



Effondrement de la cavité saline de Cerville: premiers résultats

*Séverine Bernardie
Philippe Jousset,
François Lebert
Jérémy Rohmer*

GISOS

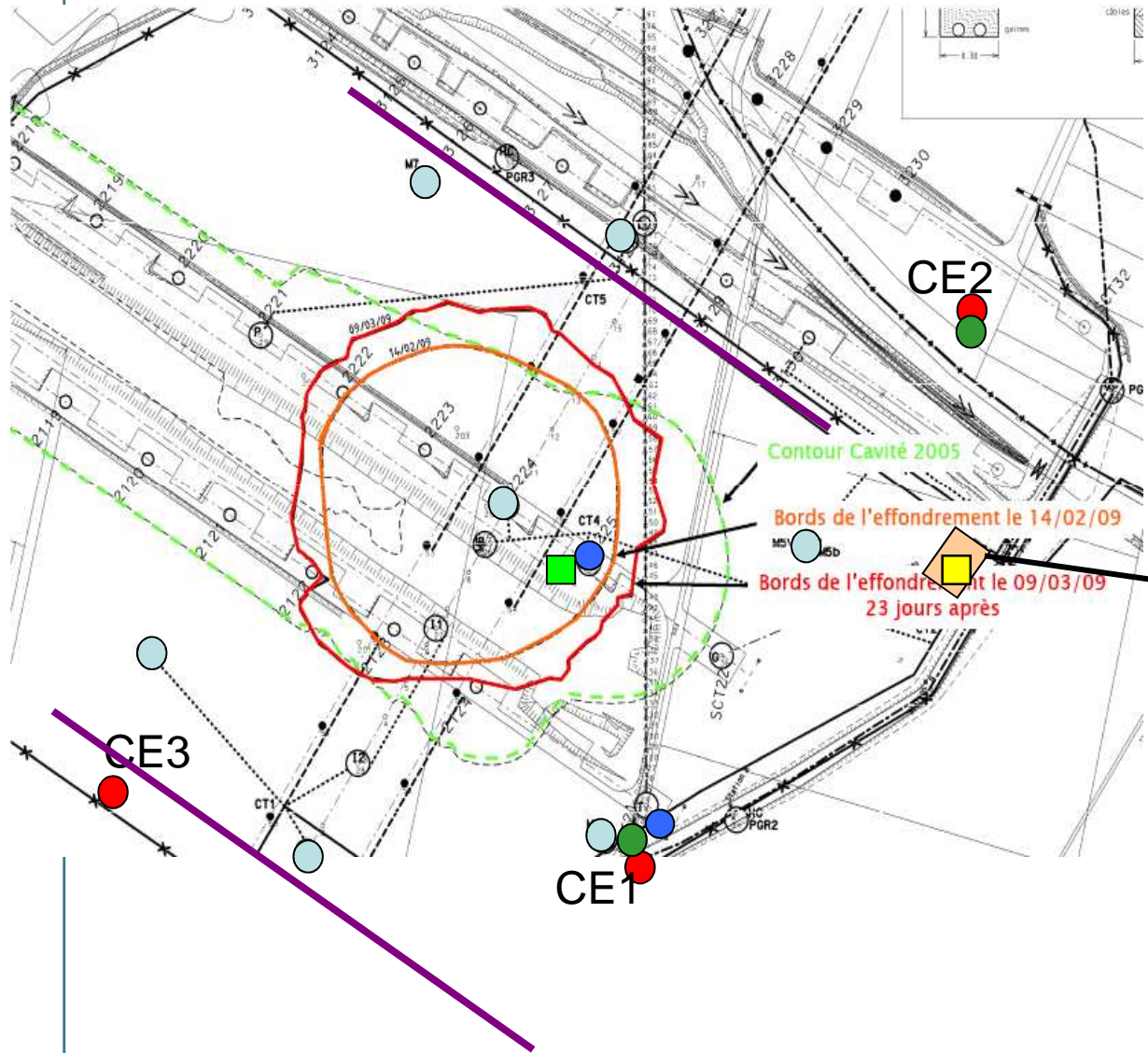
SOLVAY FRANCE



Géosciences pour une Terre durable

brgm

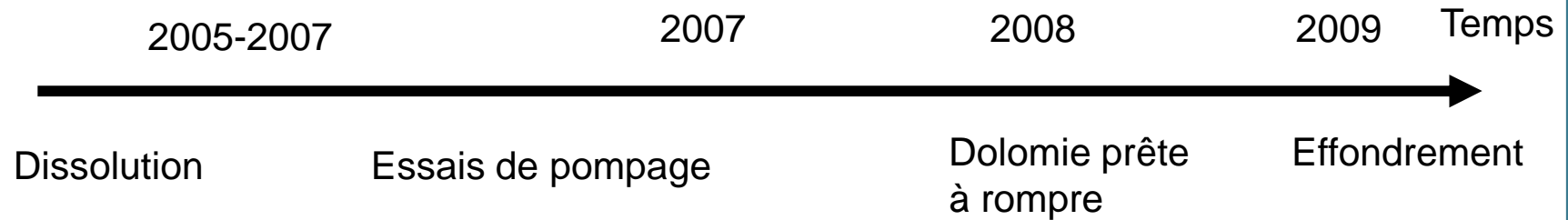
Réseaux d'instruments



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

Local d'acquisition

Chronologie simplifiée de l'effondrement



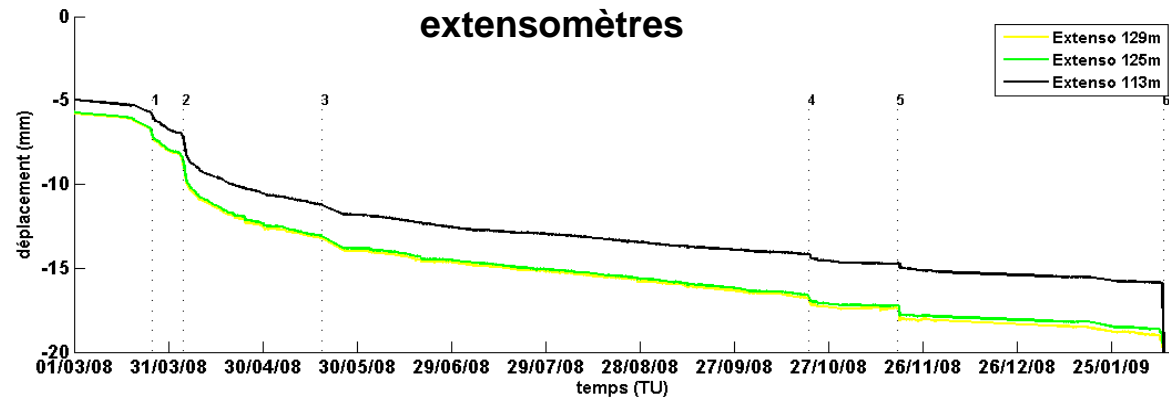
> **Ecroulement des marnes 2005-2009**

- Observations
- Essais de pression
- modélisation géomécanique

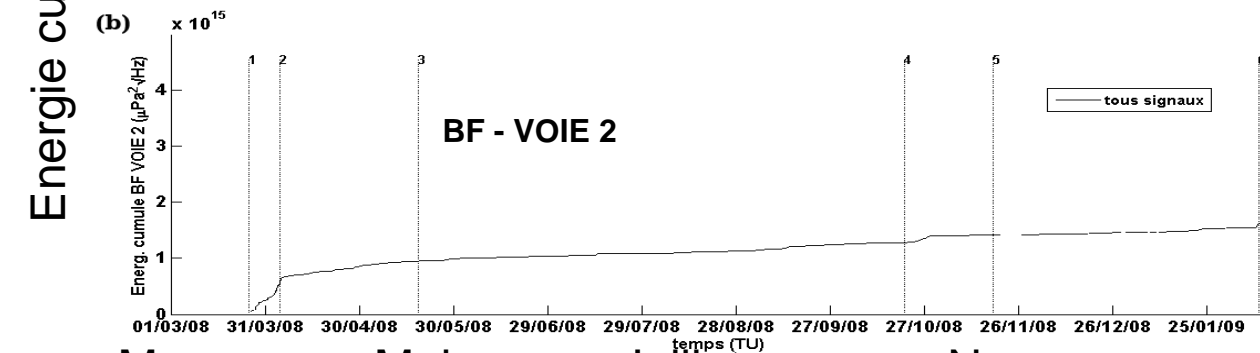
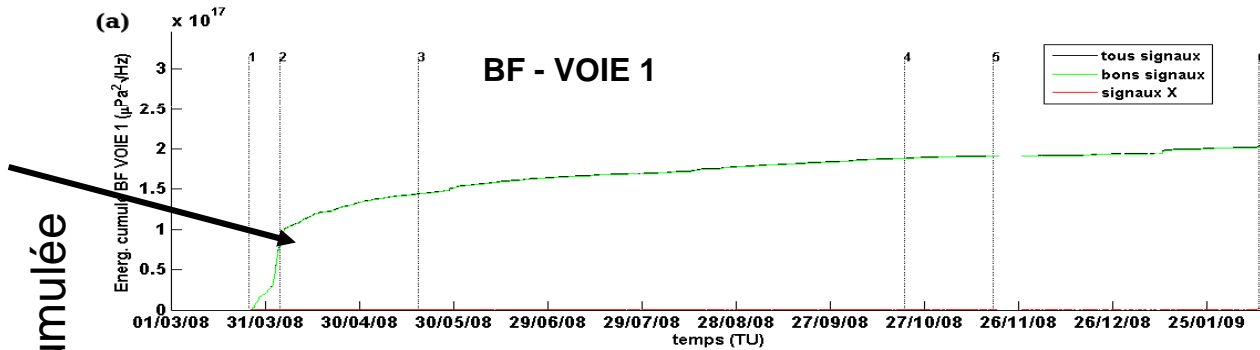
> **Effondrement de surface 9-13 février 2009**

- Observations hydroacoustiques
- Observations basses fréquences

Ecroulement des marnes - Hydroacoustique



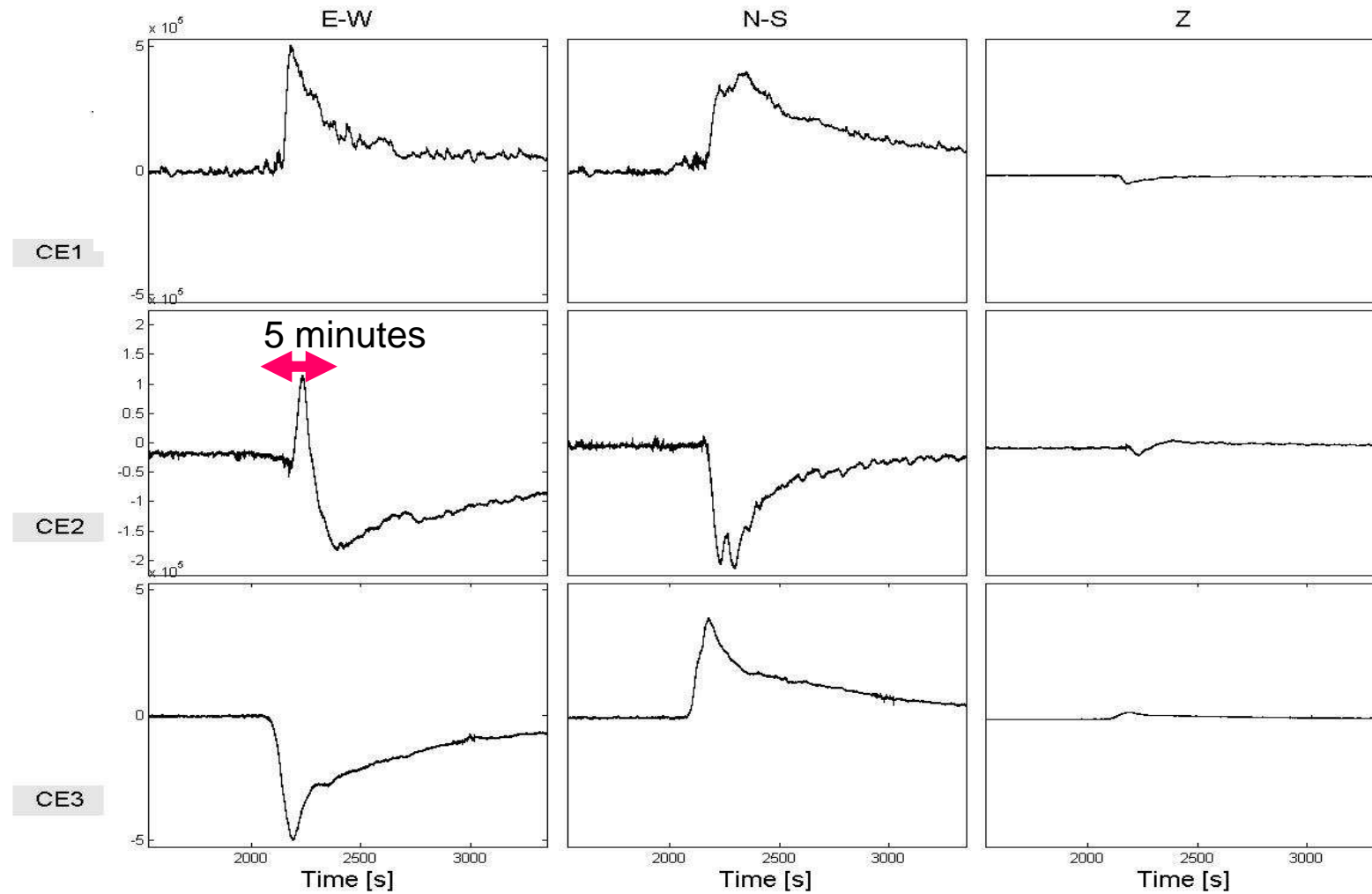
Crise majeure :
25 mars-4 avril 2008
effondrement des
marnes



