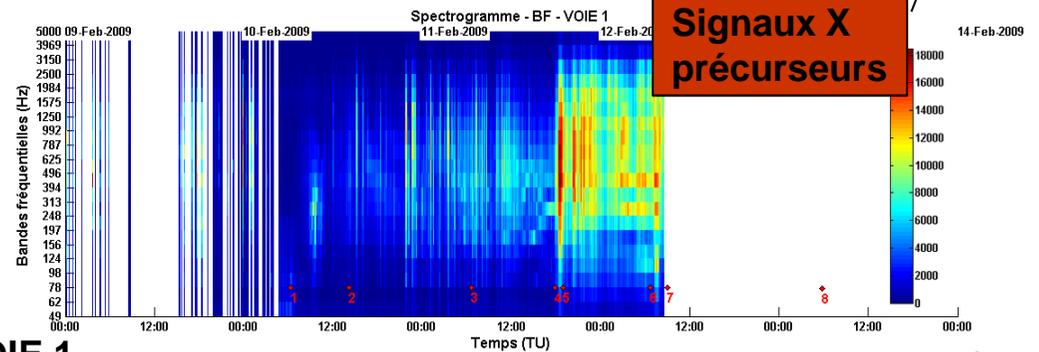


Effondrement : Enregistrements Voie 1

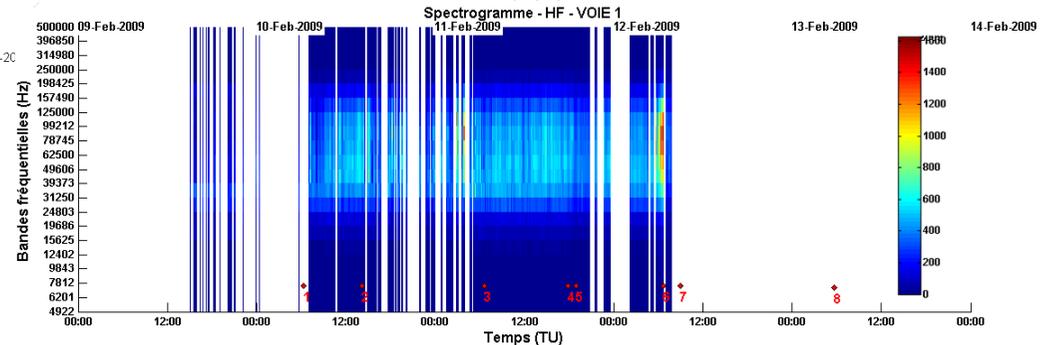
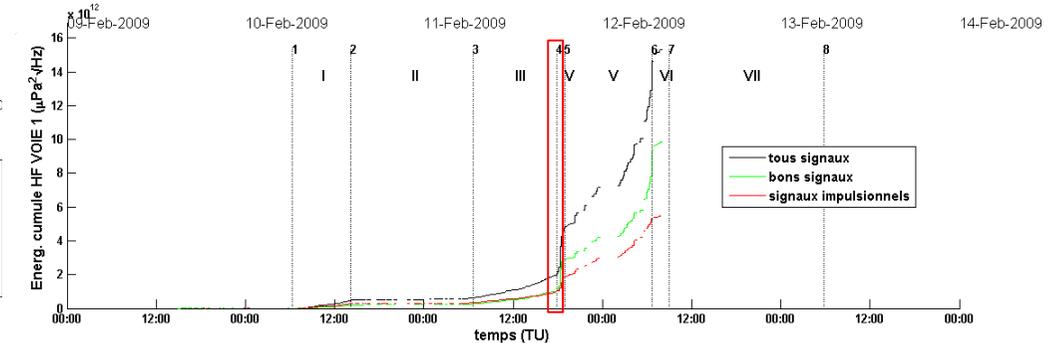
BF – VOIE 1



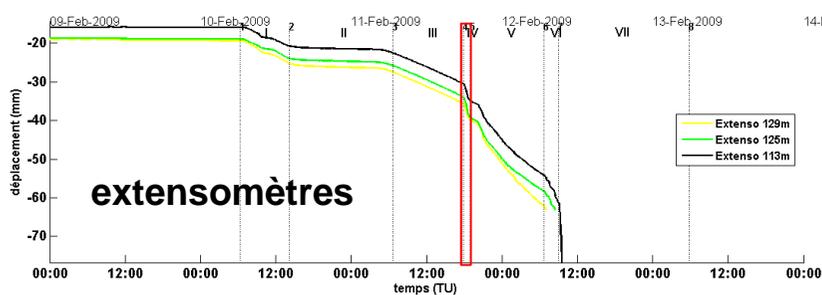
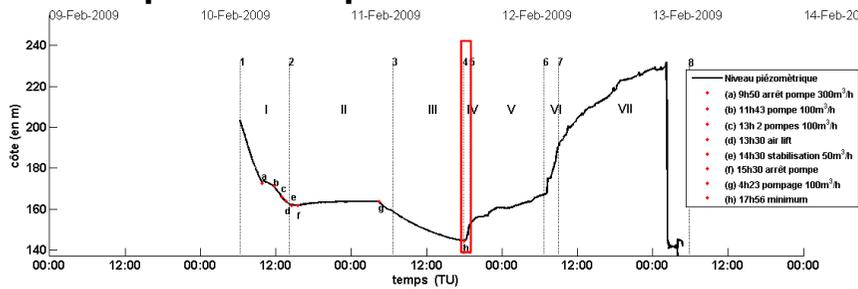
| étapes | phases |
|----------------|--------|
| 1- 10/02 6h20 | I |
| 2- 10/02 14h10 | |
| 3- 11/02 6h40 | II |
| 4- 11/02 17h50 | III |
| 5- 11/02 19h00 | IV |
| 6- 12/02 6h40 | V |
| 7- 12/02 9h20 | VI |
| 8- 13/02 5h45 | VII |



HF – VOIE 1



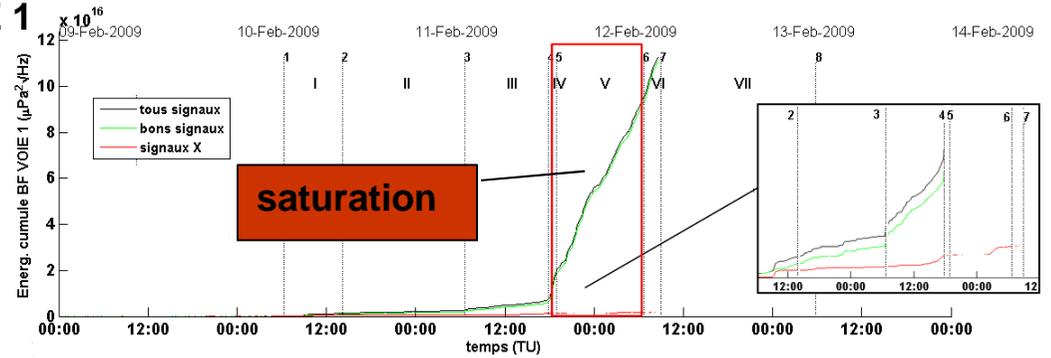
niveau piézométrique



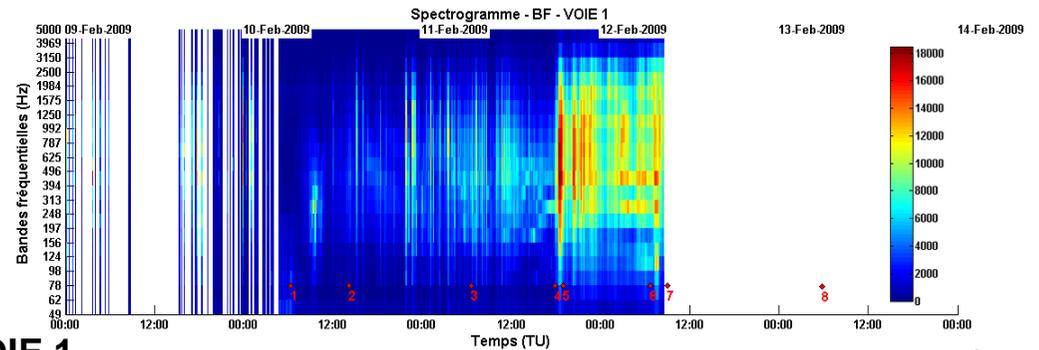
extensomètres

Effondrement : Enregistrements Voie 1

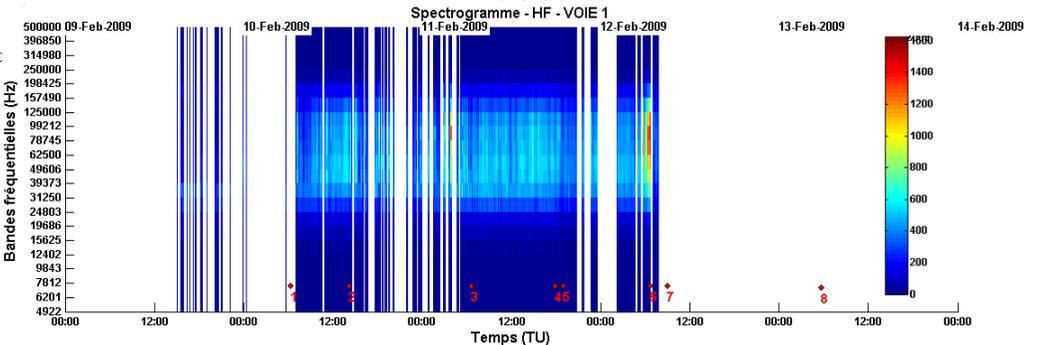
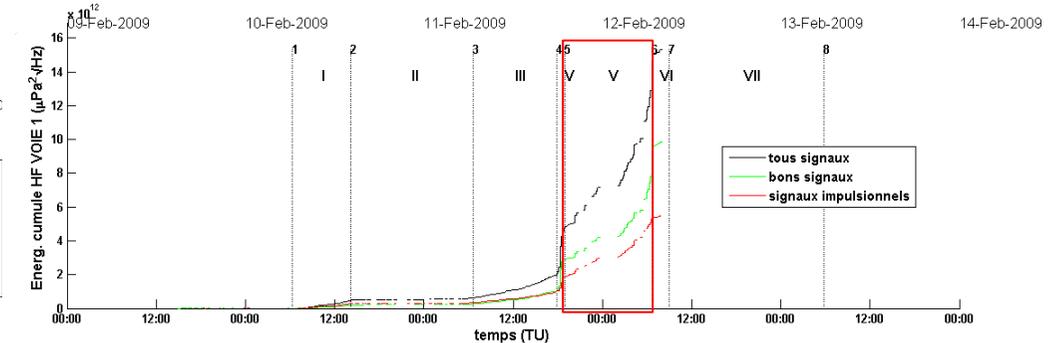
BF – VOIE 1



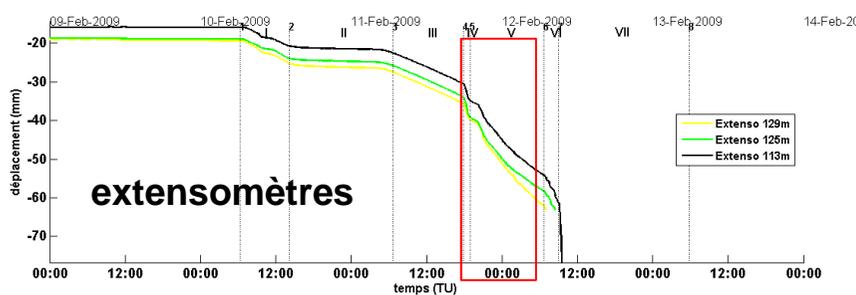
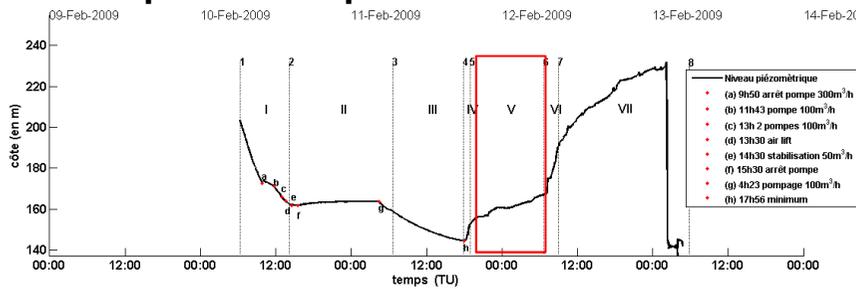
| étapes | | phases |
|----------|-------|--------|
| 1- 10/02 | 6h20 | |
| 2- 10/02 | 14h10 | |
| 3- 11/02 | 6h40 | |
| 4- 11/02 | 17h50 | |
| 5- 11/02 | 19h00 | |
| 6- 12/02 | 6h40 | |
| 7- 12/02 | 9h20 | |
| 8- 13/02 | 5h45 | |