Mars Mai Juillet Nov

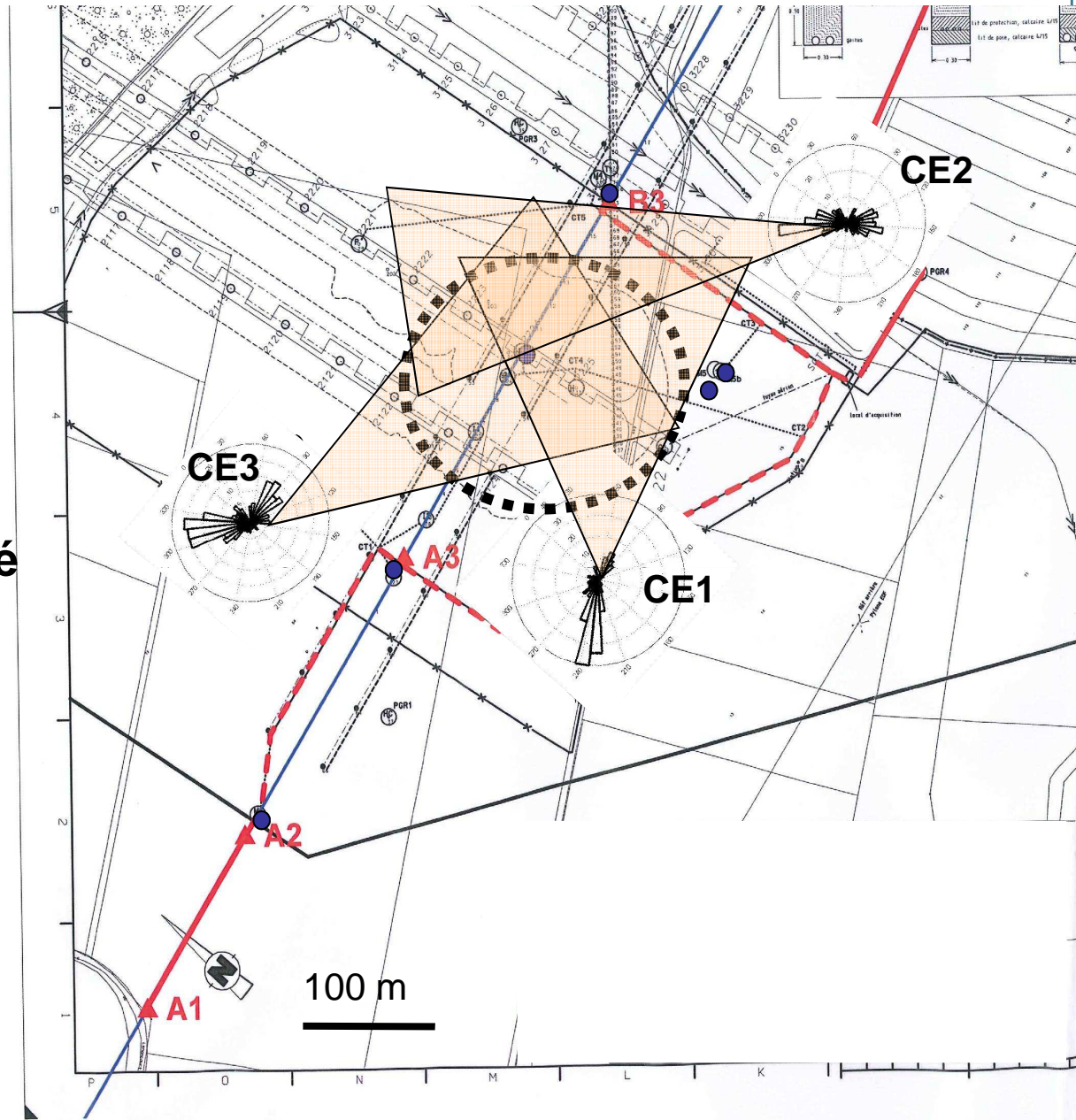


Eté 2008 - Signaux (non sismique) très longue période pendant les essais, sur les composantes horizontales