HF – VOIE 1



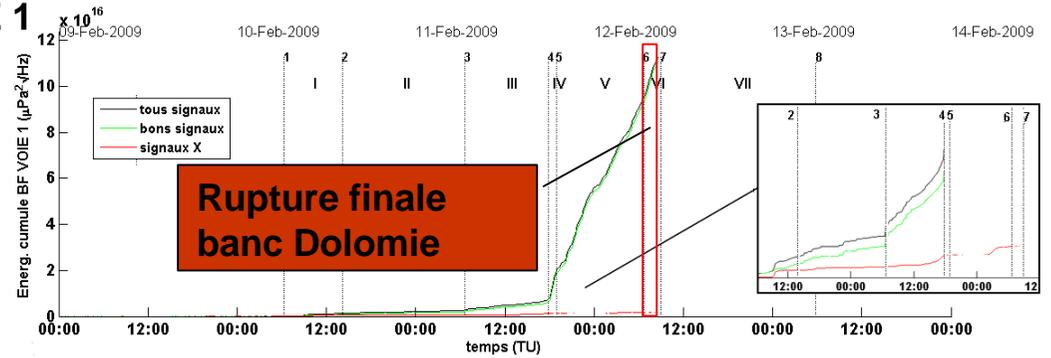
niveau piézométrique



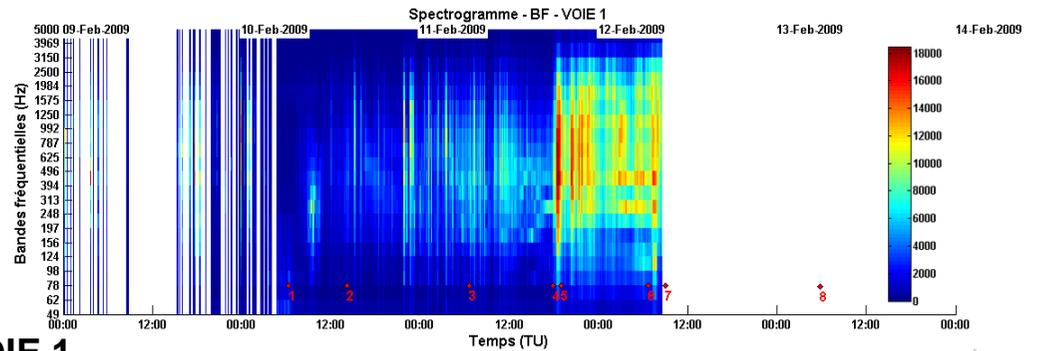
extensomètres

Effondrement : Enregistrements Voie 1

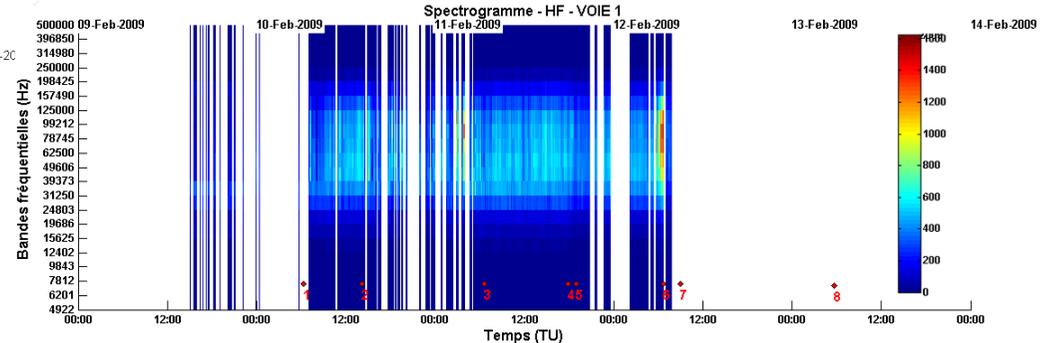
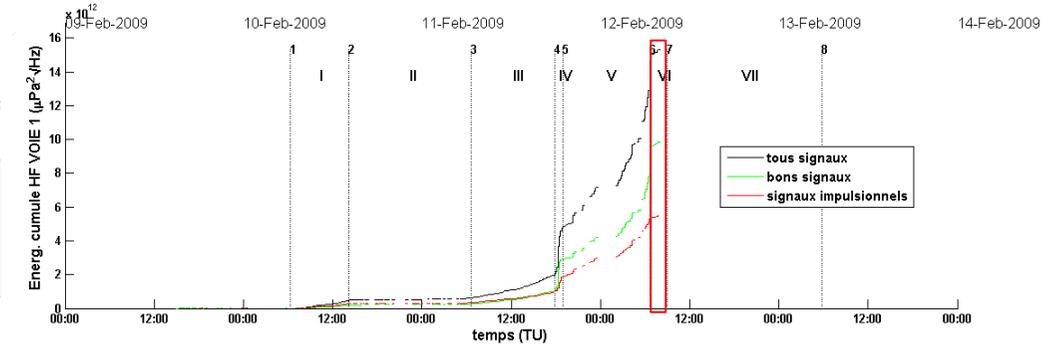
BF – VOIE 1



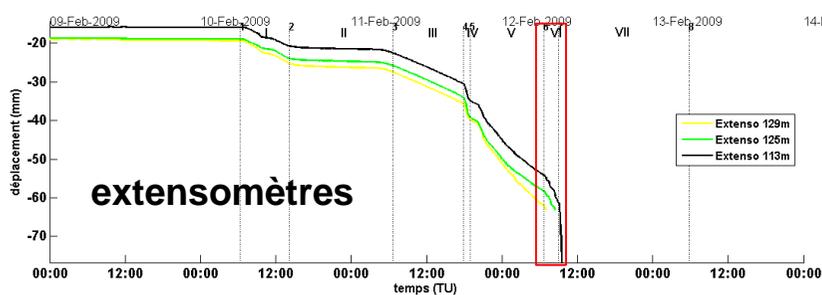
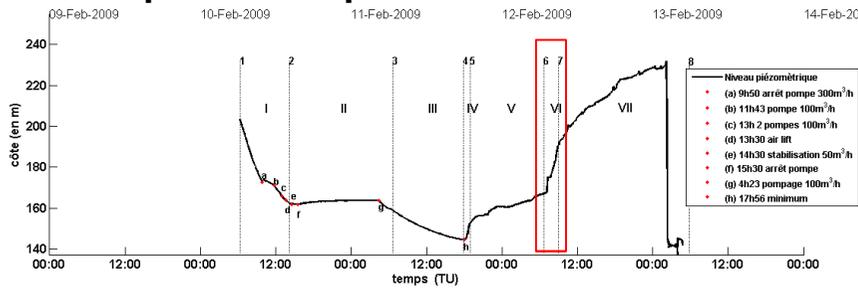
| étapes | phases |
|----------------|--------|
| 1- 10/02 6h20 | I |
| 2- 10/02 14h10 | |
| 3- 11/02 6h40 | II |
| 4- 11/02 17h50 | III |
| 5- 11/02 19h00 | IV |
| 6- 12/02 6h40 | V |
| 7- 12/02 9h20 | VI |
| 8- 13/02 5h45 | VII |



HF – VOIE 1



niveau piézométrique



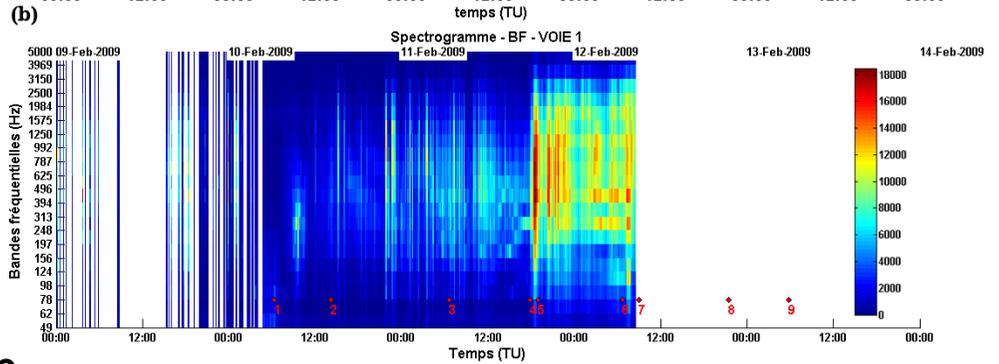
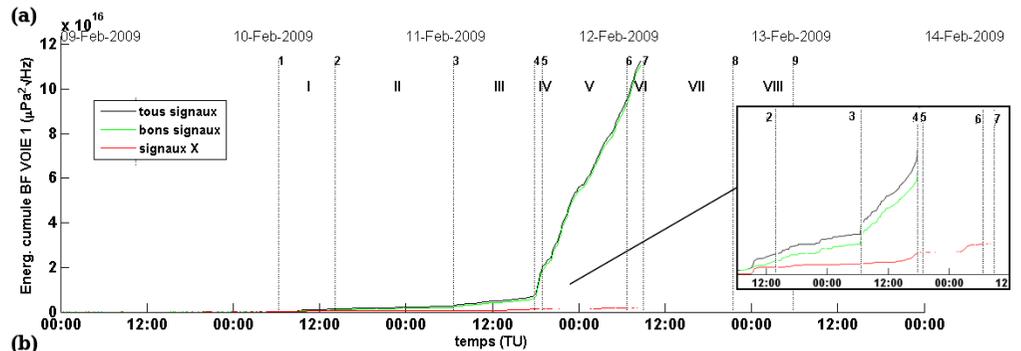
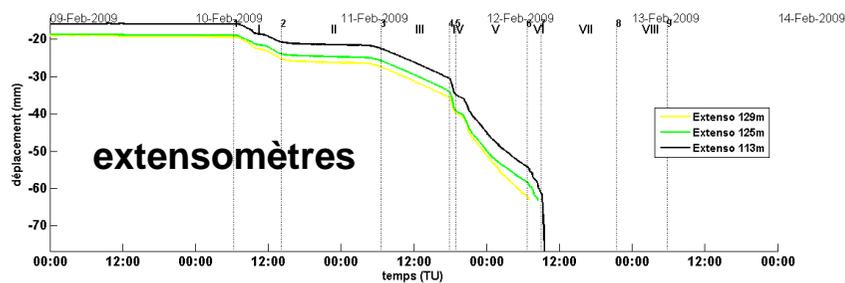
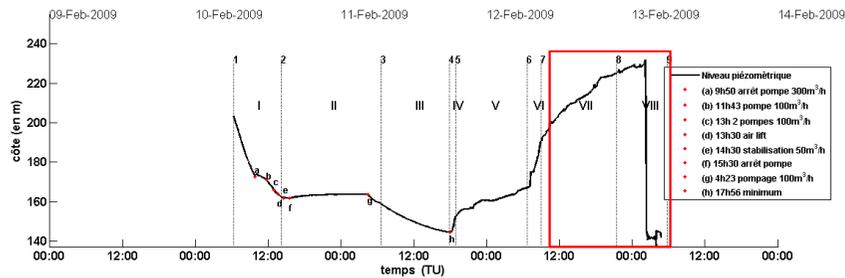
extensomètres

VOIE 1

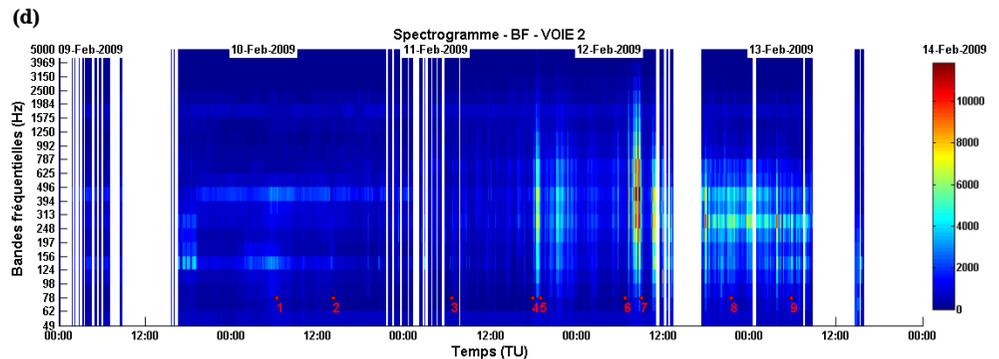
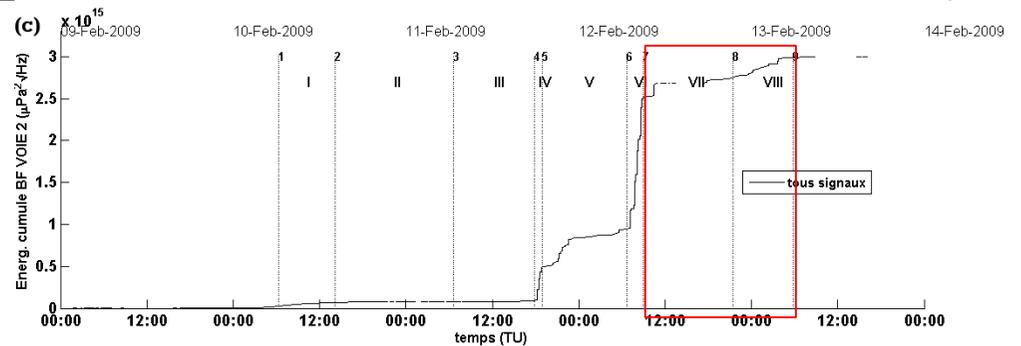
Effondrement : Enregistrements basse fréquence

| étapes | | phases |
|----------|-------|--------|
| 1- 10/02 | 6h20 | I |
| 2- 10/02 | 14h10 | II |
| 3- 11/02 | 6h40 | III |
| 4- 11/02 | 17h50 | IV |
| 5- 11/02 | 19h00 | V |
| 6- 12/02 | 6h40 | VI |
| 7- 12/02 | 9h20 | VII |
| 8- 13/02 | 5h45 | |

niveau piézométrique



VOIE 2



Conclusions

- ❑ **Validation du système de monitoring hydroacoustique pour la surveillance de la stabilité d'ouvrages souterrains**

- ❑ **Mise en évidence de phénomènes précurseurs**
 - **Augmentation simultanée de l'énergie sismique**

 - **Signaux précurseurs de l'effondrement**

Perspectives

- ❑ **Analyser les signaux impulsionnels**

- ❑ **Comparer les résultats avec d'autres mesures mises en œuvre sur le site**

- ❑ **Etablir une corrélation plus précise avec un modèle mécanique**

Sismologie large bande: intérêt et applications

Description et la quantification de paramètres mécaniques fondamentaux des systèmes naturels et exploités

- * aléa sismique et volcanique
- * aléa glissement de terrain
- * exploration et surveillance sites géothermiques

Pour l'après mine, mécanisme d'effondrement.

volume impliqué: $\sim 1-10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

durée d'effondrement: secondes à heures

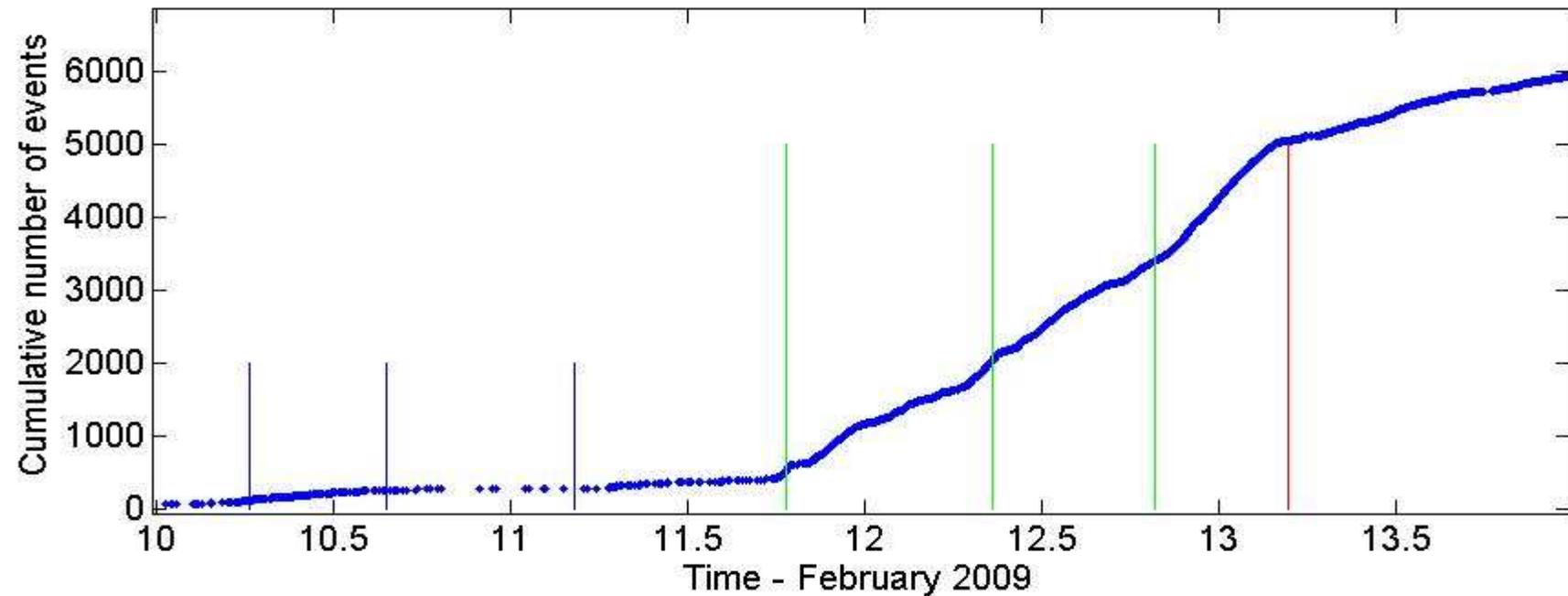
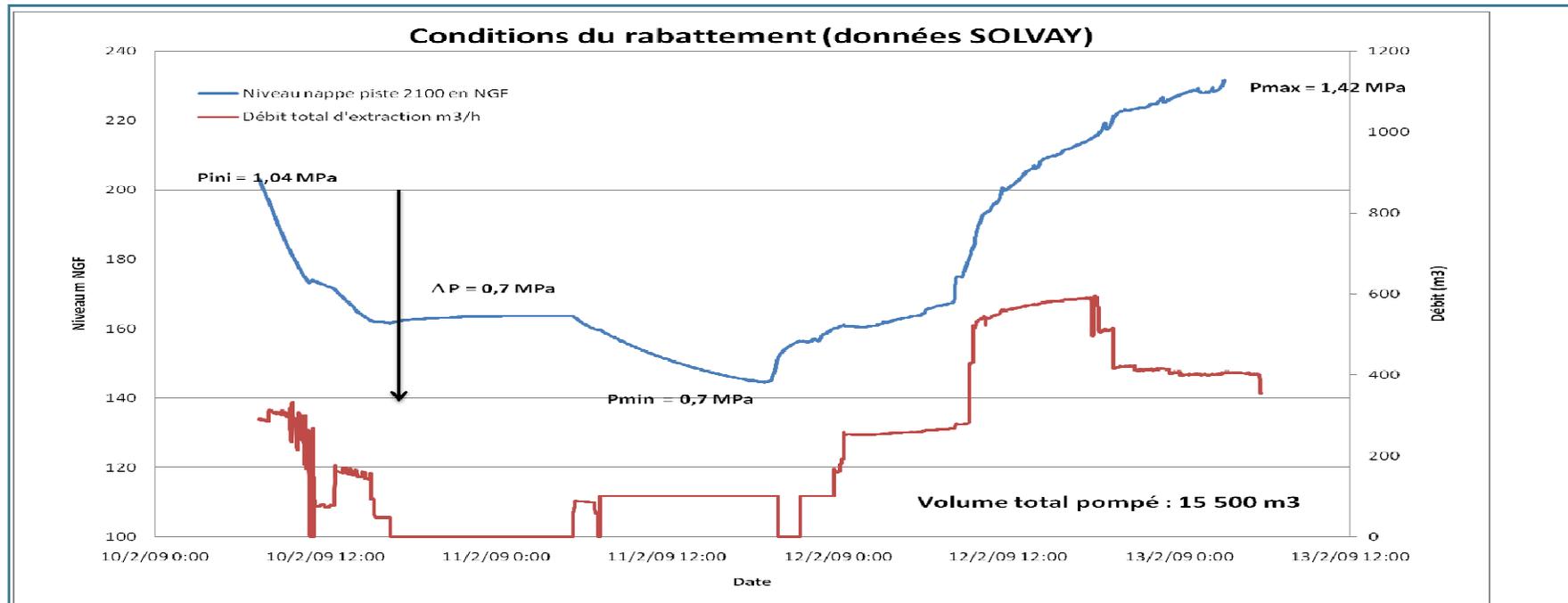
Génération de **basses fréquences** en plus des fréquences microsismiques:

sismomètres « large-bande »

gravimètre

OBJECTIF: apporter des éléments pour la compréhension du mécanisme d'effondrement de la cavité saline de Cerville





Différents évènements observés

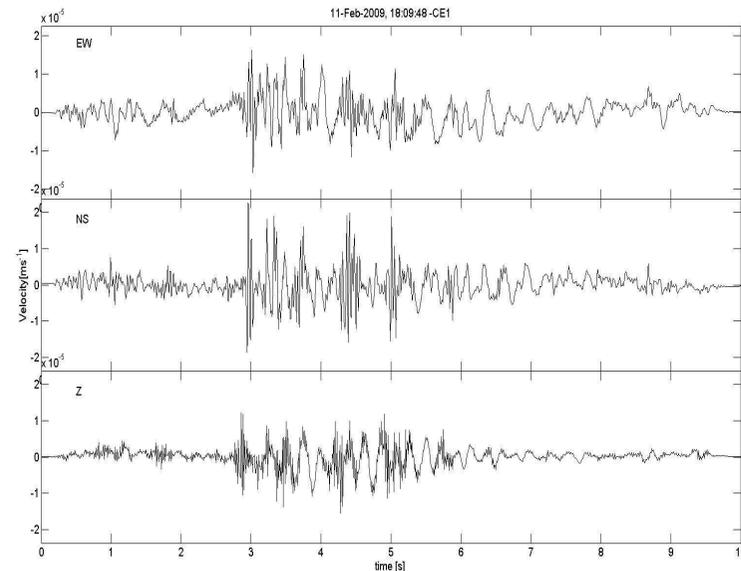
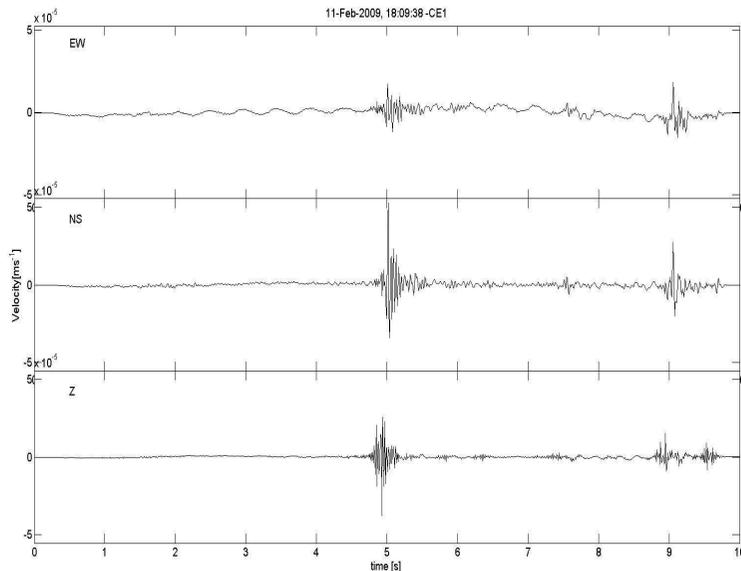
> Signaux hautes fréquences (2 – 50 Hz)

- Rupture fragile des bancs de dolomie et autres bancs

> Signaux longue-période (0.2 – 5 Hz)

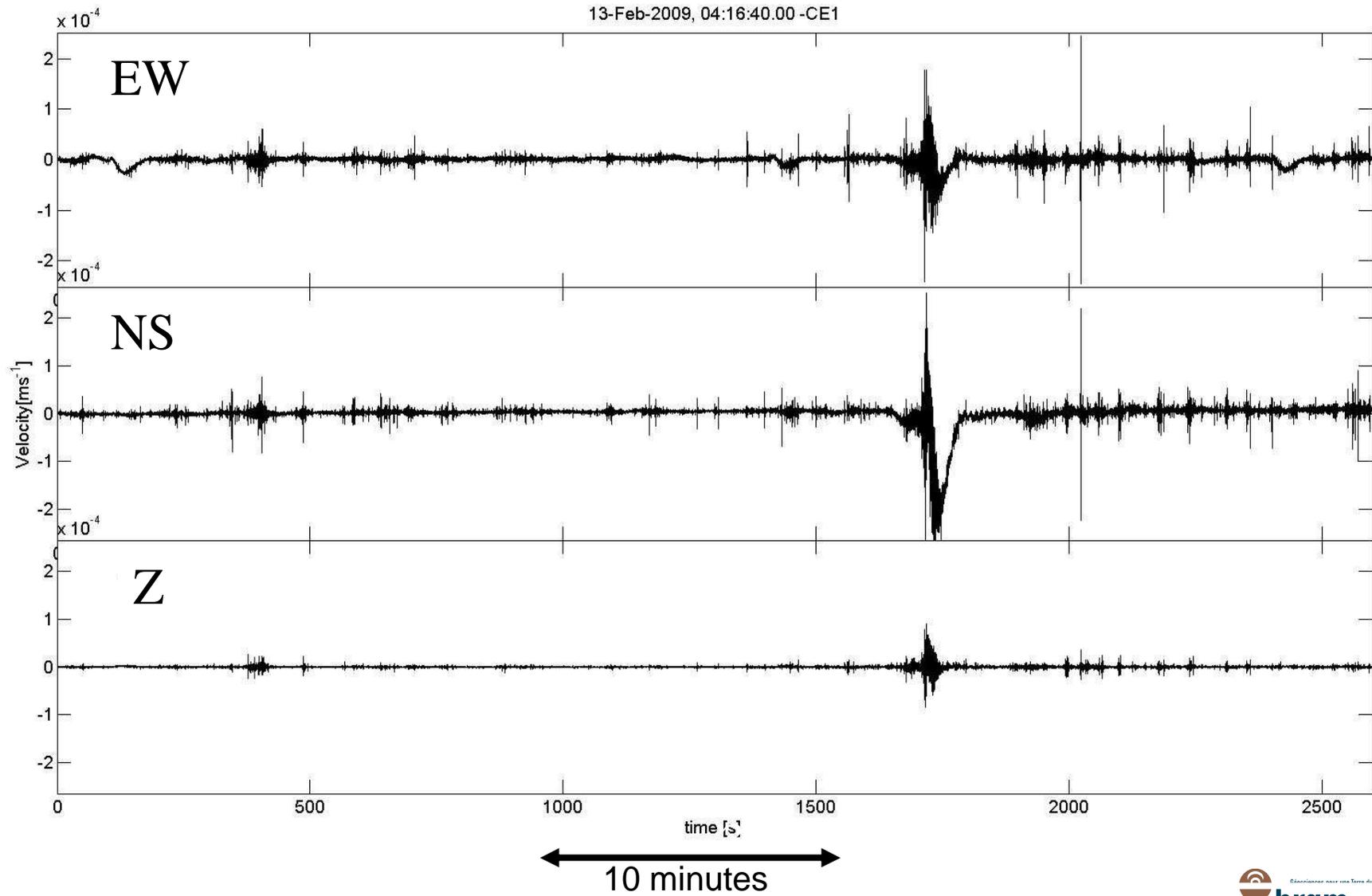
- Résonance de fractures
- Migration de fluide dans les fractures

> Signaux très longue-périodes (0.05 – 0.2 Hz)