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

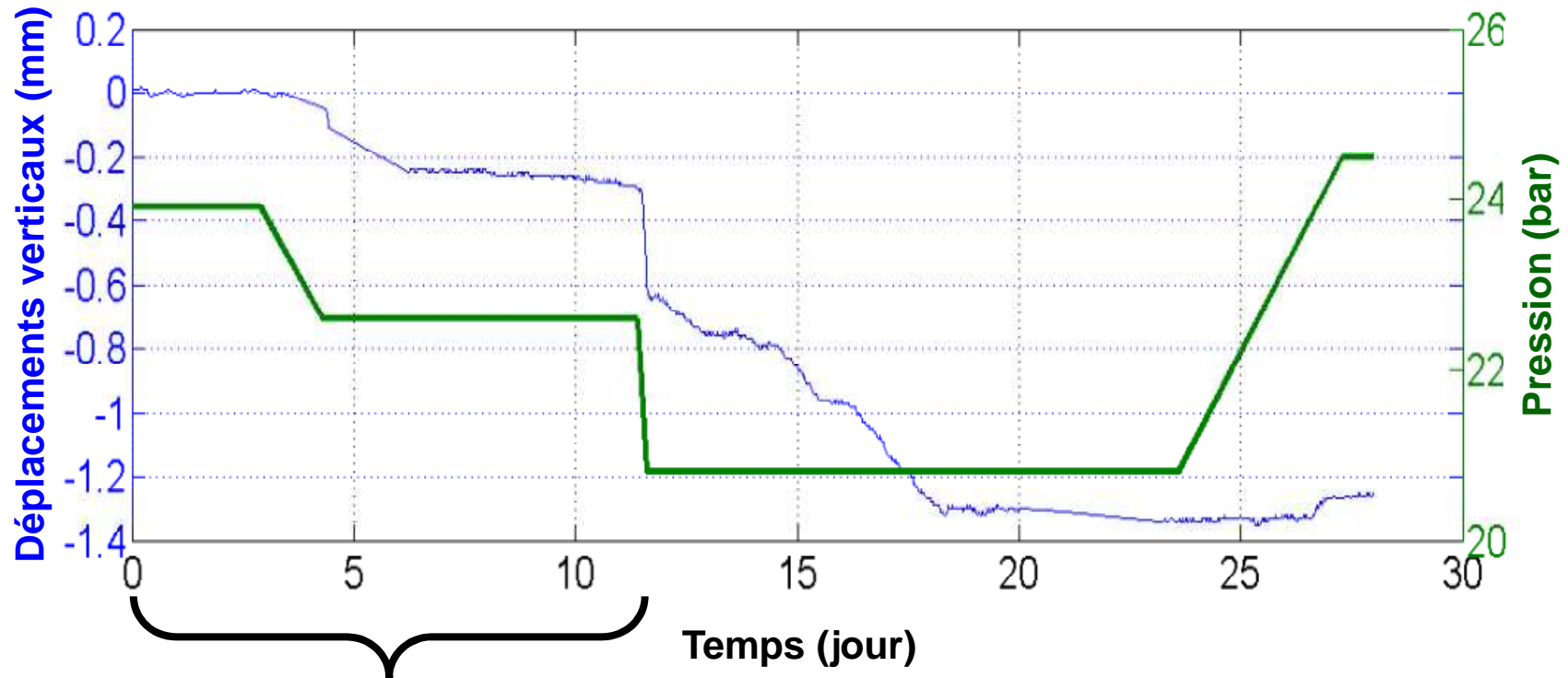


Ecroulement des marnes : modélisation mécanique

- > **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

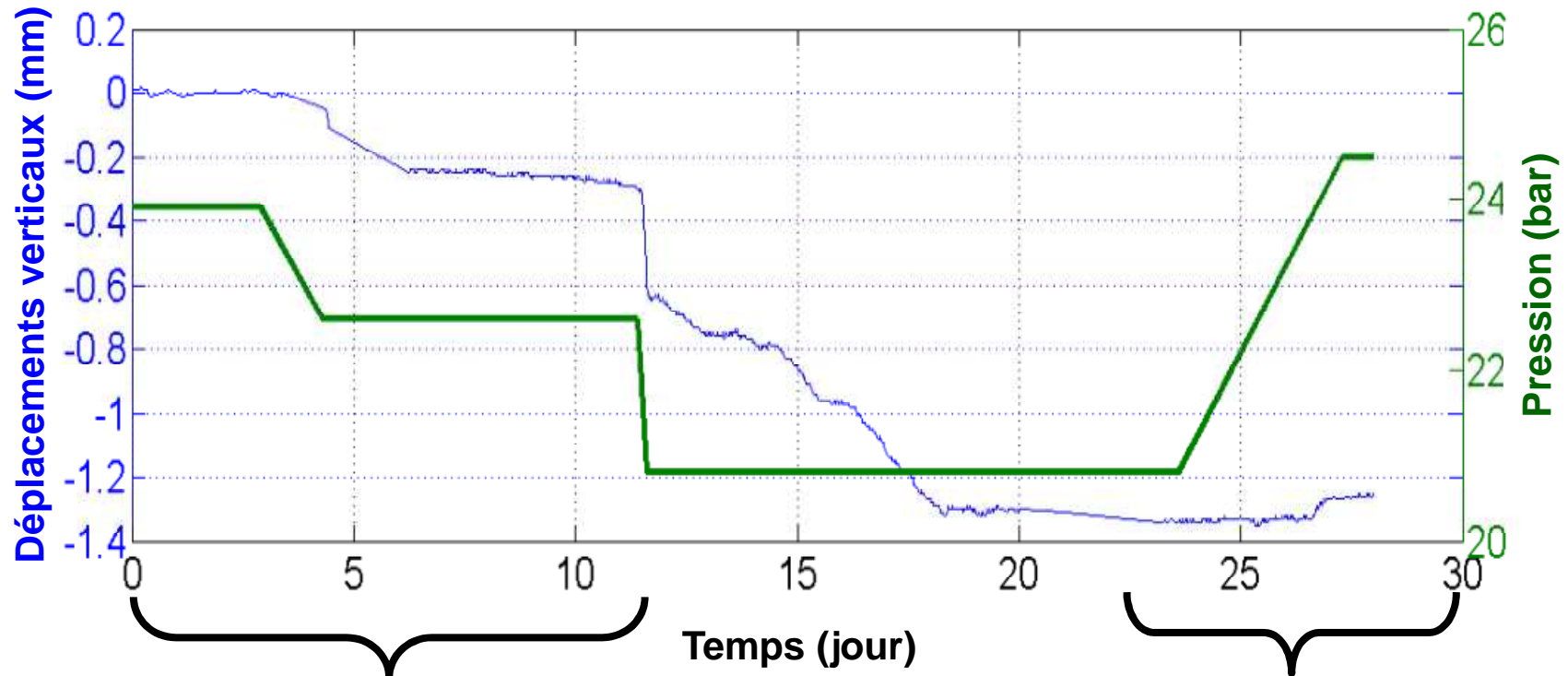
Observations à la base de
la Dolomie



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

Essai de pression en 2005


Observations à la base de la Dolomie

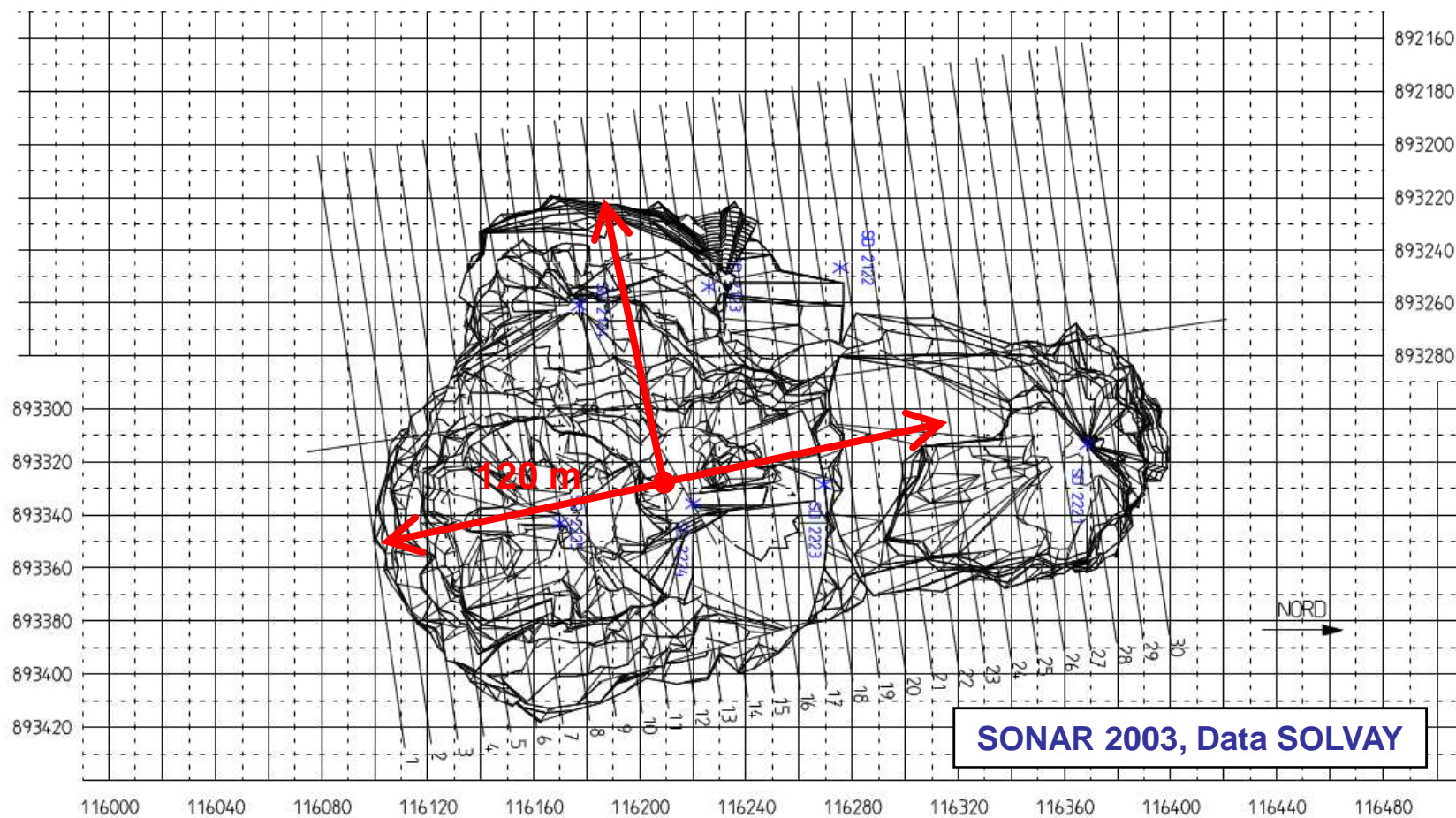


évolution des déplacements suit celle de la pression
HYPOTHESE:
COMPORTEMENT
« REVERSIBLE »

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

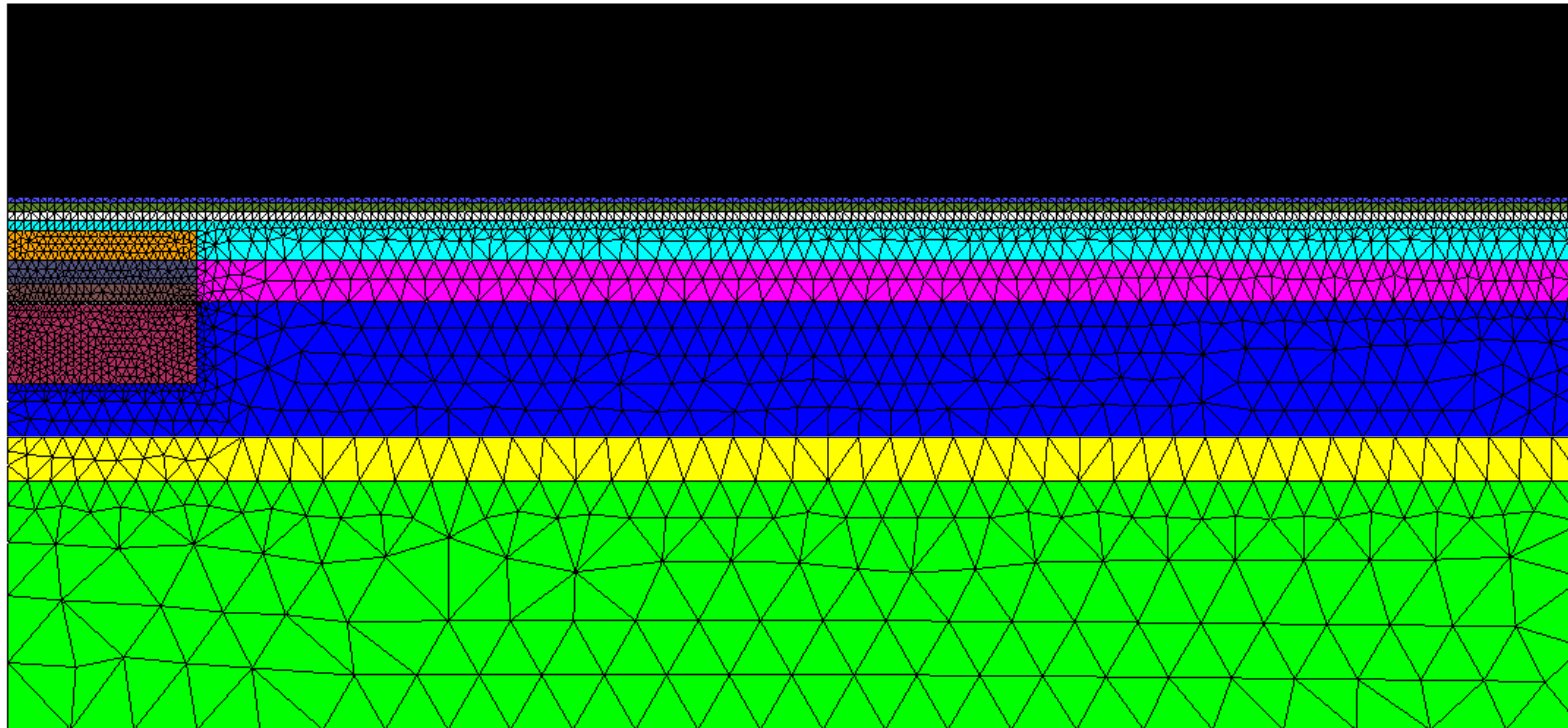
1000m

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.



Hypothèses matériaux

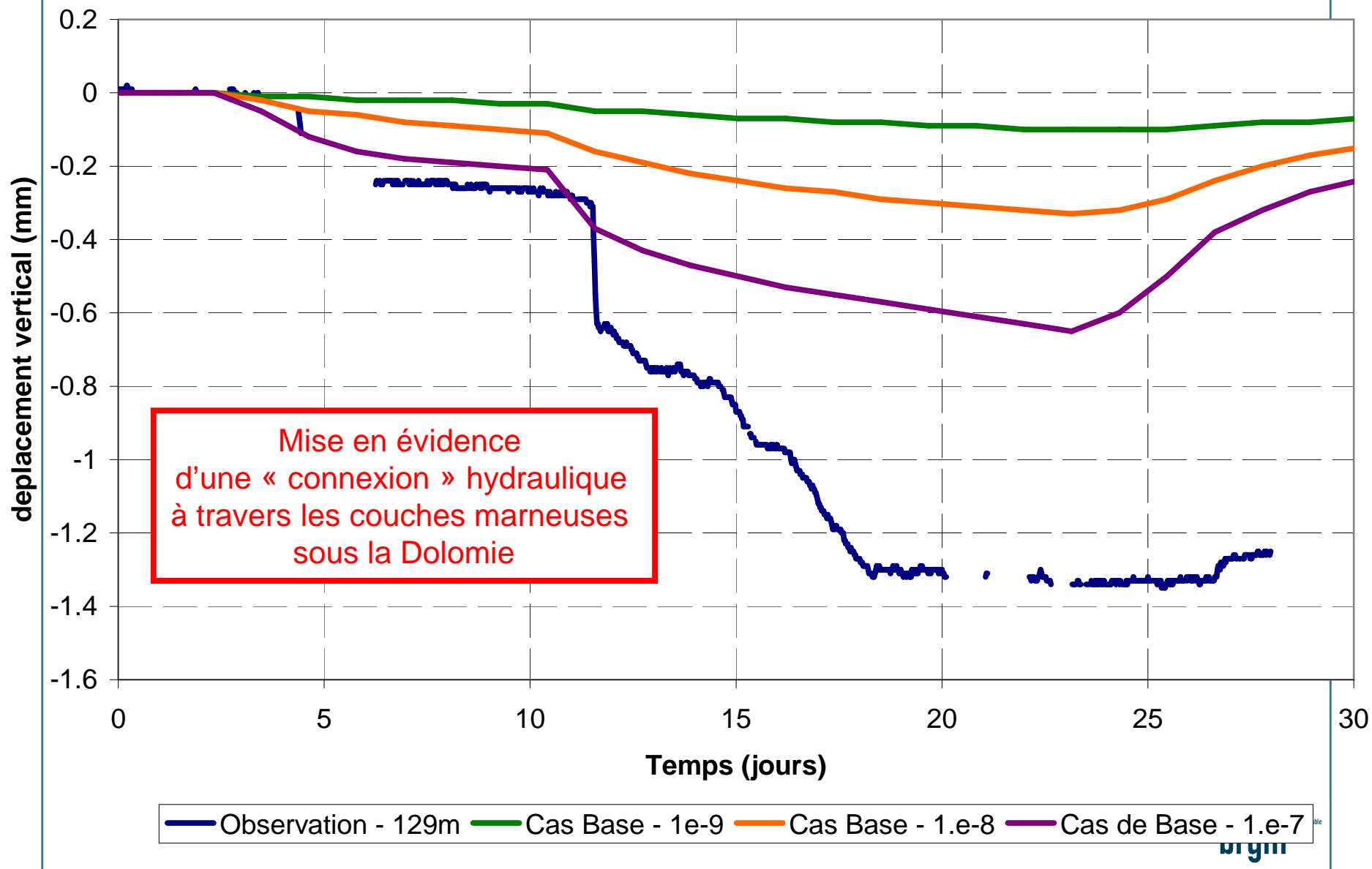
COUCHE	Epaisseur	Profondeur du toit / sol=0	volumique sec	Module de Young	coeff Poisson	cohésion	Coeff de frottement
Unité	<i>m</i>	<i>m NGF</i>	<i>kg/m3</i>	<i>Gpa</i>	-	<i>Mpa</i>	°
couche proche sol	122	0	2500	16.5	0.25	0.8	29.7
Anhydrite	4	-122	2910	88	0.29	9.4	48.6
Dolomie de Beaumont (rigide)	5	-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.

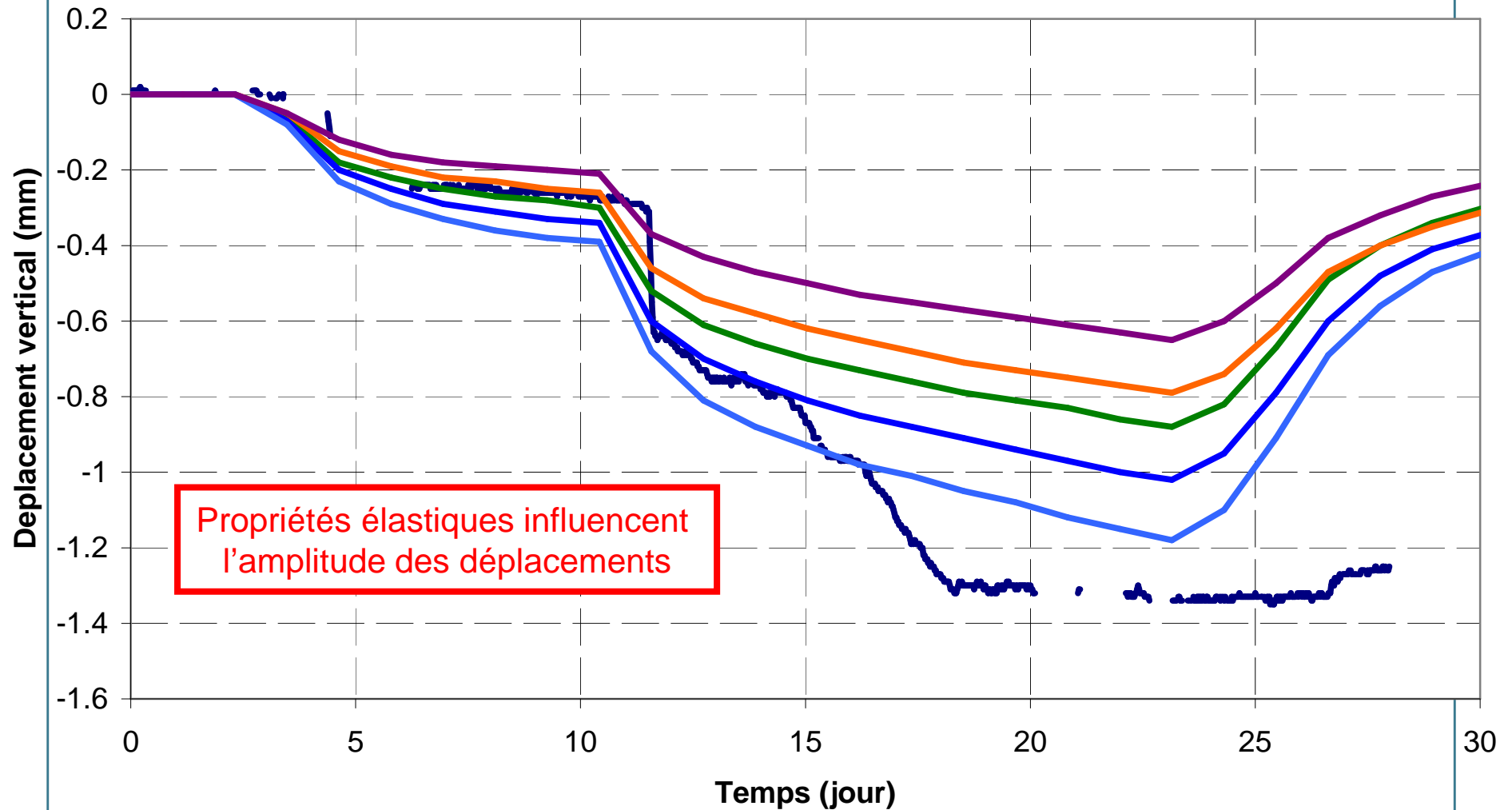
CODE de CALCUL: Gefdyn ©
RHEOLOGIE « SIMPLE »:
Comportement Drucker-Prager
isotrope.