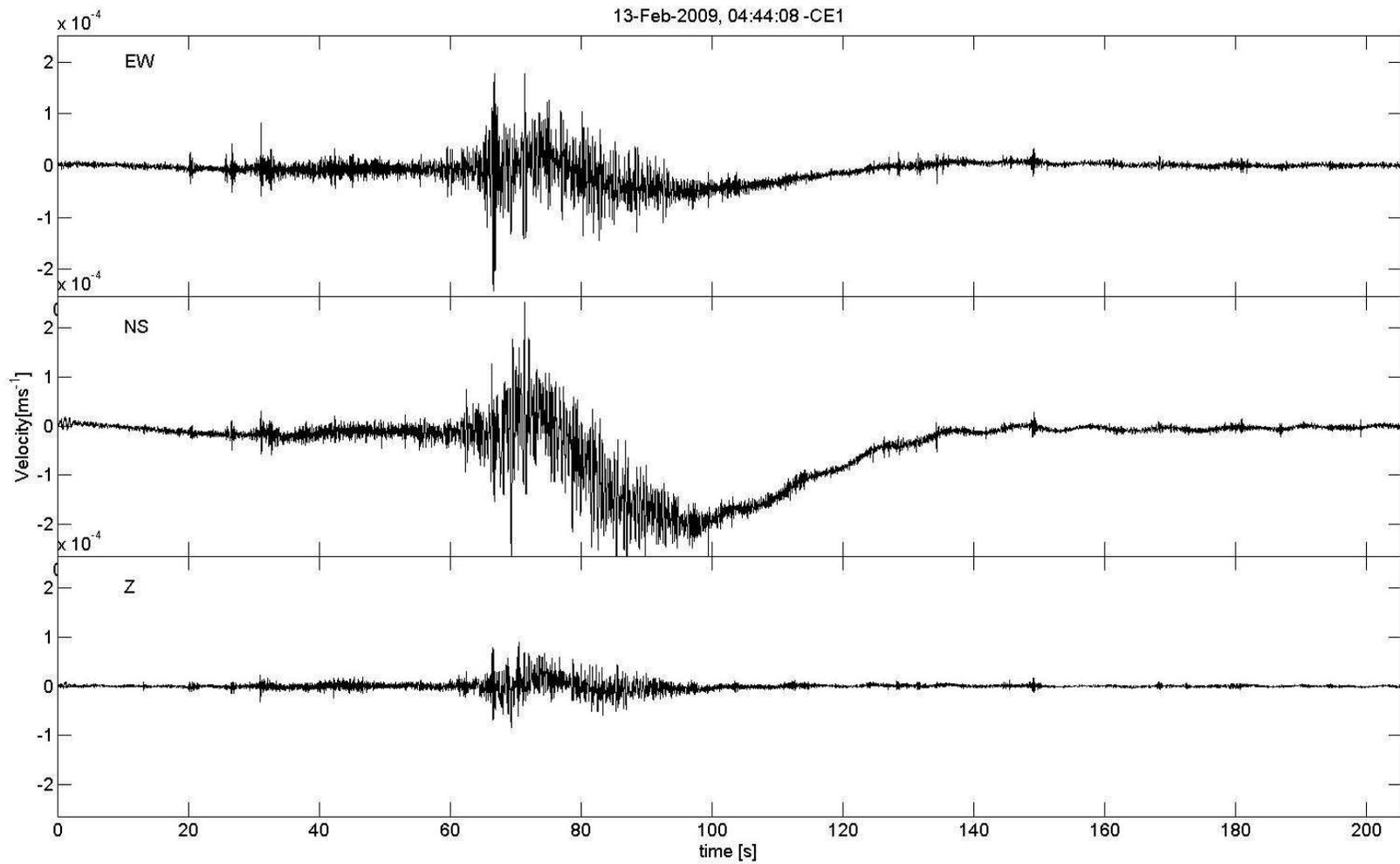


Effondrement

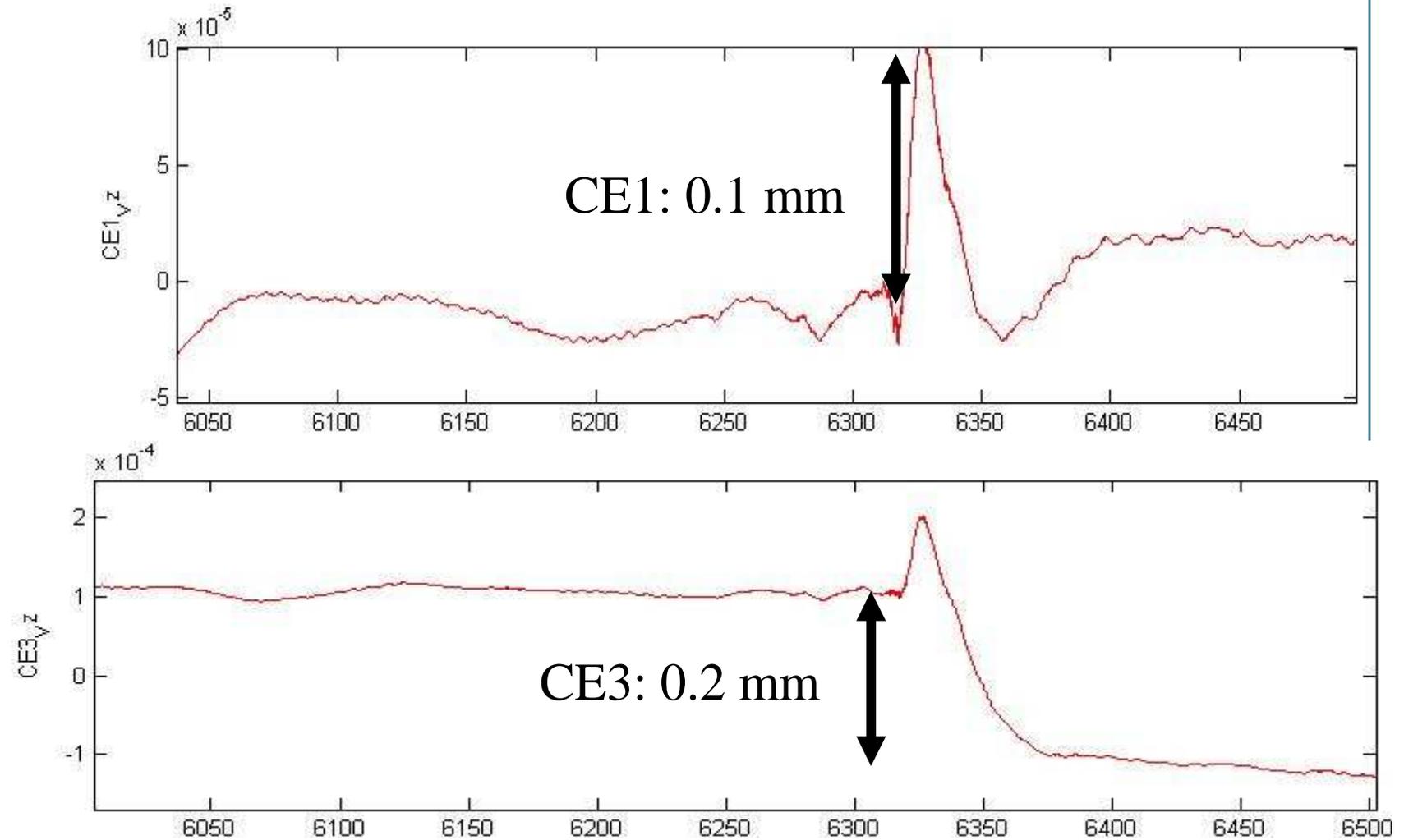
Données non filtrées



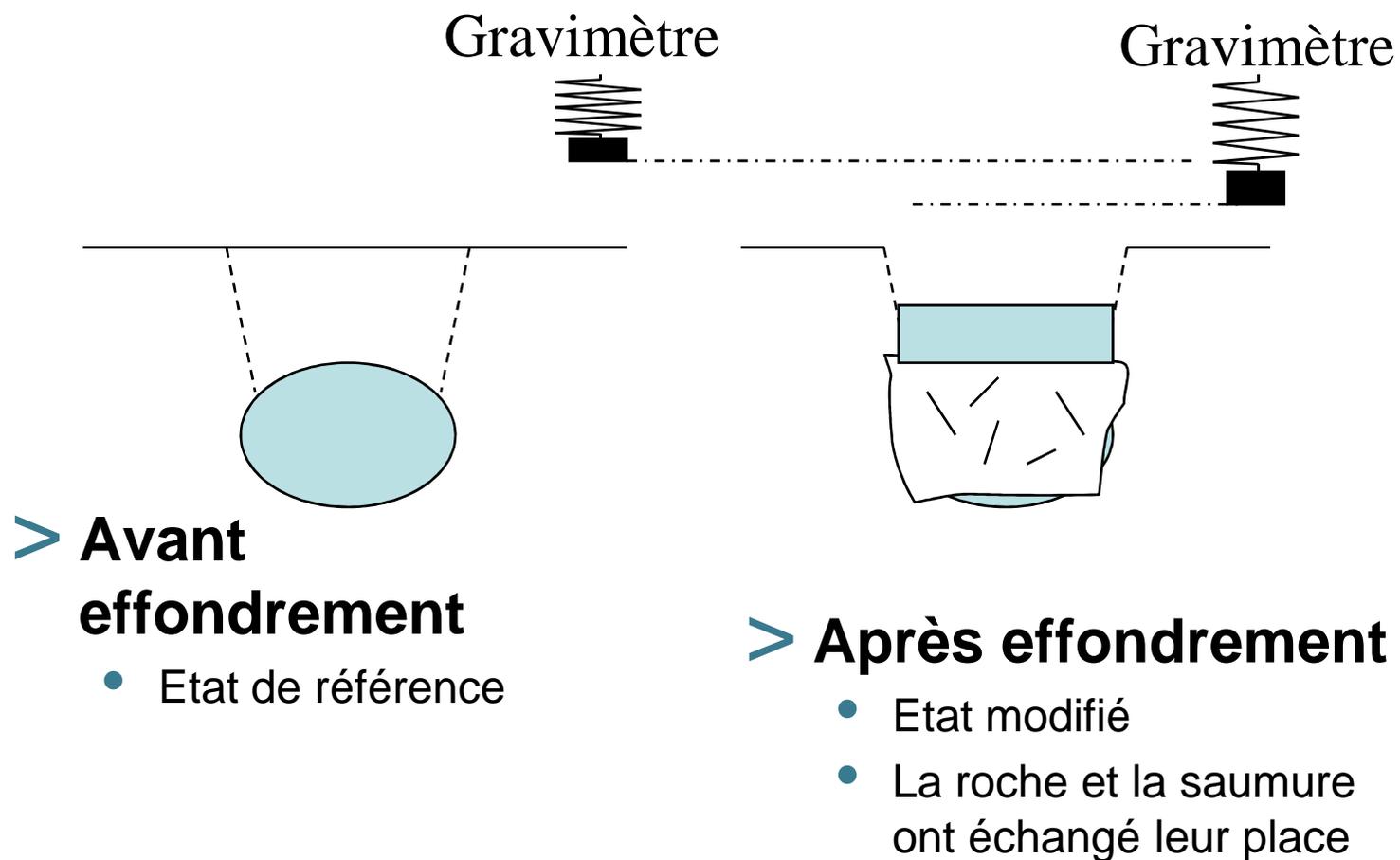
Effondrement



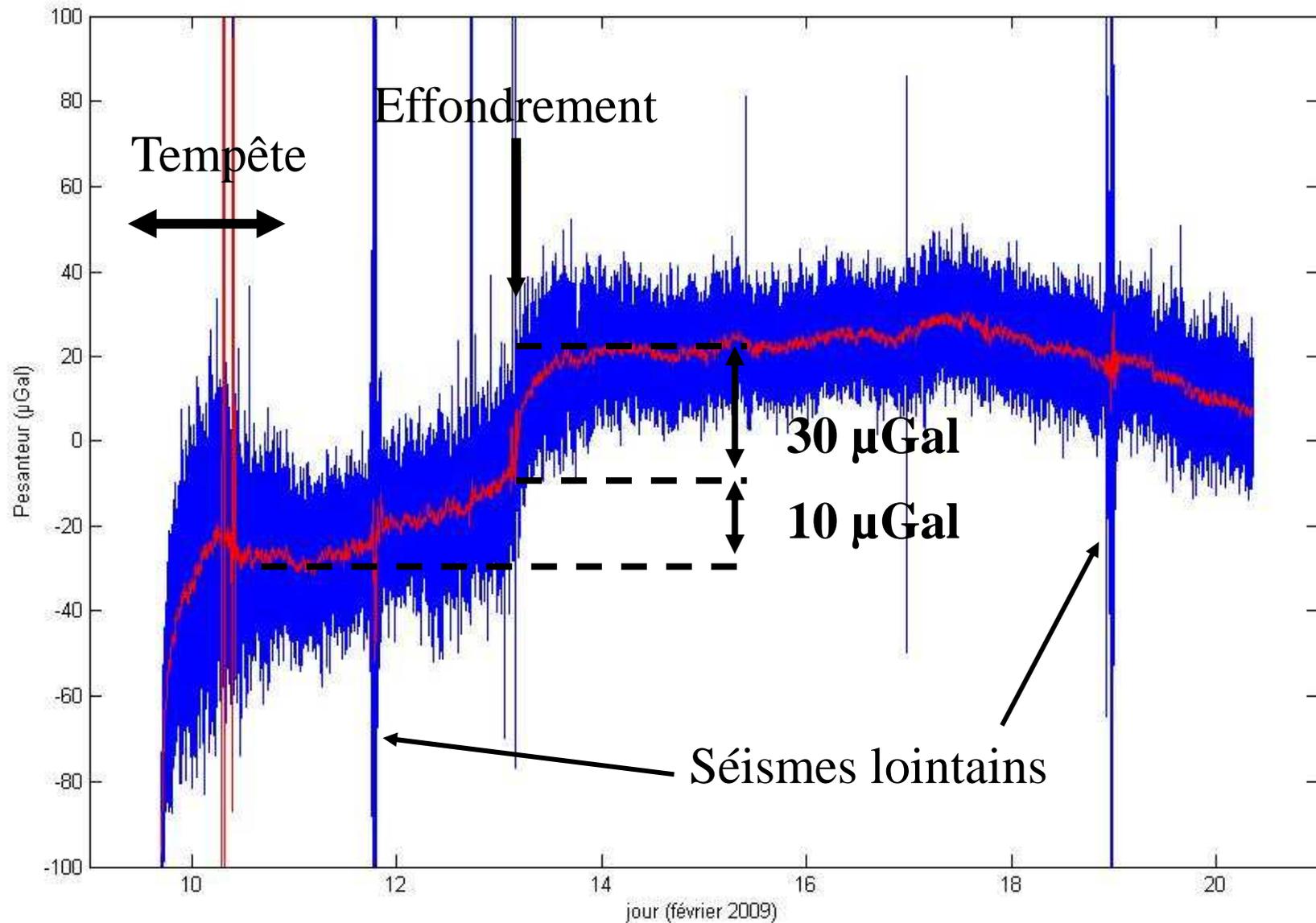
Déplacements



Variation de pesanteur due à l'effondrement



Pesanteur résiduelle



Conclusions et perspectives

> Méthodes

- Sismologie large bande permet de détecter et quantifier les mouvements du sol et du sous-sol, sur une large gamme de fréquence lors de l'effondrement.
- La gravimétrie en continu a permis de détecter et quantifier les masses déplacées lors de l'effondrement.
- Cela ouvre des **perspectives pour la surveillance** des sites miniers superficiels
- Comparaison avec les mesures des accéléromètres (en cours)

> Les résultats contribuent à quantifier des éléments du **mécanisme de l'effondrement**

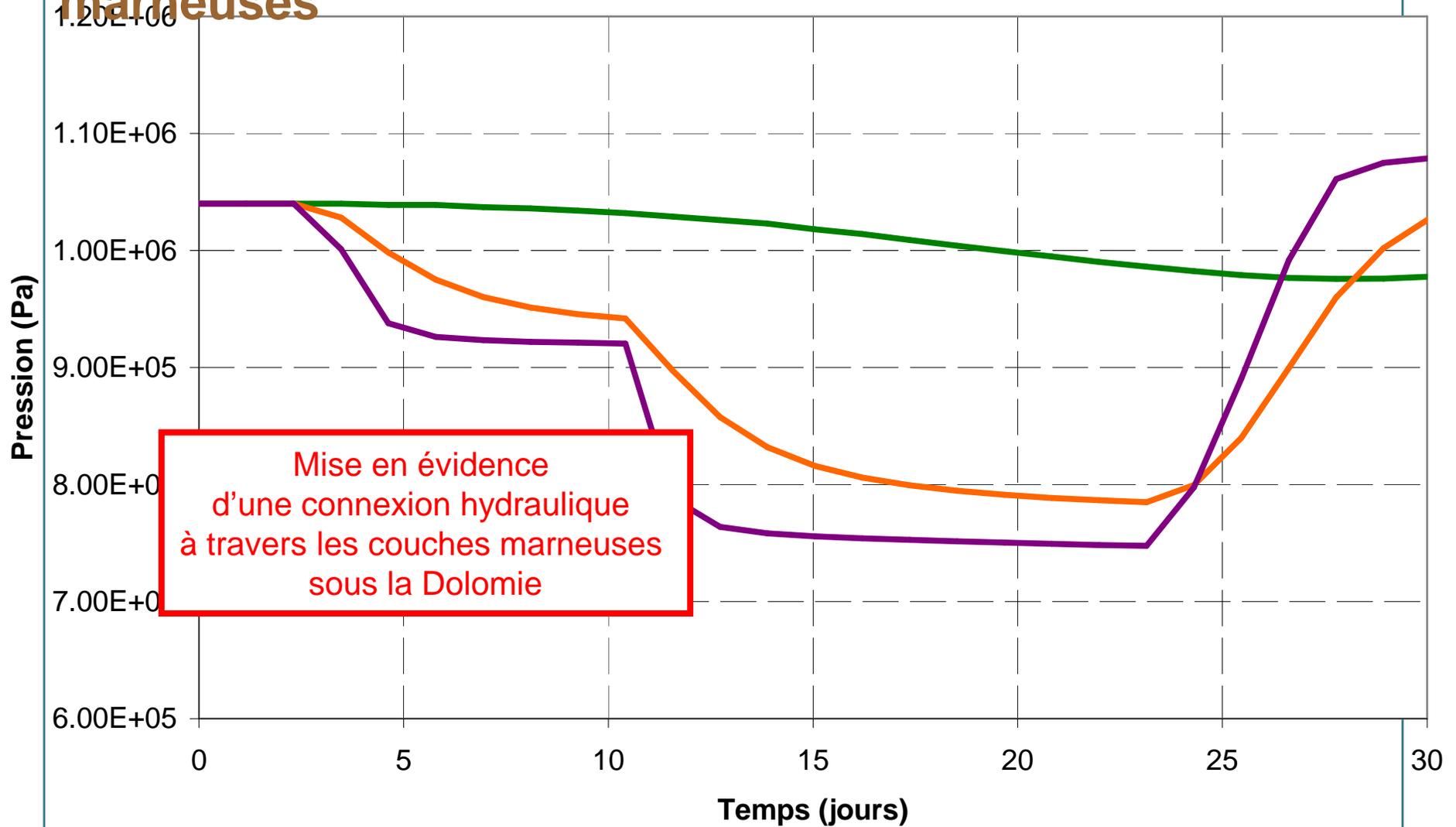
- Un **seul évènement majeur**, court et assez peu énergétique
- Une myriade **d'évènements précurseurs**, y compris dans les basses fréquences, parfois assez énergétiques
- Quantification et interprétation dans le modèle global à préciser