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

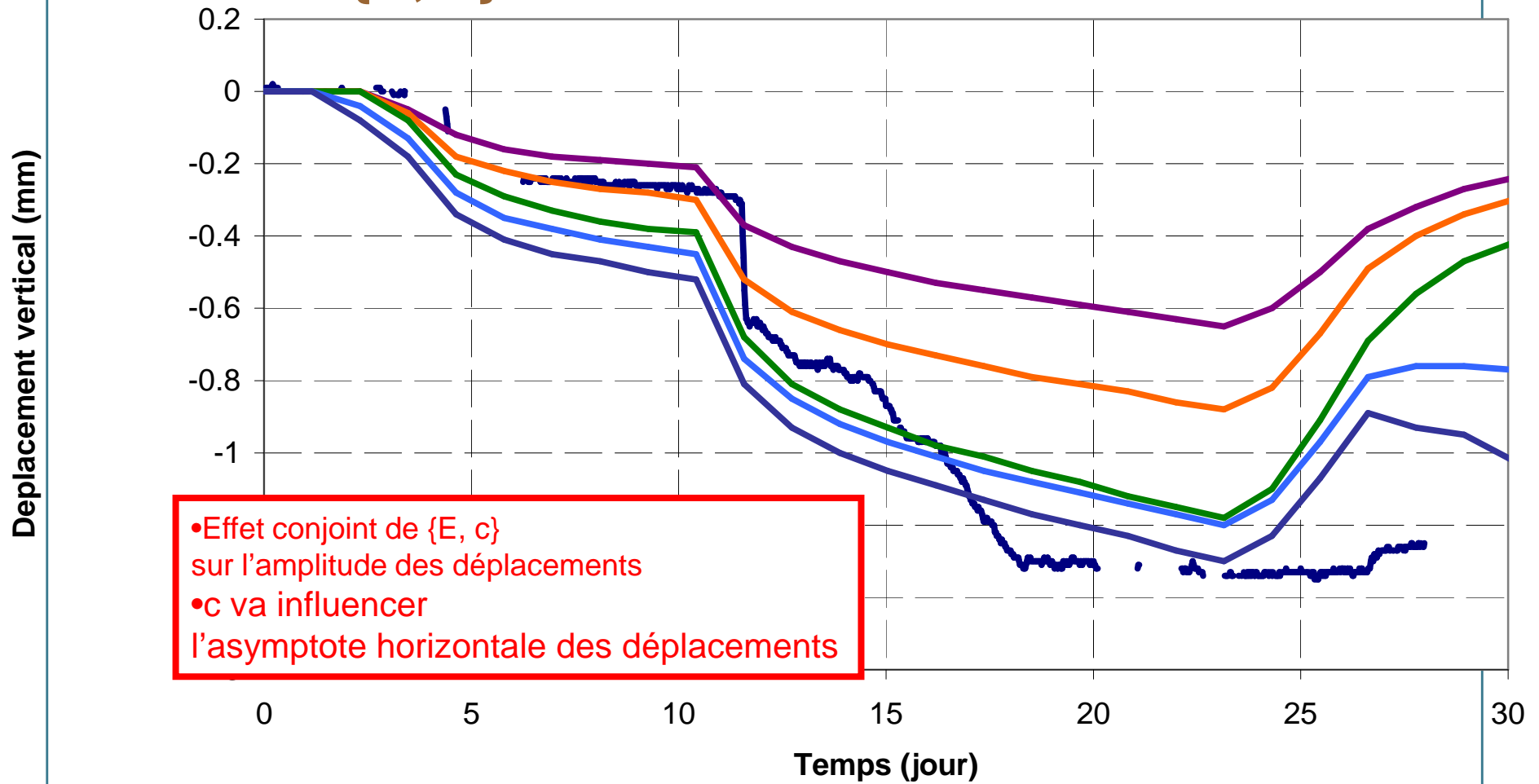
Influence de la conductivité (m/s) des couches marneuses



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



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 :

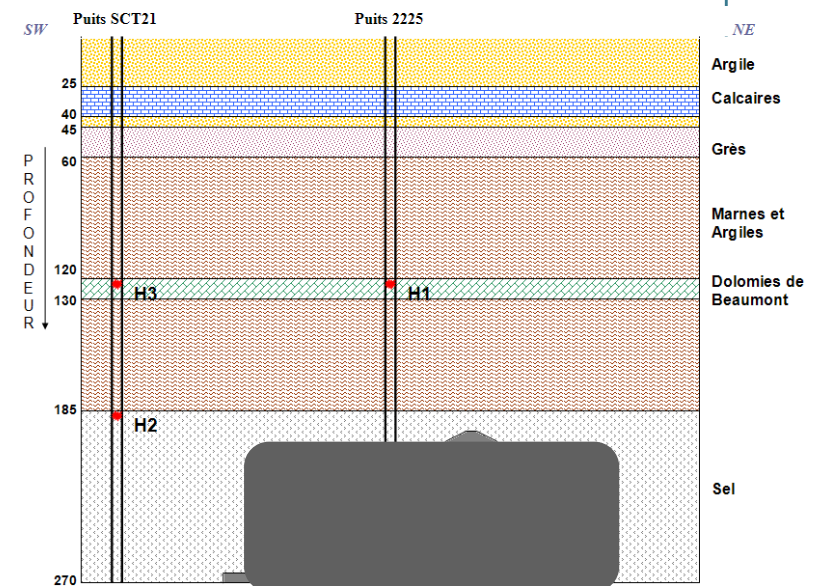
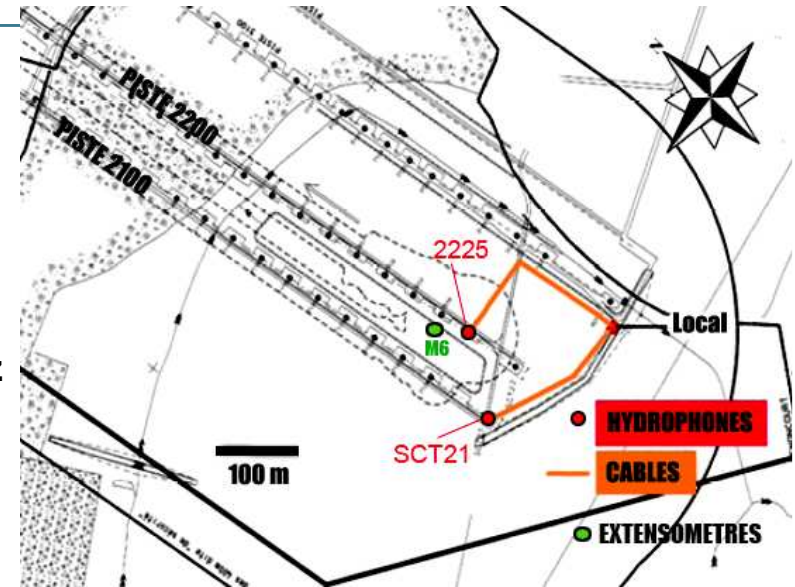
- Événementiel (HF, BF)
- Continu (Toutes)

Hydrophone 3 :

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

1 type d'enregistrement :

- Événementiel



Suivi temporel de l'effondrement

PLAN

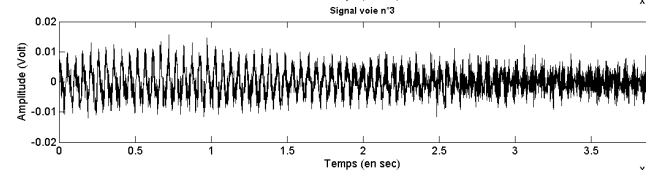
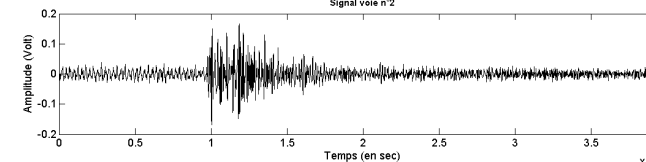
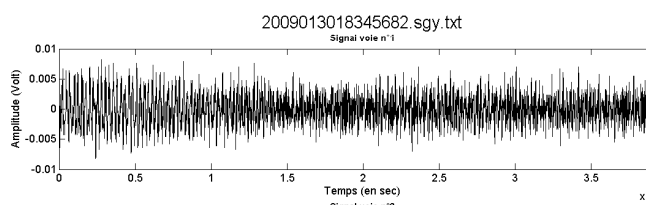
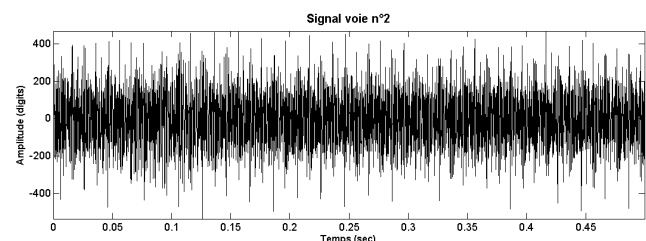
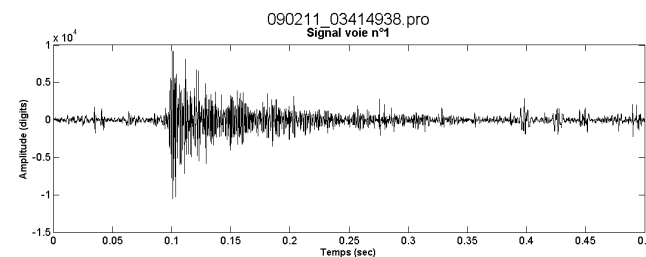
1. Traitement et analyse des événements Basses Fréquences BF (voies 1 & 2)

- 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)

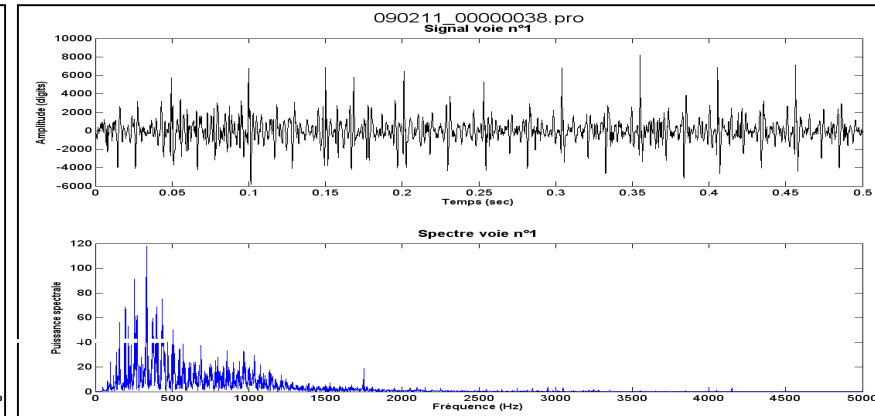
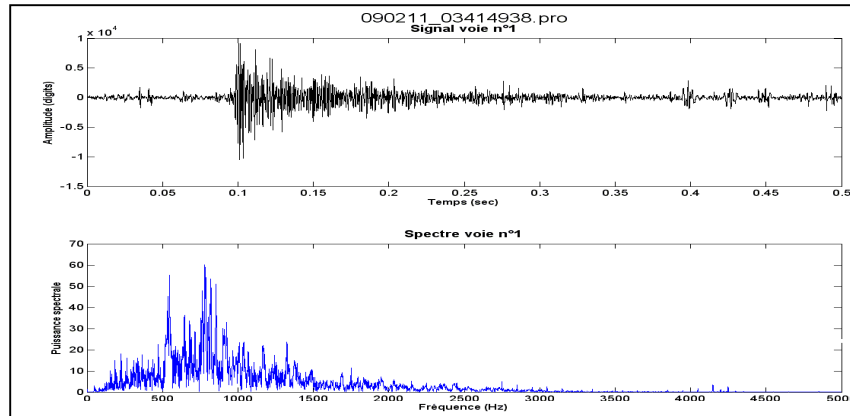
- déclenchement sur seuil
- durée : 4 ms
- Fréquence d'échantillonnage: 1MHz
- 378 861 événements (2008-2009)

3. Présentation et analyse des résultats



Signaux BF - TYPOLOGIE

Deux familles :

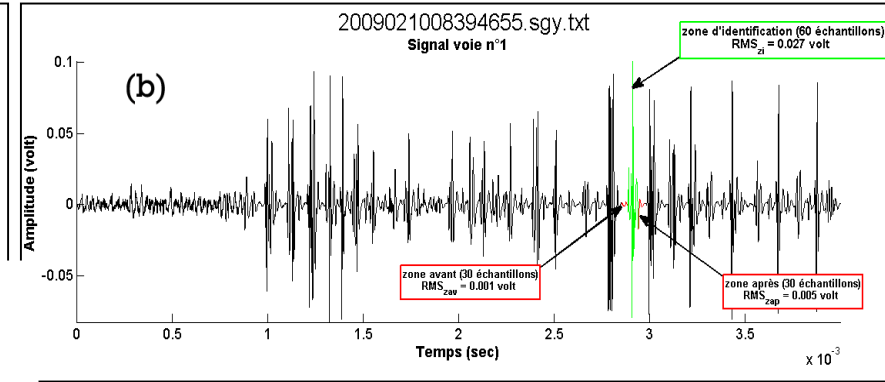
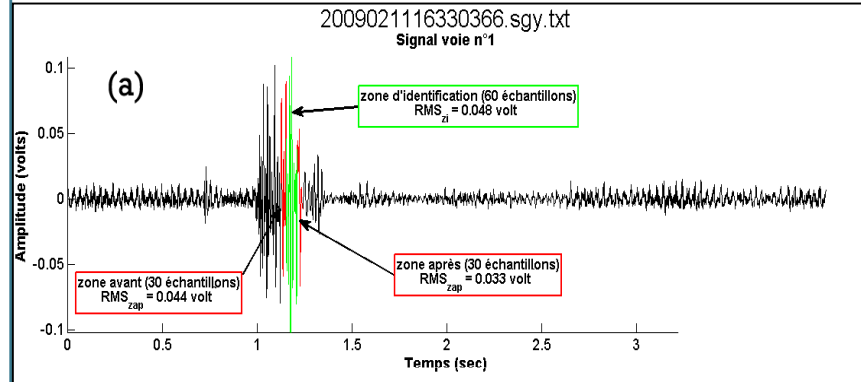


1 – « **Bons** » signaux : formes
« classiques »

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?

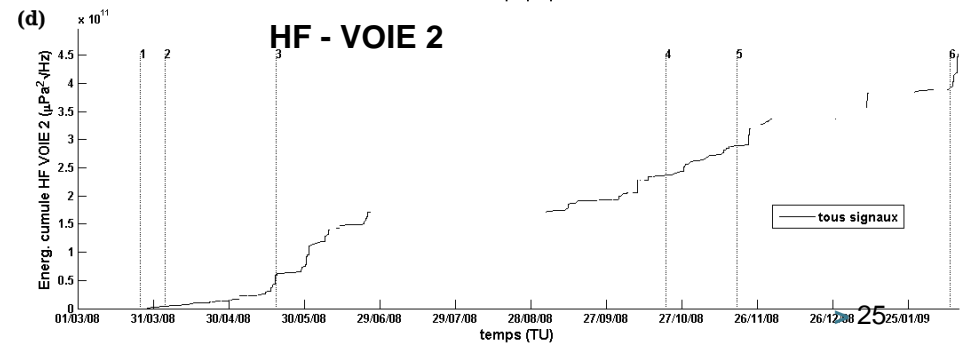
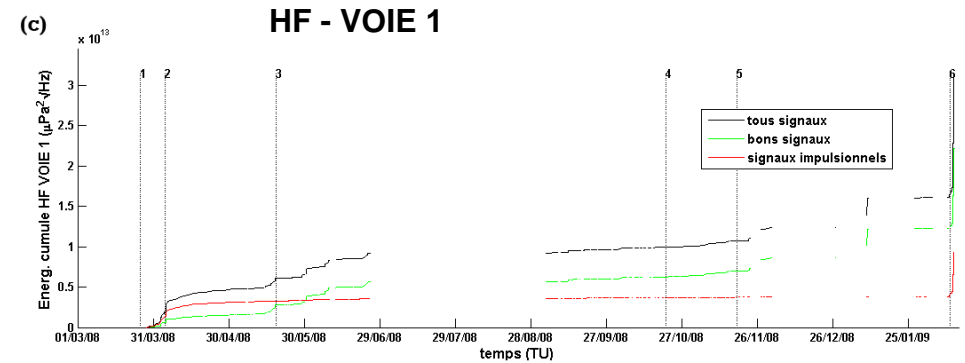
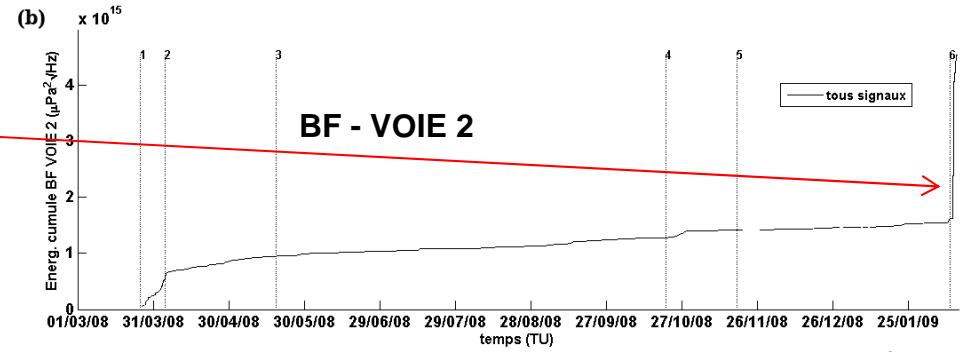
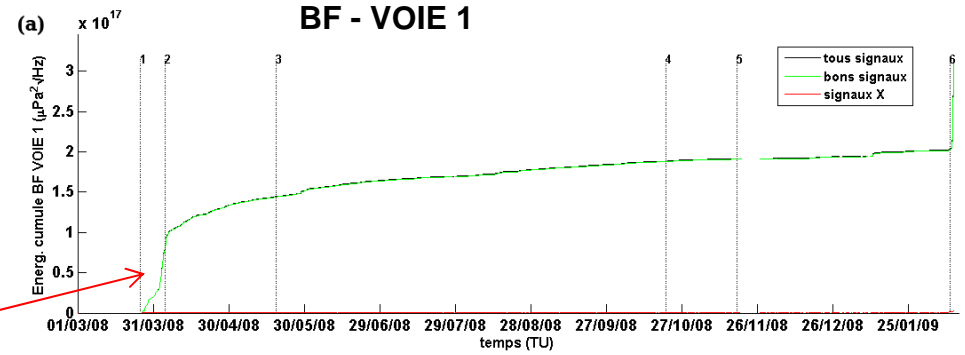
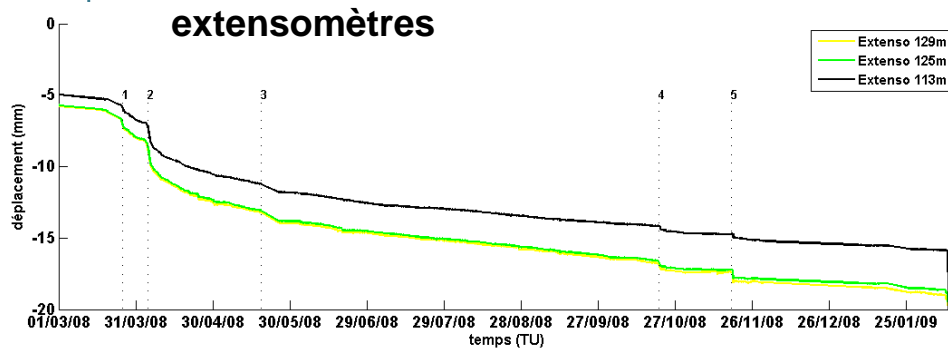
Enregistrements 2008-2009

2 Crises majeures:

1/ 25 mars-4 avril 2008
effondrement des marnes

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

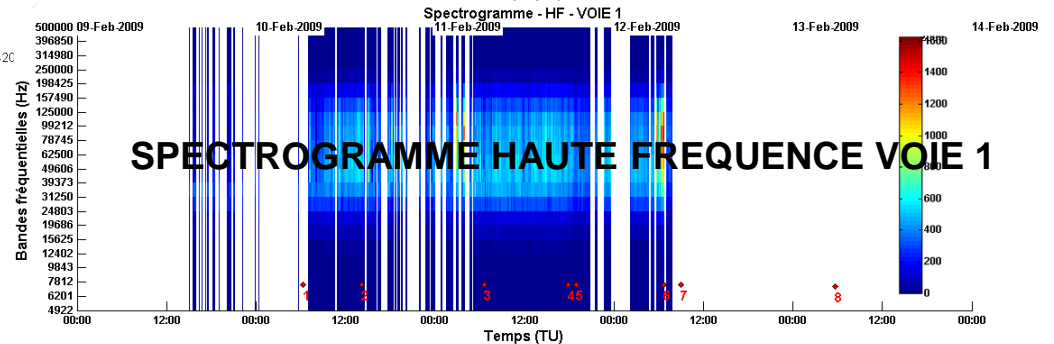
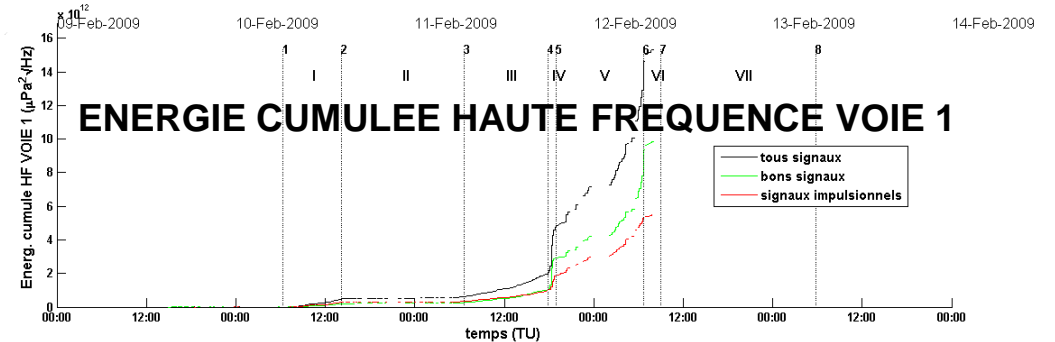
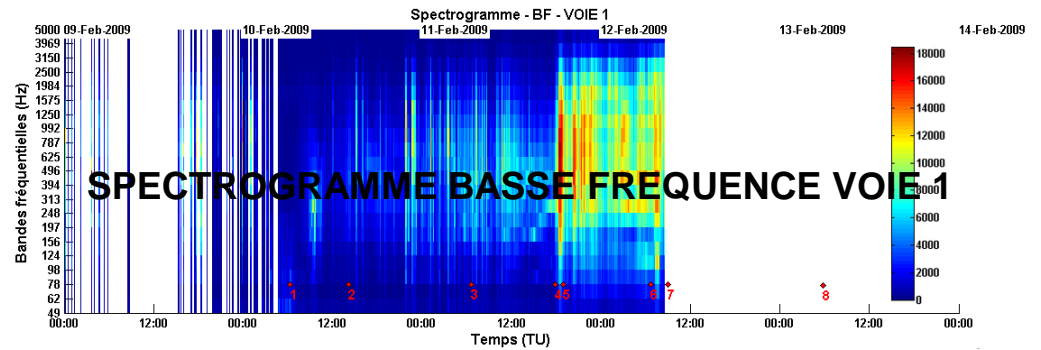
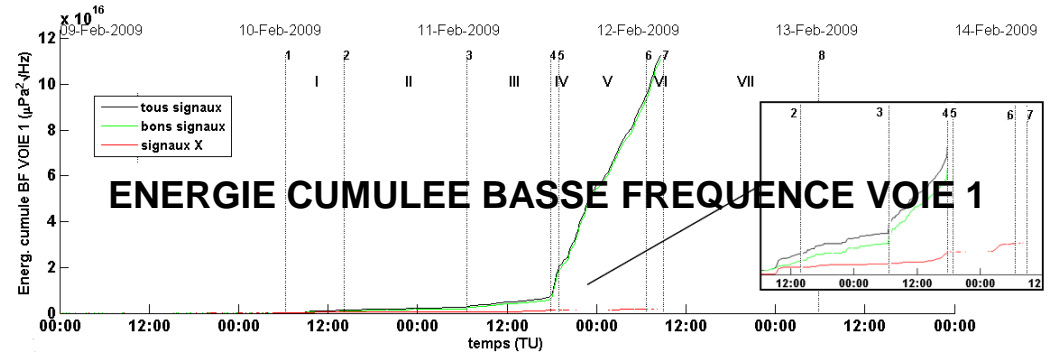
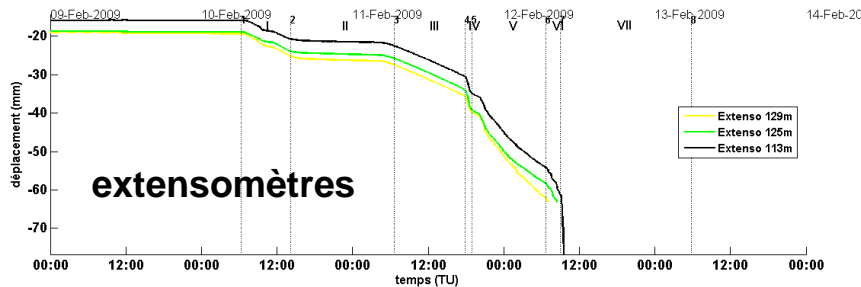
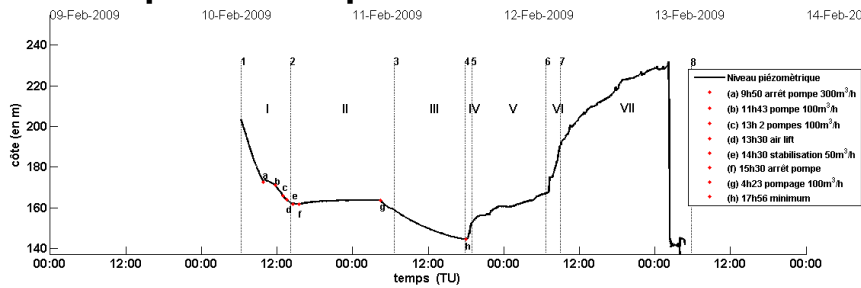
**Système expérimental
adapté**