Géomécanique

> Annexes:

- Influence de la perméabilité des marnes
- Champ des déplacements verticaux après essai n°1

Influence de la conductivité (m/s) des couches marneuses

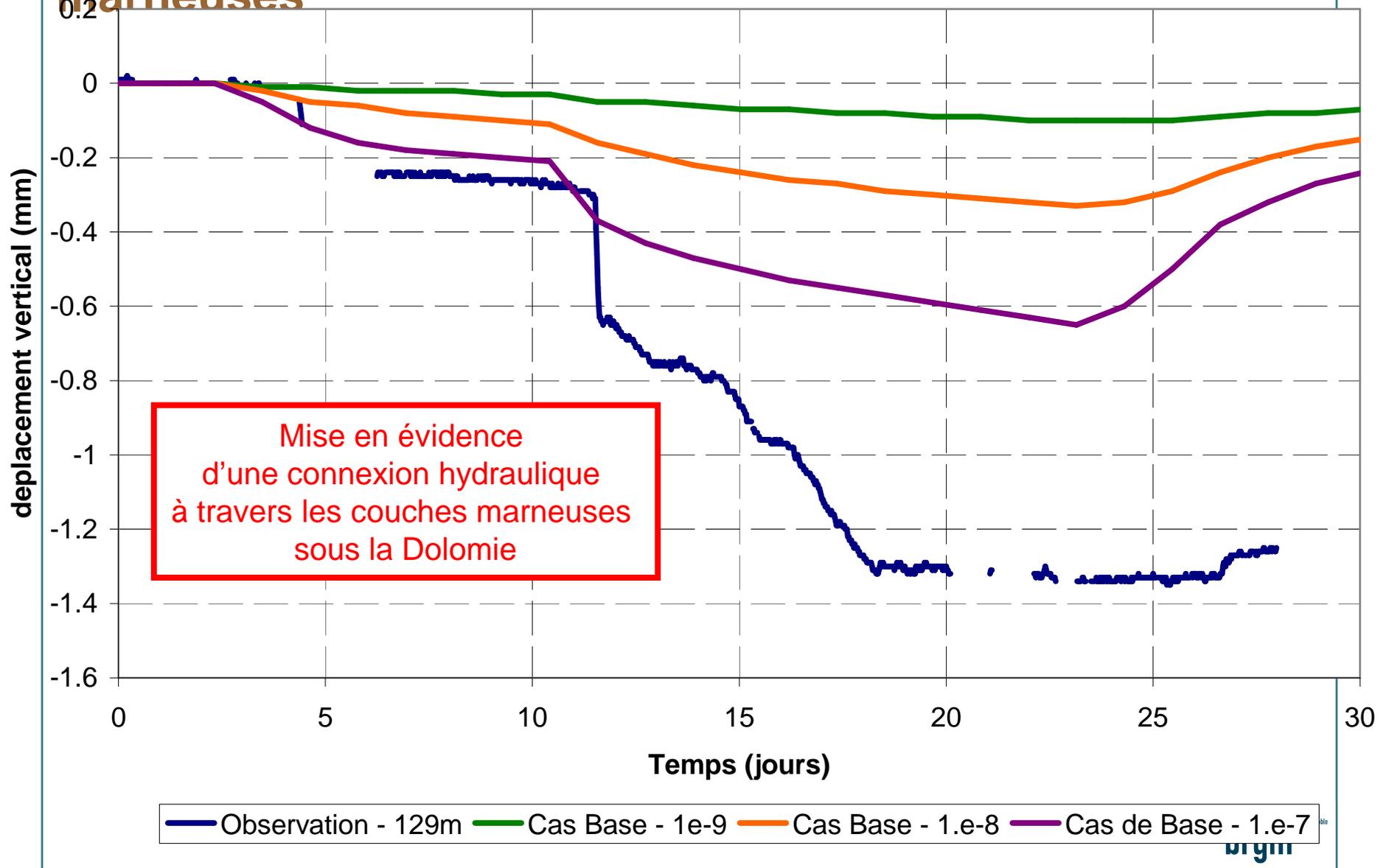


Mise en évidence d'une connexion hydraulique à travers les couches marneuses sous la Dolomie

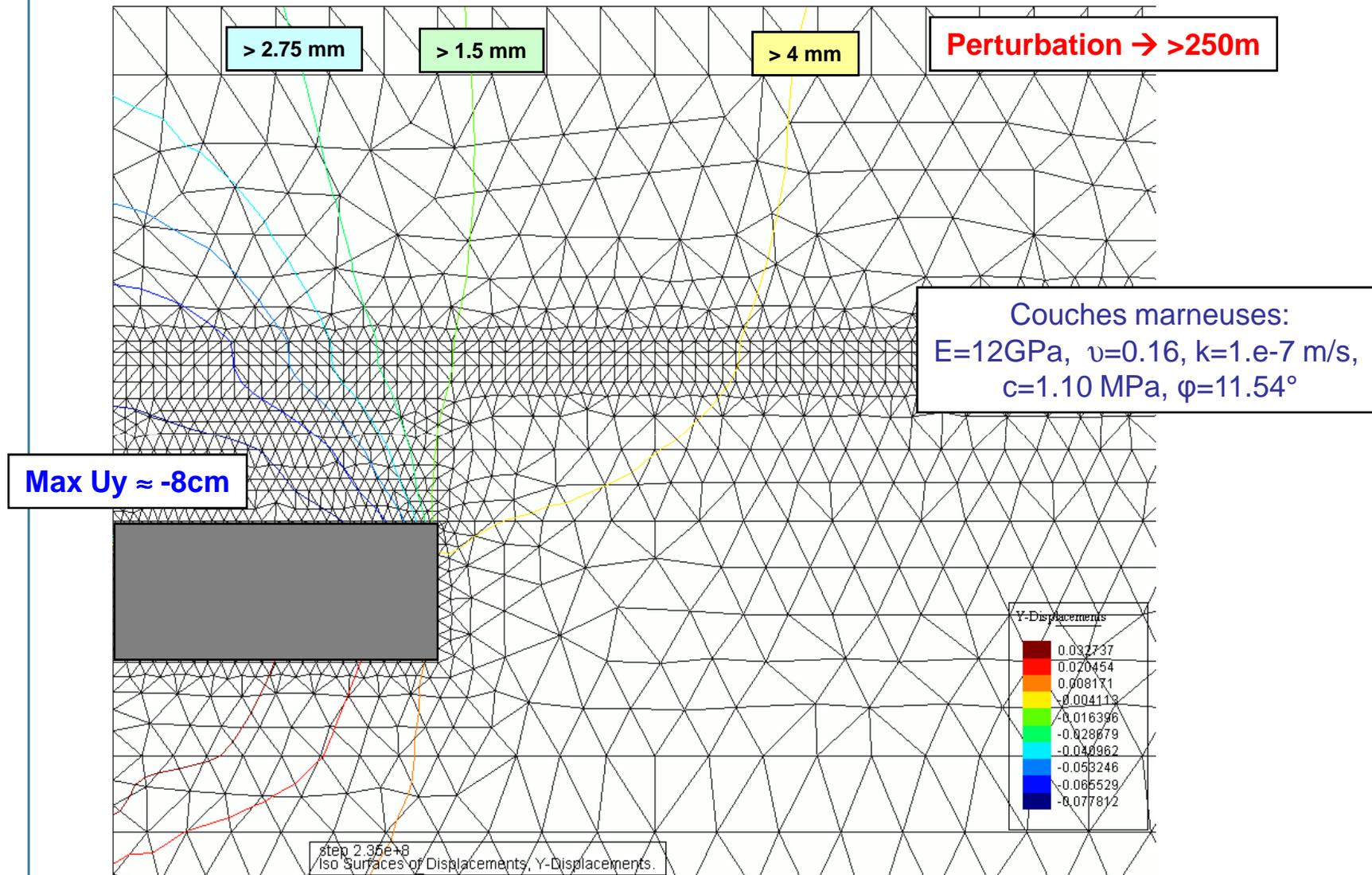
— Cas Base - 1e-9 — Cas Base - 1.e-8 — Cas de Base - 1.e-7



Influence de la perméabilité (m/s) des couches marneuses



Champ des déplacements U_y , après essai n°1

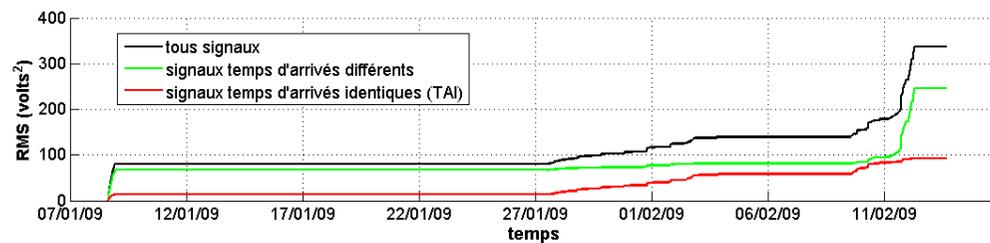
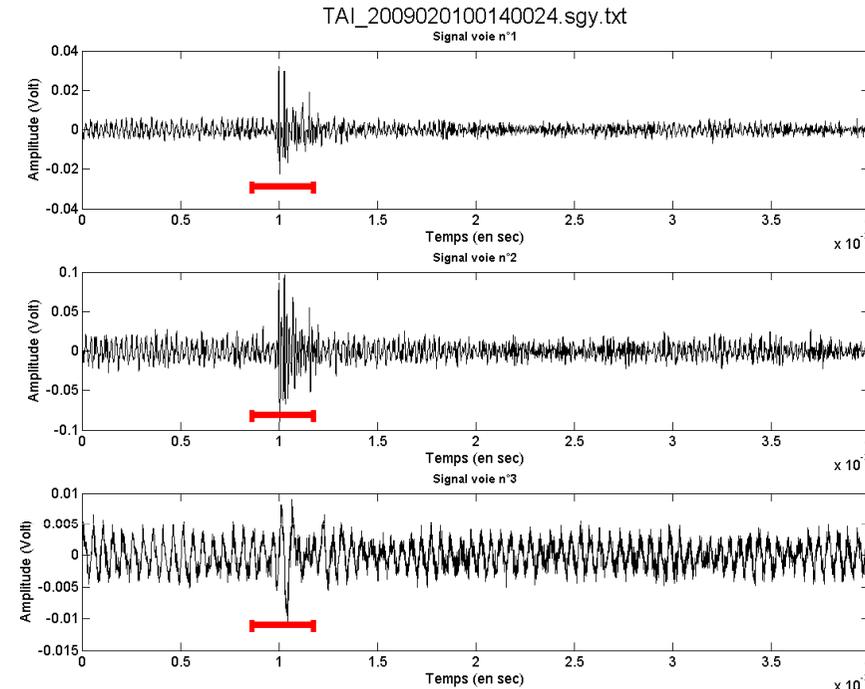


ANNEXES – Hydroacoustique

TRAITEMENT INITIAL DES HF

Signaux aux temps d'arrivés identiques (TAI)

- Plus de 77% des événements totaux
- Origines indéterminées
- Indépendant de la déformation mécanique