Effondrement : Enregistrements Voie 1

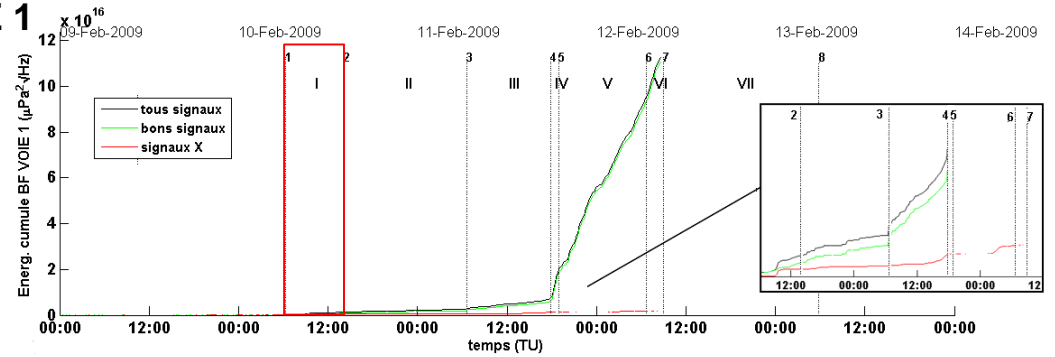
étapes	phases
1- 10/02 6h20	
2- 10/02 14h10	
3- 11/02 6h40	
4- 11/02 17h50	
5- 11/02 19h00	
6- 12/02 6h40	
7- 12/02 9h20	
8- 13/02 5h45	

niveau piézométrique

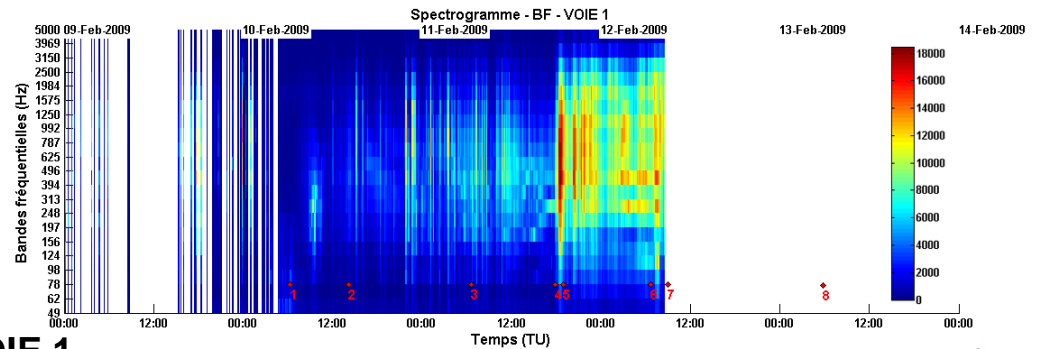


Effondrement : Enregistrements Voie 1

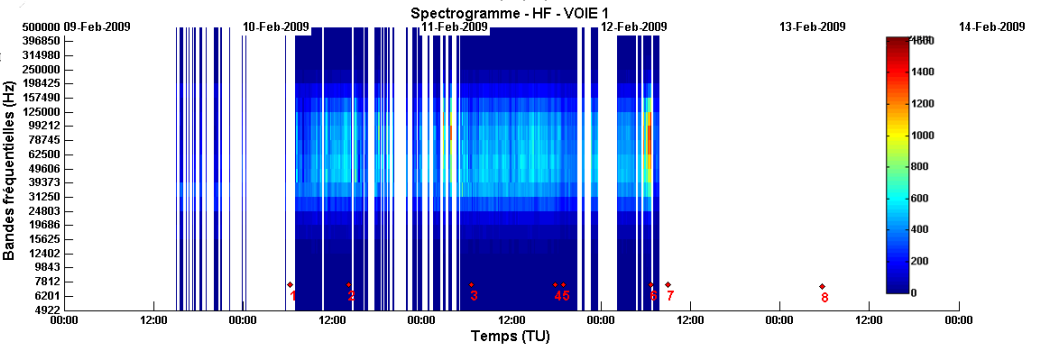
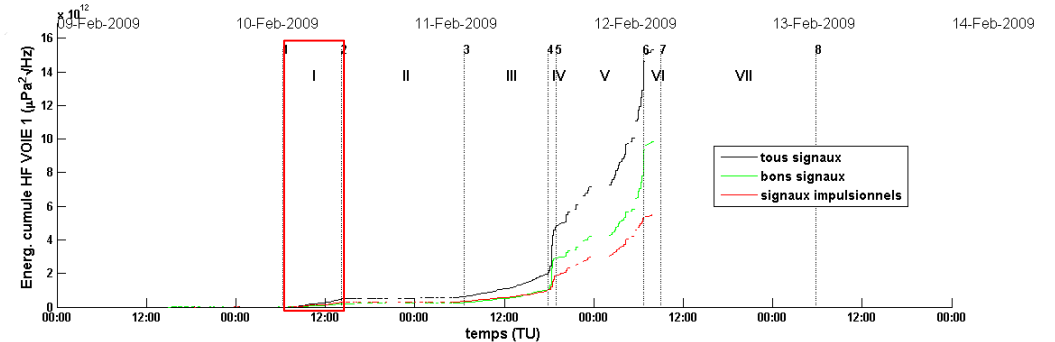
BF – VOIE 1



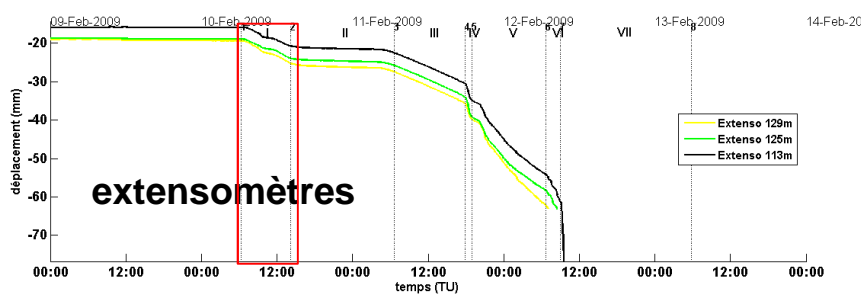
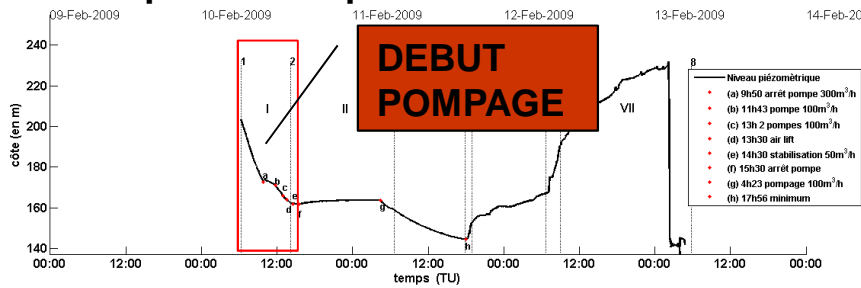
étapes		phases
1- 10/02	6h20	
2- 10/02	14h10	
3- 11/02	6h40	
4- 11/02	17h50	
5- 11/02	19h00	
6- 12/02	6h40	
7- 12/02	9h20	
8- 13/02	5h45	