VOIE 3 NON TRAITEE

Conversion des unités

1 – Valeur lue en digits

Vd

2 – Codage carte d'acquisition donne valeur en mV

$$Vv = 10 \cdot 10^3 \times \frac{Vd}{2^{16}}$$

3 – Valeur en dB ref $1V_{RMS}$

$$Vs = 20 \times \log_{10}(Vv)$$

4 – Gains Préampli (G_p) & Filtre (G_f) donne valeur en sortie du capteur

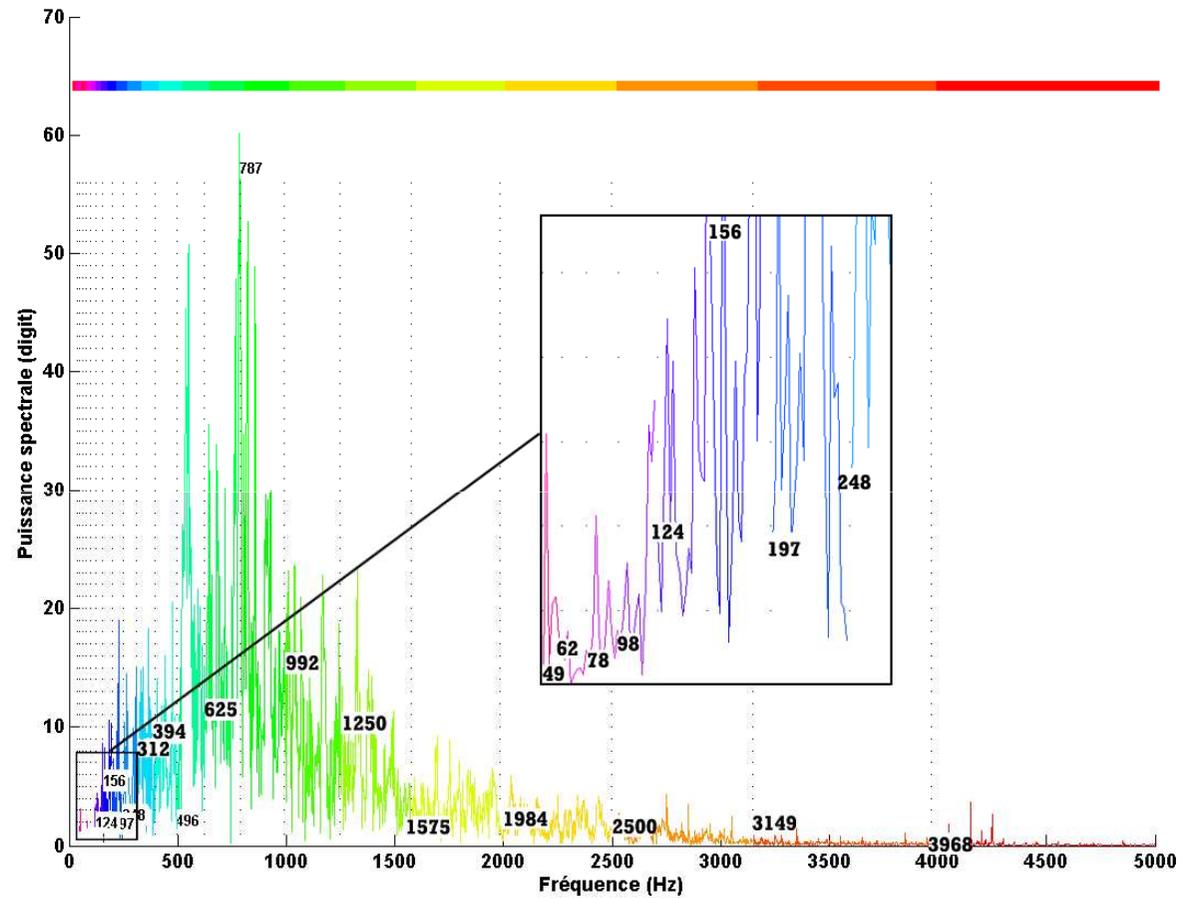
$$V_{dBref1V_{RMS}} = Vs - Gp - Gf$$

5 – Sensibilité des hydrophones S_b donne variation de pression en $\mu Pa/\sqrt{Hz}$

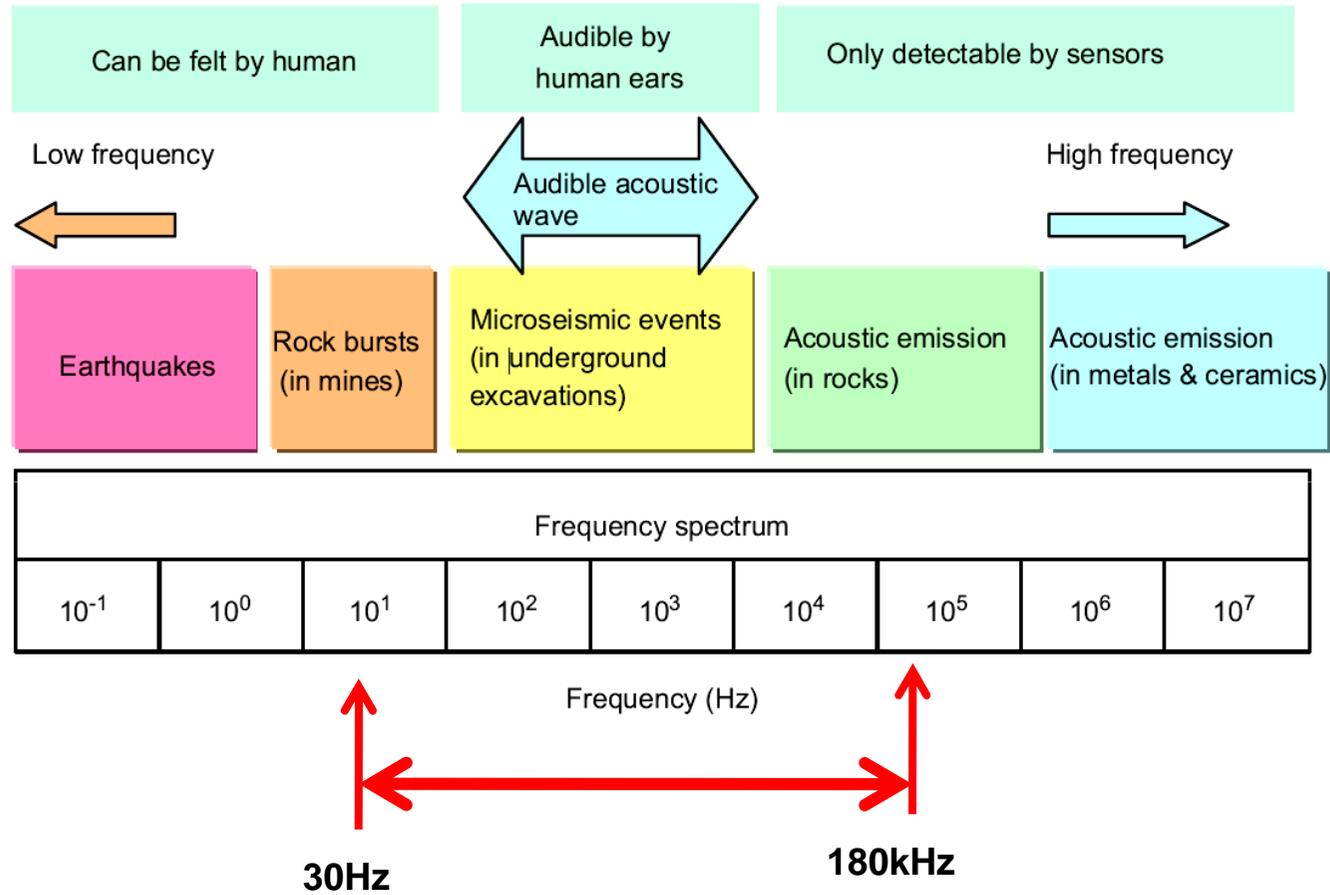
$$\Delta P = V_{dBref1V_{RMS}} - S_b - 10 \times \log_{10}(120 \cdot 10^3)$$

Spectrogramme

Pas en tiers
d'octave

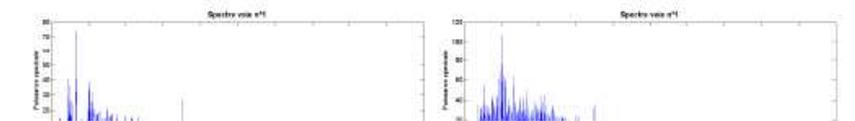
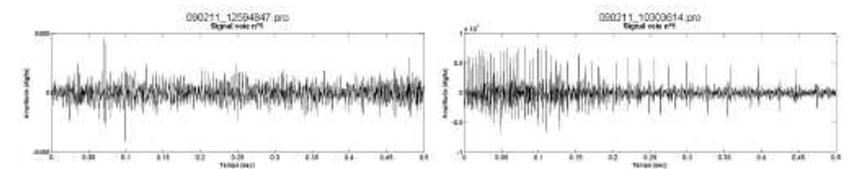
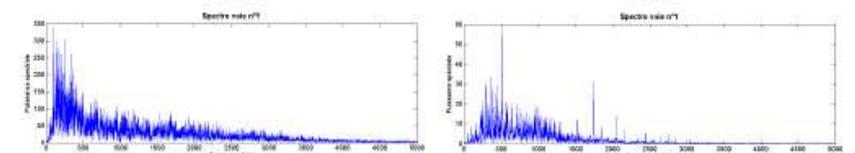
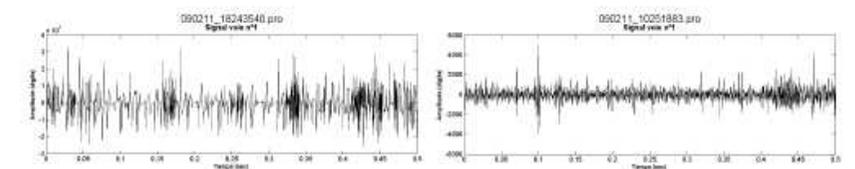
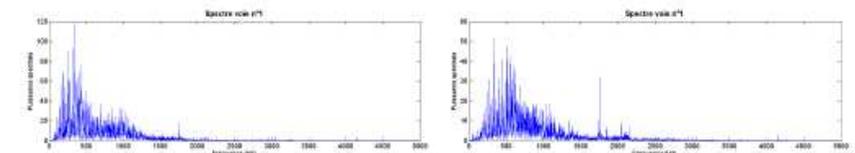
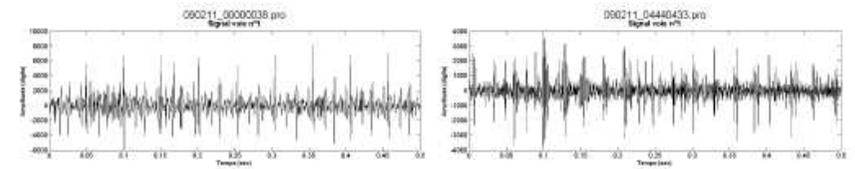
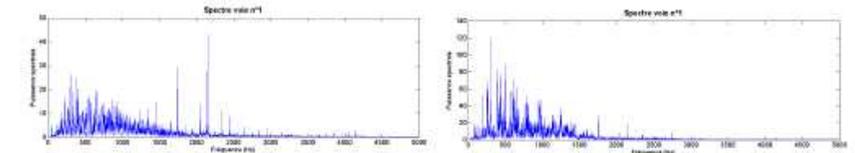
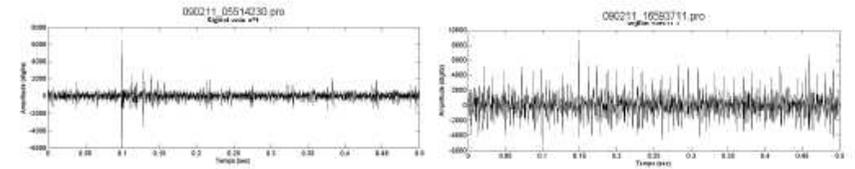
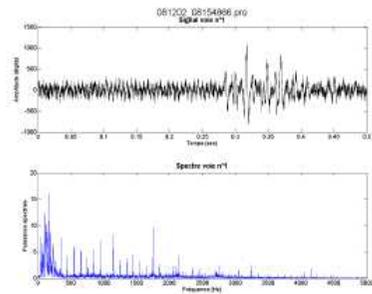
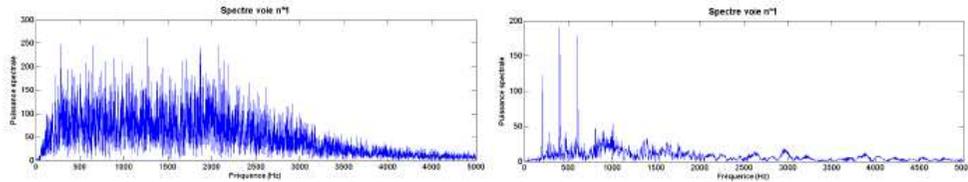
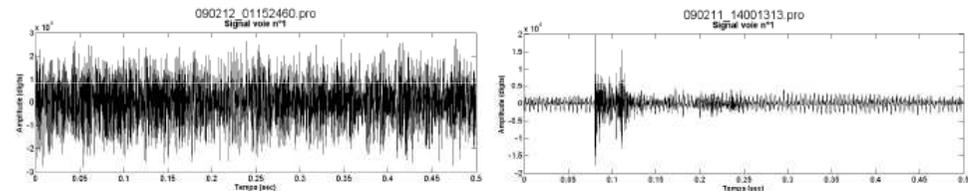
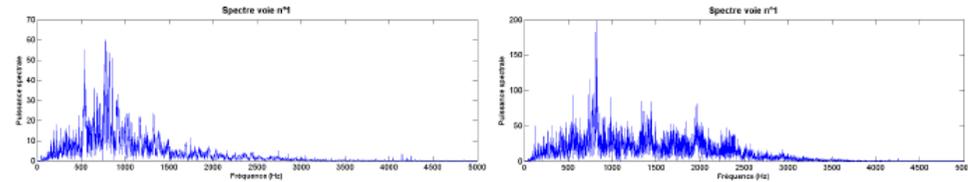
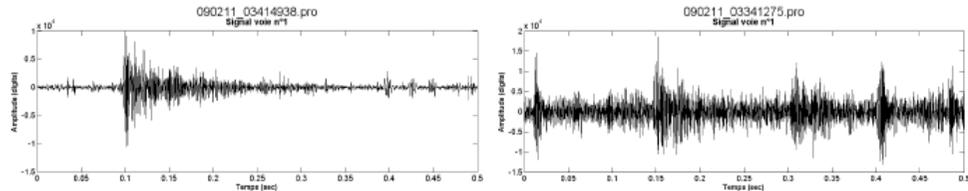