HF – VOIE 1



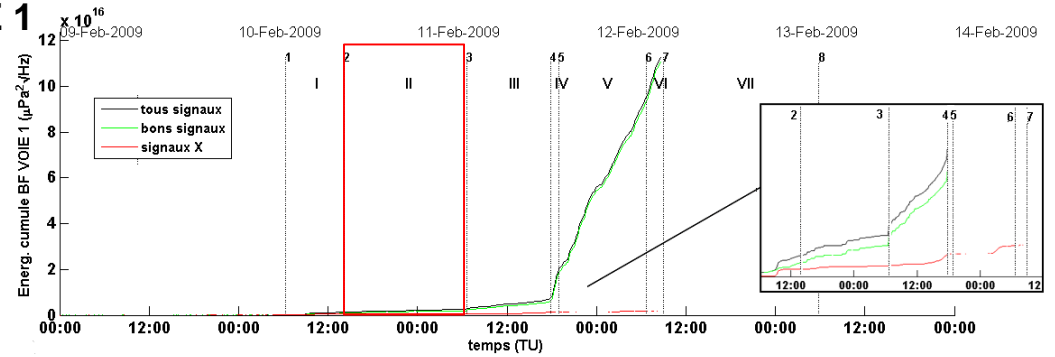
niveau piézométrique



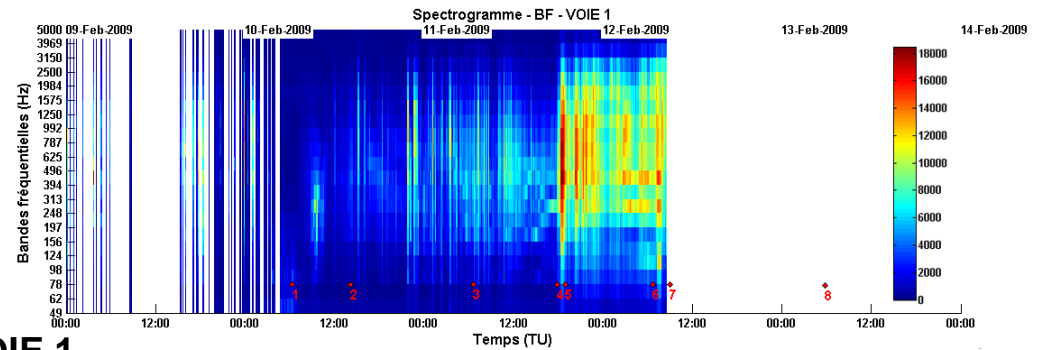
extensomètres

Effondrement : Enregistrements Voie 1

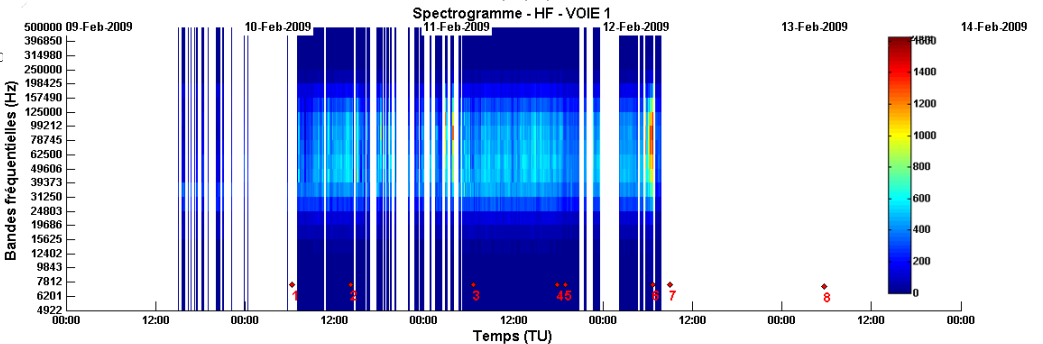
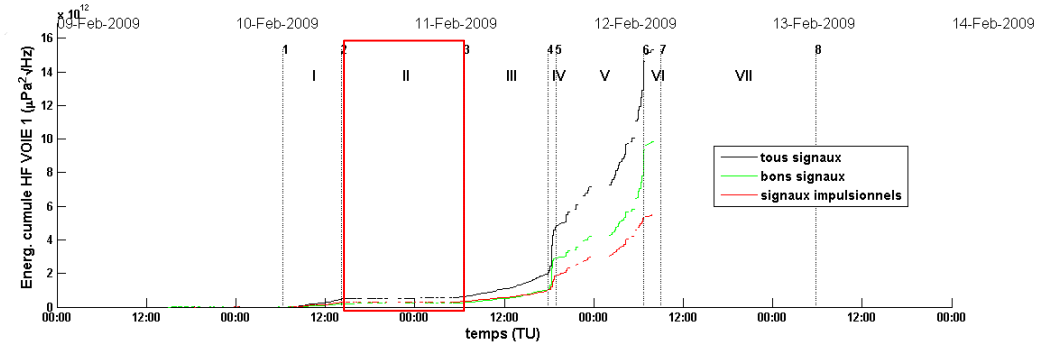
BF – VOIE 1



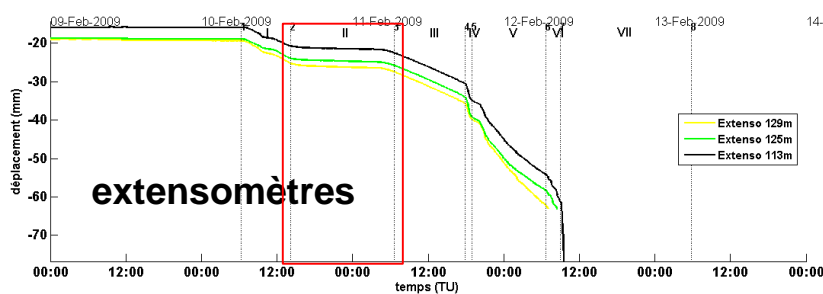
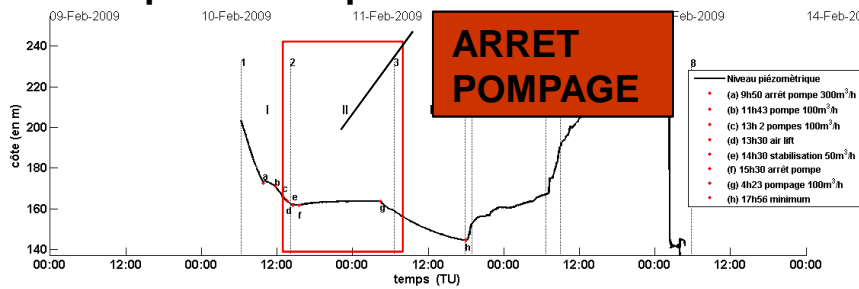
étapes		phases
1- 10/02	6h20	
2- 10/02	14h10	
3- 11/02	6h40	
4- 11/02	17h50	
5- 11/02	19h00	
6- 12/02	6h40	
7- 12/02	9h20	
8- 13/02	5h45	



HF – VOIE 1



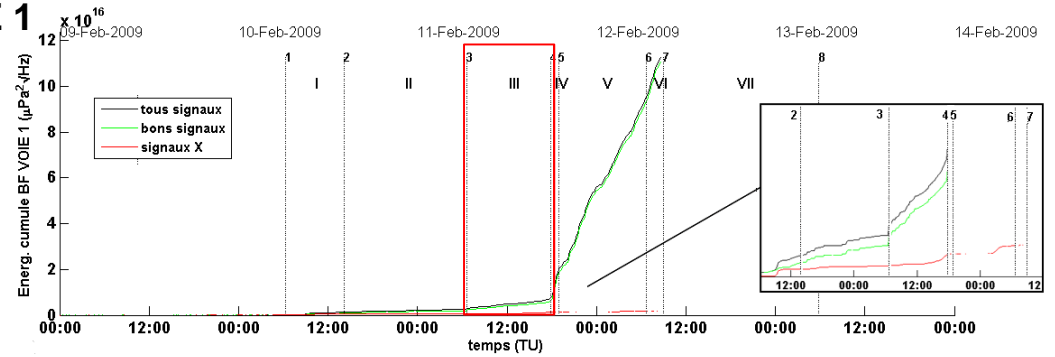
niveau piézométrique



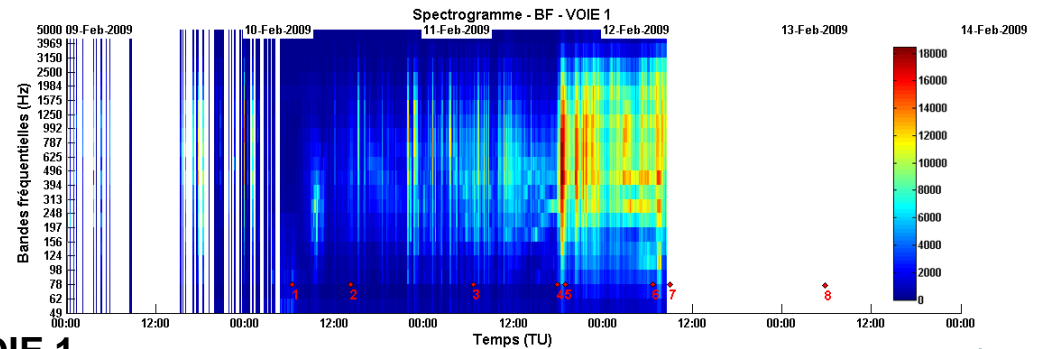
extensomètres

Effondrement : Enregistrements Voie 1

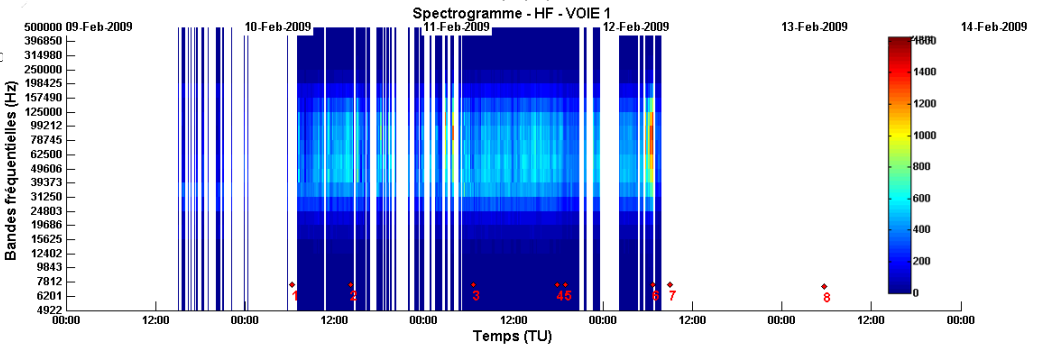
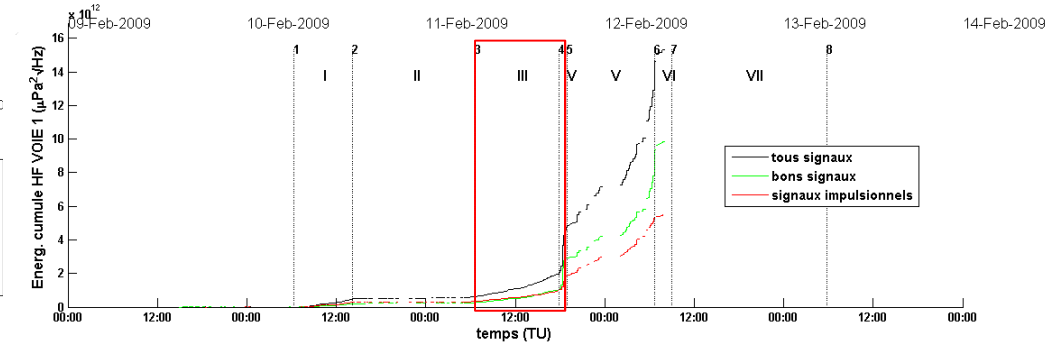
BF – VOIE 1



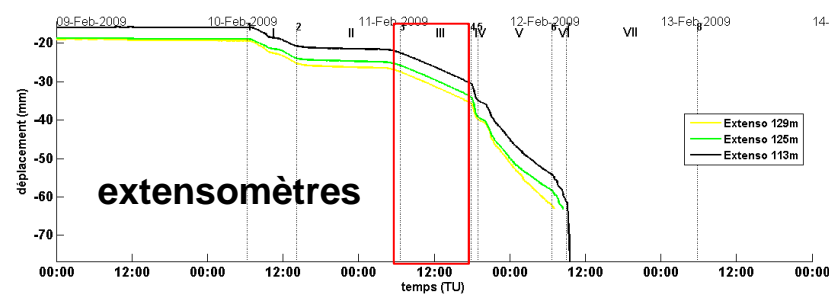
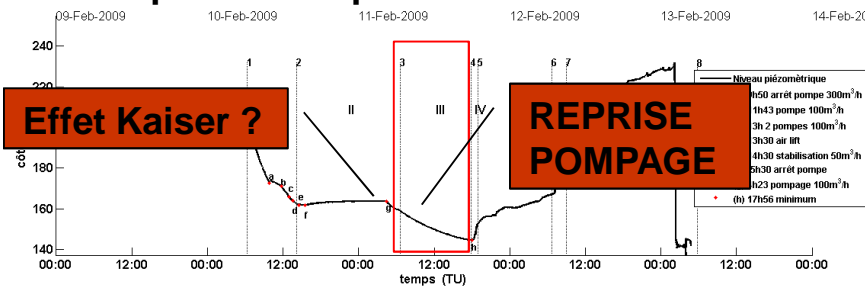
étapes		phases
1- 10/02	6h20	
2- 10/02	14h10	
3- 11/02	6h40	
4- 11/02	17h50	
5- 11/02	19h00	
6- 12/02	6h40	
7- 12/02	9h20	
8- 13/02	5h45	