ONDE ACCOUSTIQUE

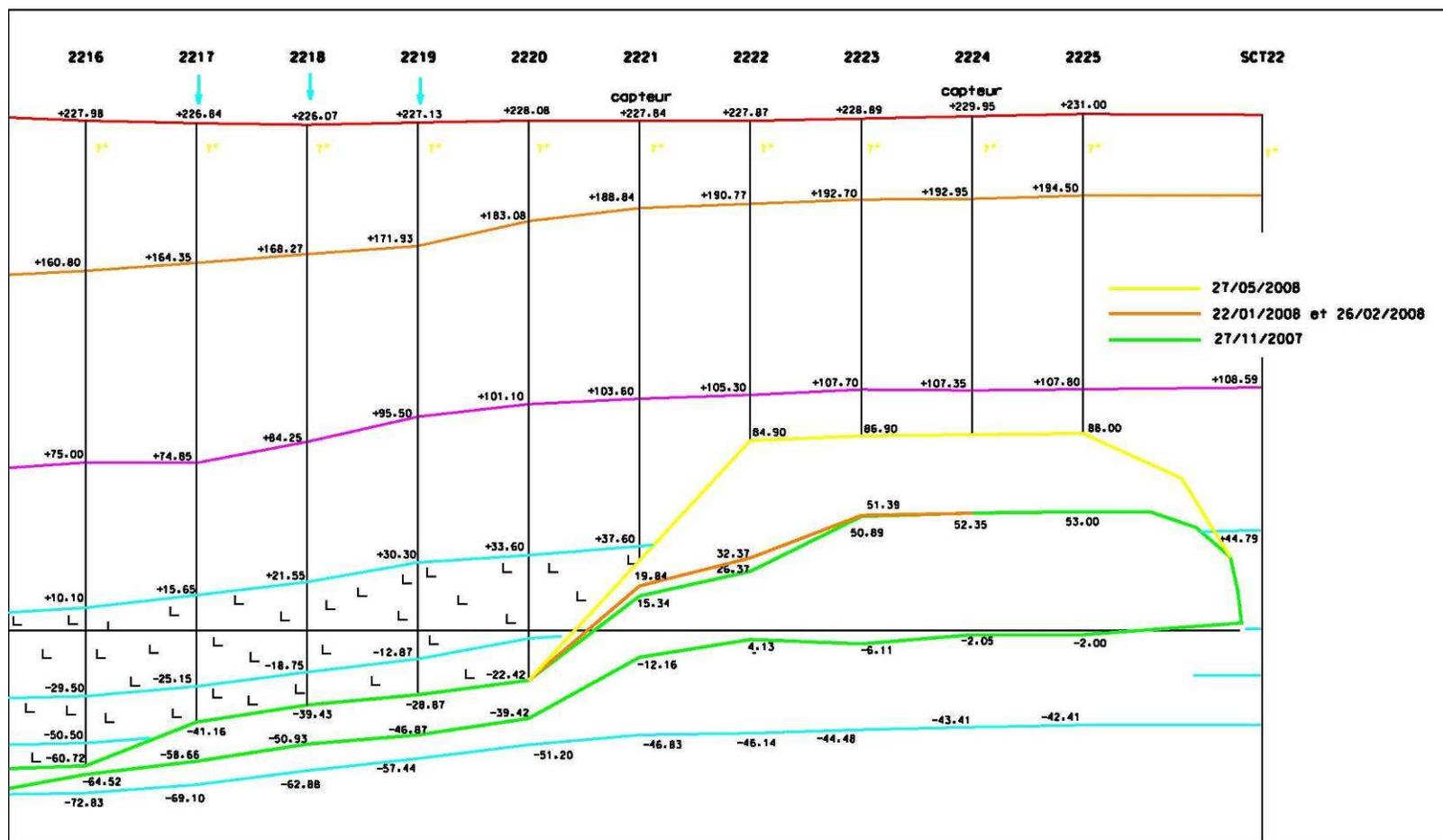


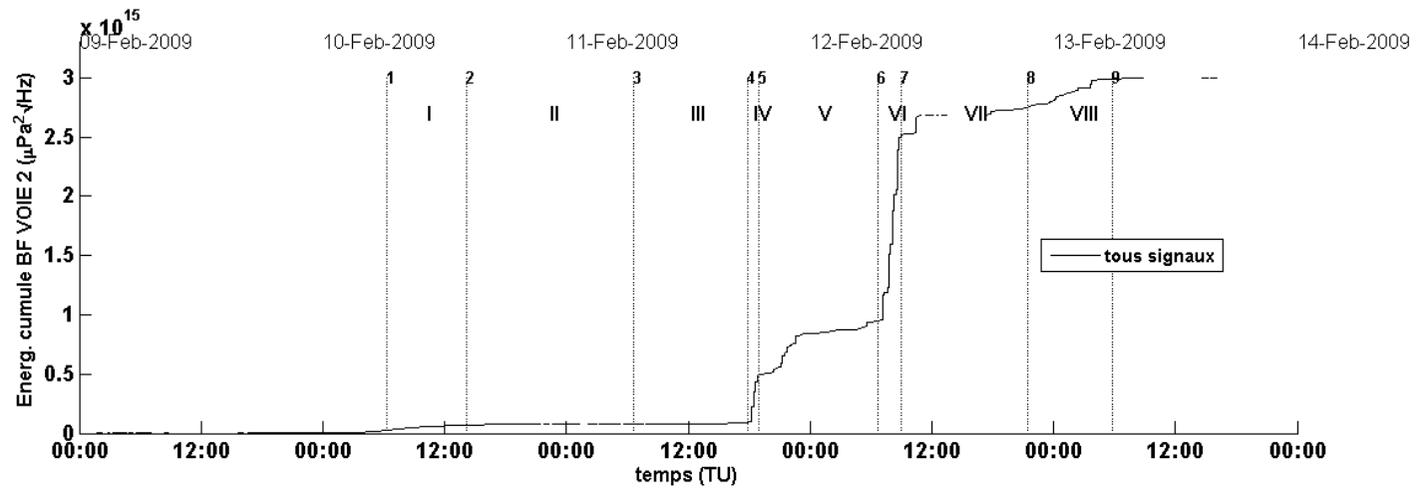
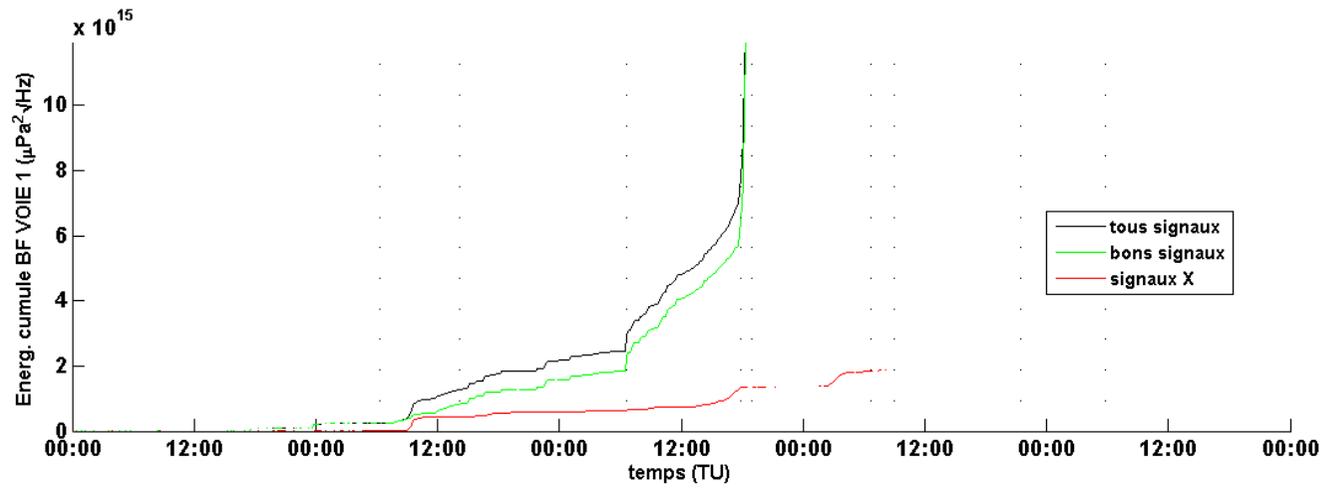
SIGNAUX X BF VOIE1

BONS SIGNAUX BF VOIE1



Excavations de la cavité saline



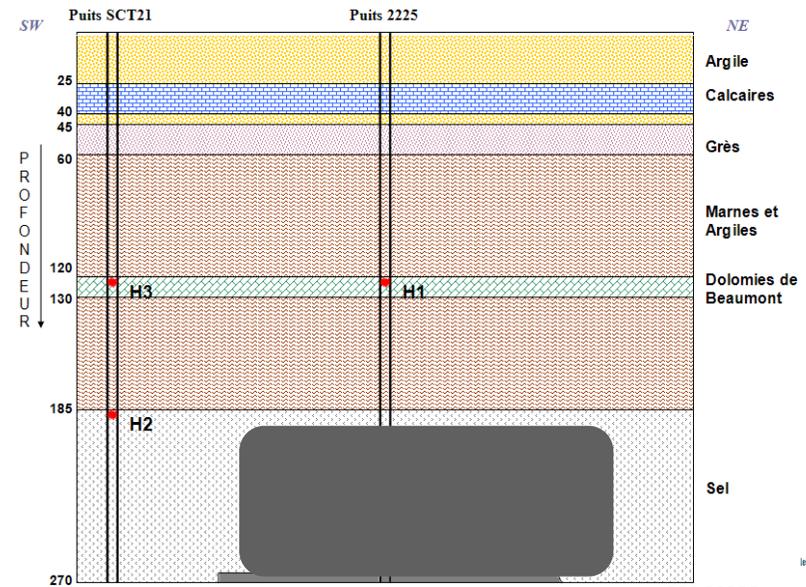
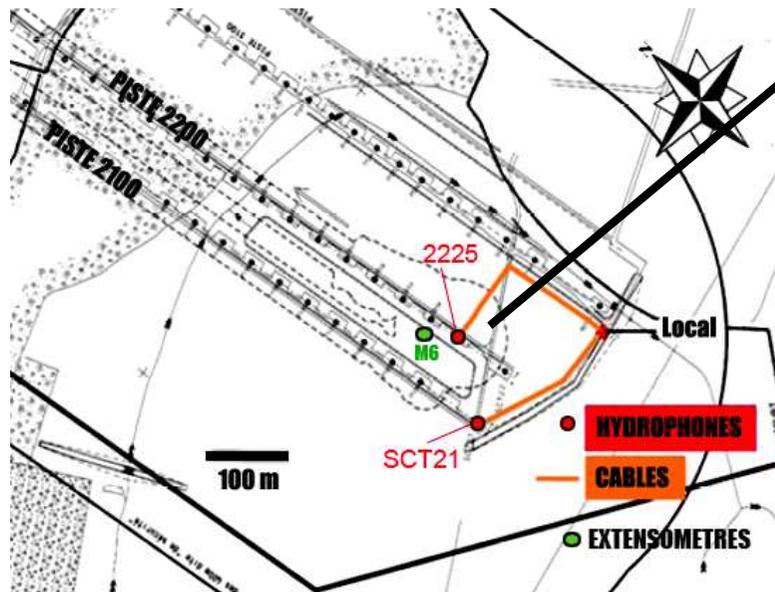


Localisation des 3 hydrophones

H1 – Puits 2225 à 125m de profondeur (banc de Dolomie)

H2 – Puits SCT21 à 185m de profondeur (interface sel-marnes)

H3 - Puits SCT21 à 125m de profondeur

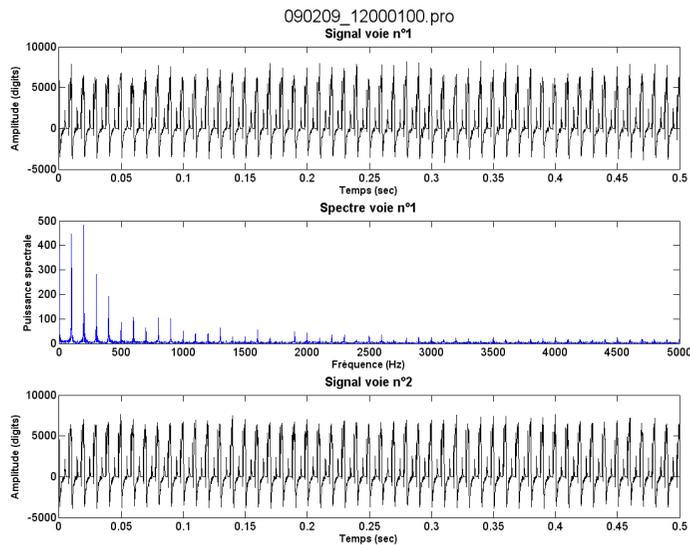


Bernardie et Lebert, 2005 (Document SOLVAY)

Narayanan (2006)

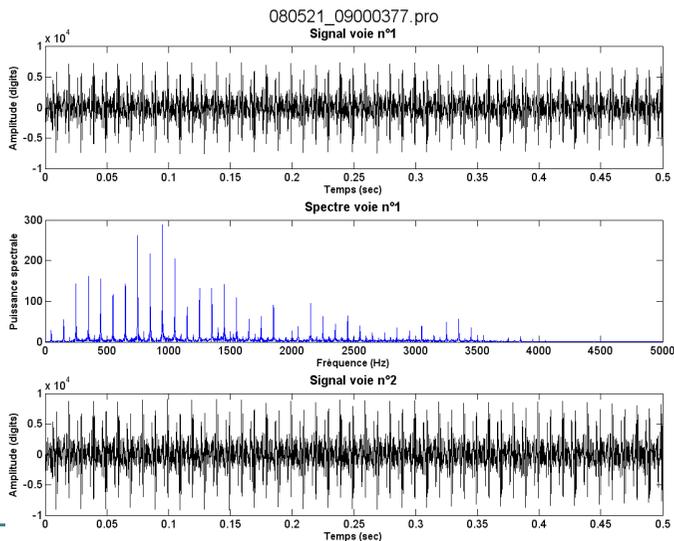
Ugim

TRAITEMENT INITIAL DES BF



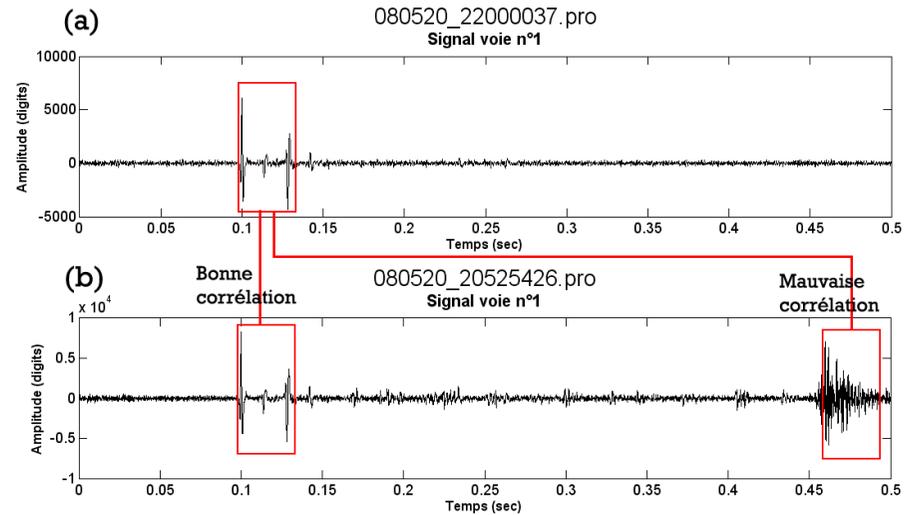
BE1 « Bruit Electronique 1 »

➤ 1 346 733 événements



BE2 « Bruit Electronique 2 »

➤ 8 640 événements



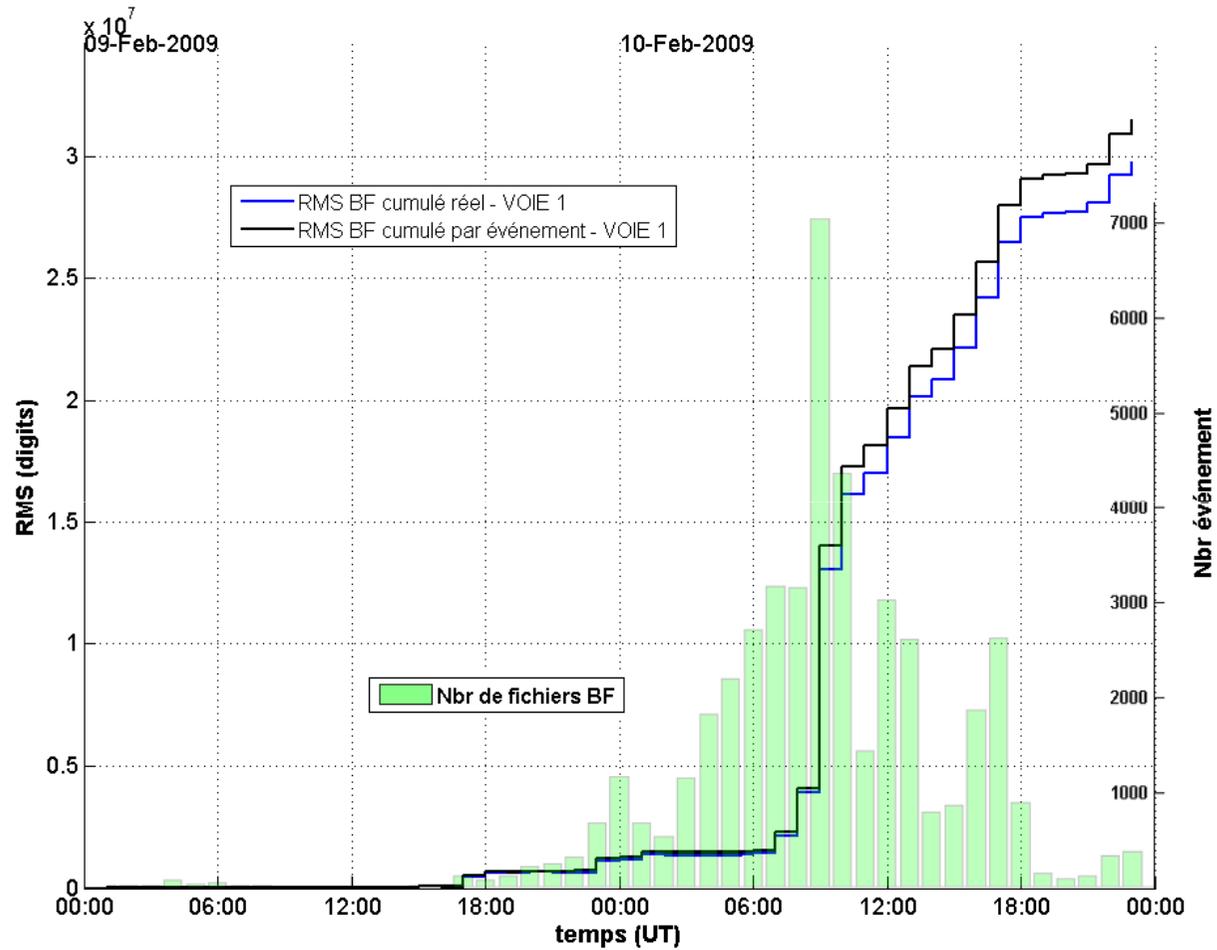
BDI « Bruit Double Impulsion »

➤ 13 766 événements



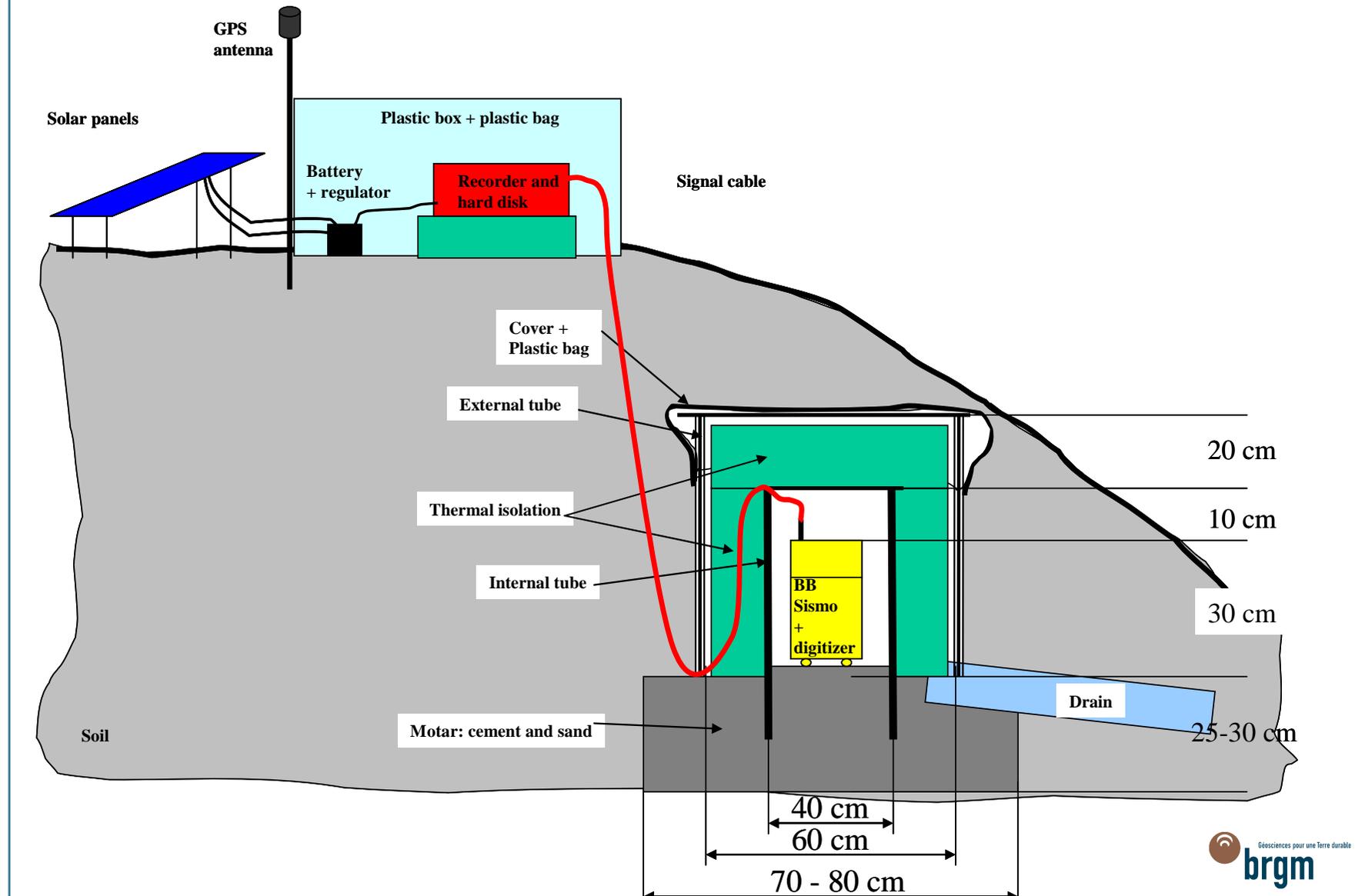
751 629 événements restants (sur 2 120 768 initiaux)

SUPERPOSITION DES BF

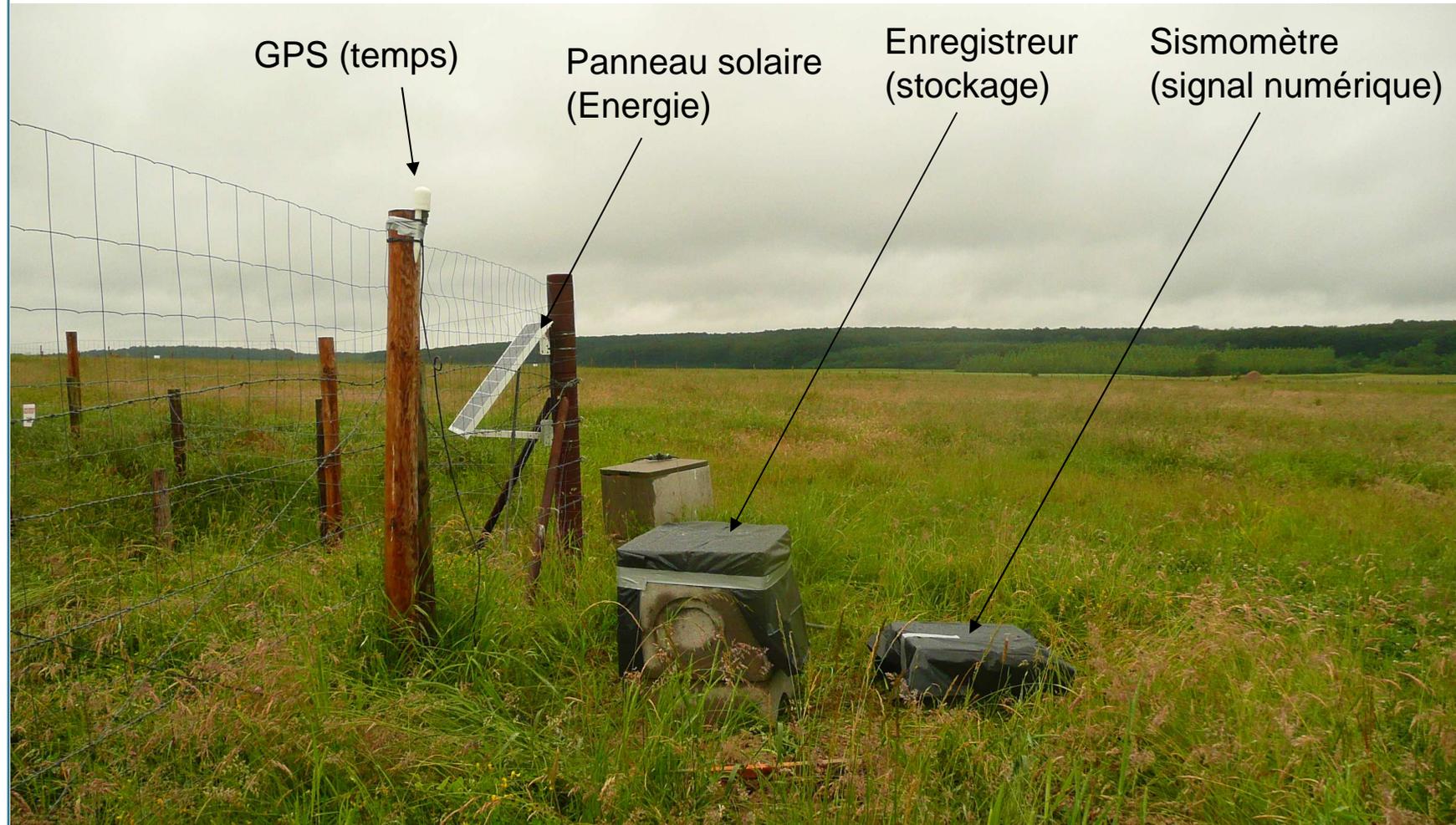


ANNEXES – Sismo LB

Réseau sismomètre large bande - Schéma d'installation

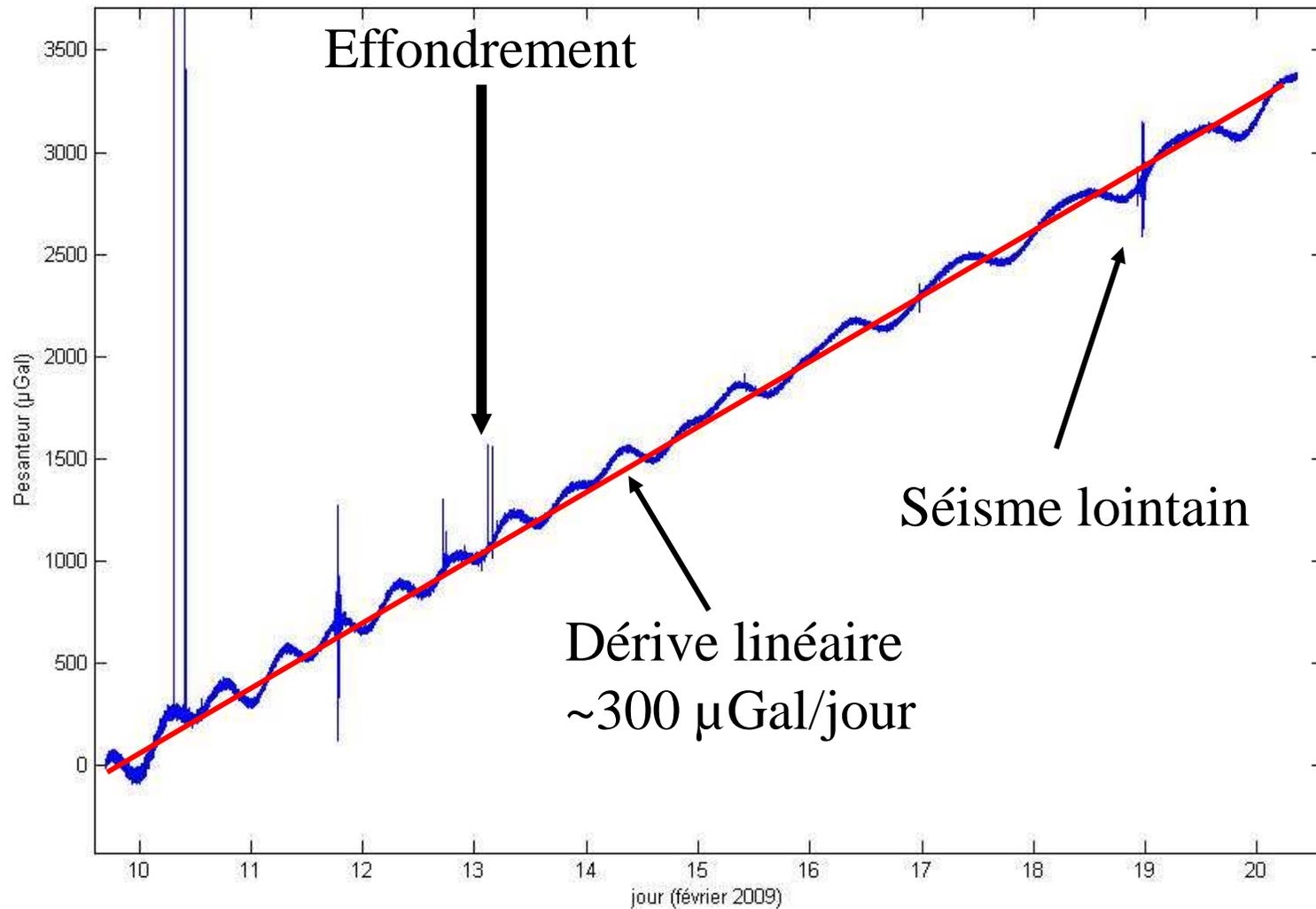


Exemple: station CE1



Pesanteur et effondrement

- > Le gravimètre relatif (ressort) dérive linéairement avec le temps



Pesanteur et effondrement

> Modélisation de la marée terrestre (Wenzel, 1996)