HF – VOIE 1

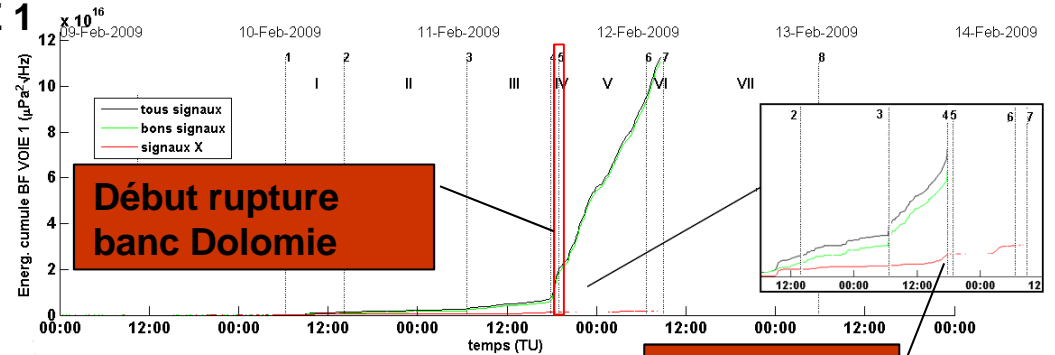


niveau piézométrique

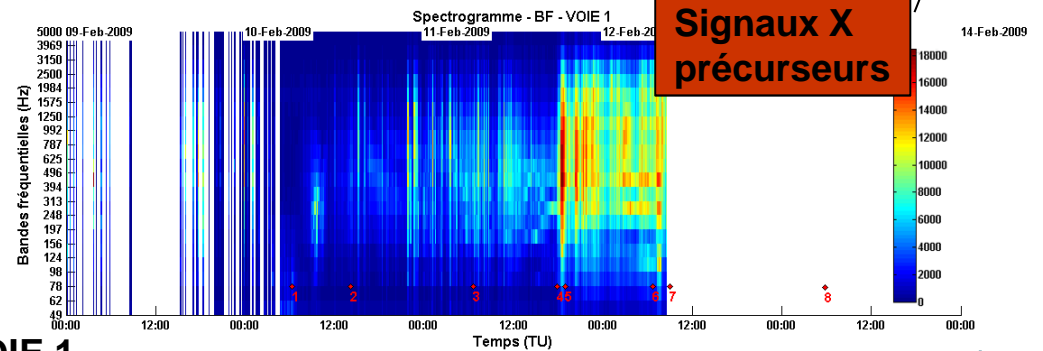


Effondrement : Enregistrements Voie 1

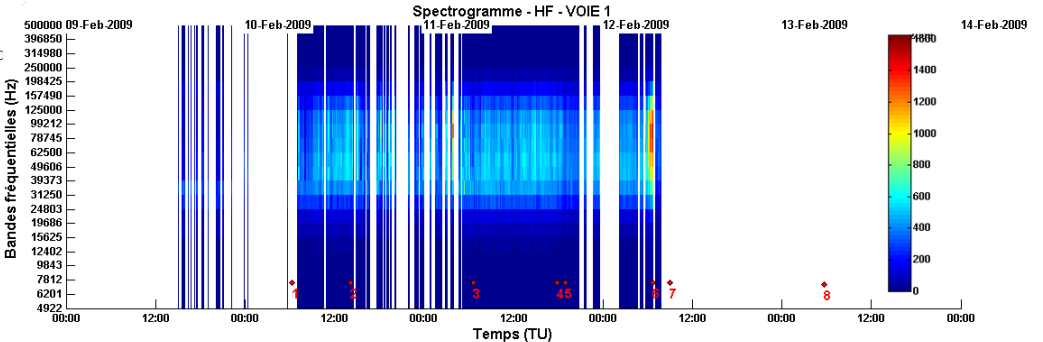
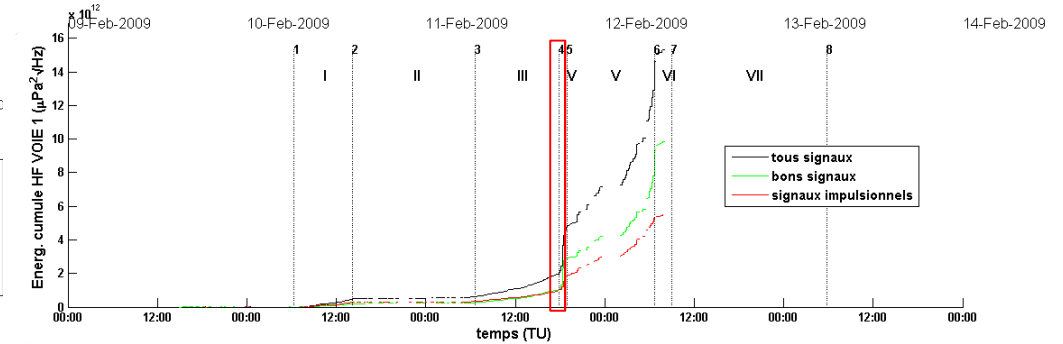
BF – VOIE 1



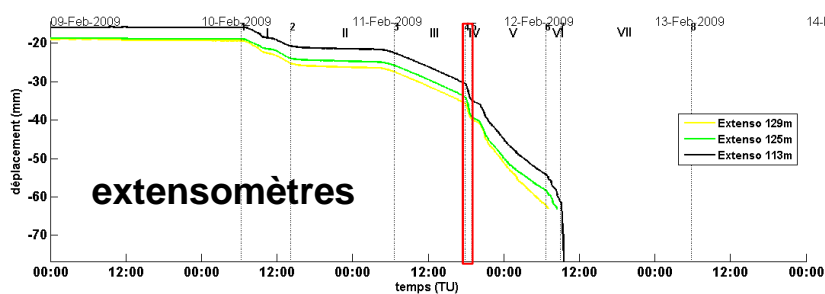
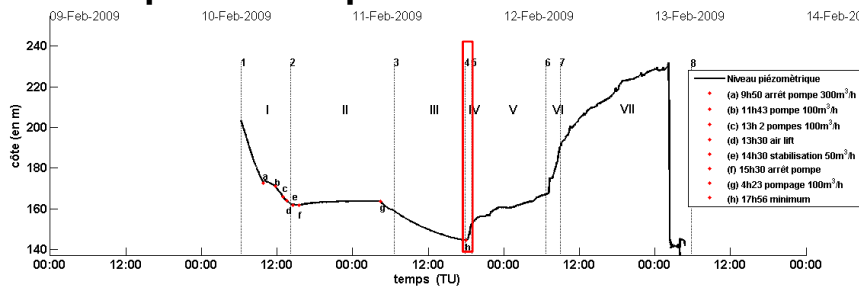
étapes		phases
1- 10/02	6h20	I
2- 10/02	14h10	
3- 11/02	6h40	II
4- 11/02	17h50	III
5- 11/02	19h00	IV
6- 12/02	6h40	V
7- 12/02	9h20	VI
8- 13/02	5h45	VII



HF – VOIE 1



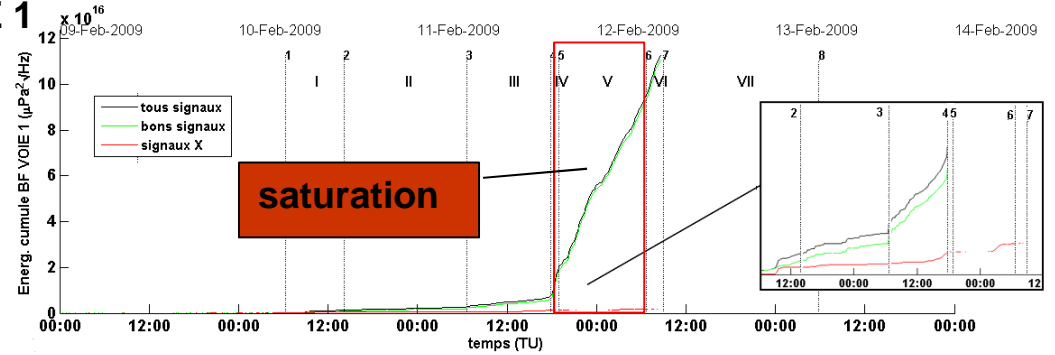
niveau piézométrique



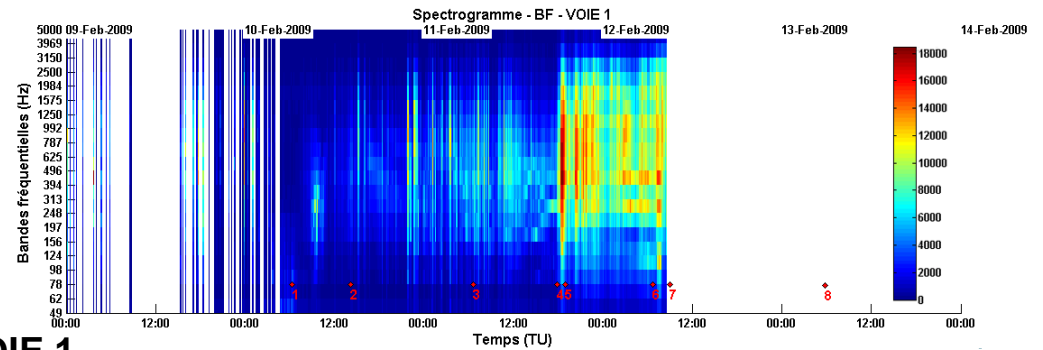
extensomètres

Effondrement : Enregistrements Voie 1

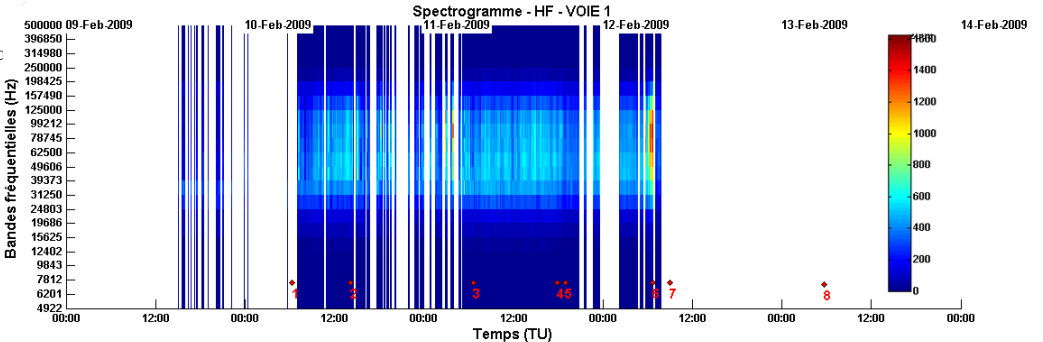
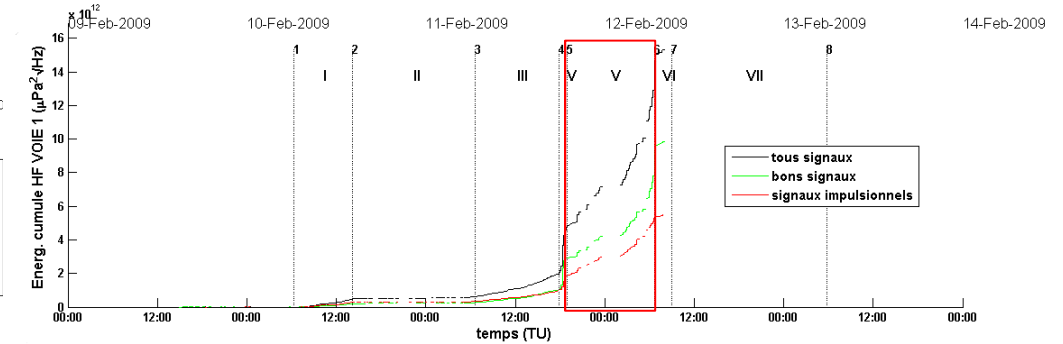
BF – VOIE 1



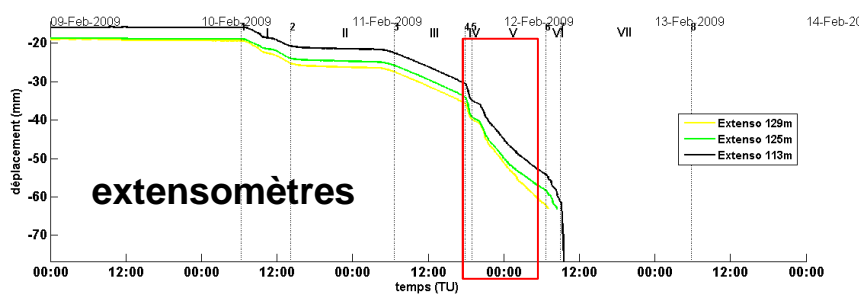
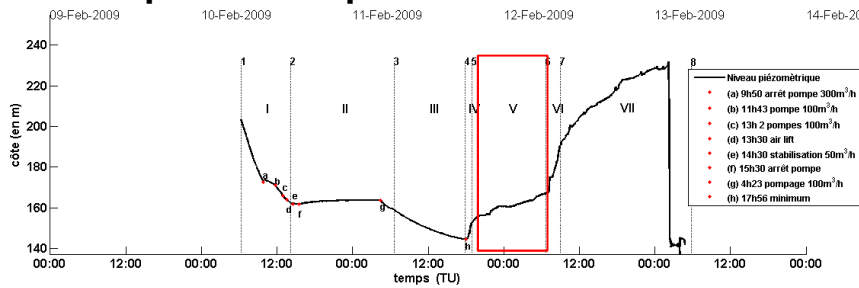
étapes		phases
1- 10/02	6h20	
2- 10/02	14h10	
3- 11/02	6h40	
4- 11/02	17h50	
5- 11/02	19h00	
6- 12/02	6h40	
7- 12/02	9h20	
8- 13/02	5h45	



HF – VOIE 1



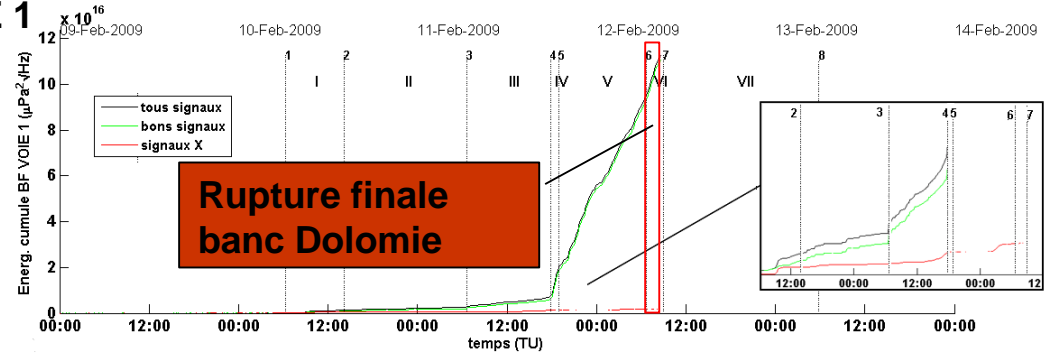
niveau piézométrique



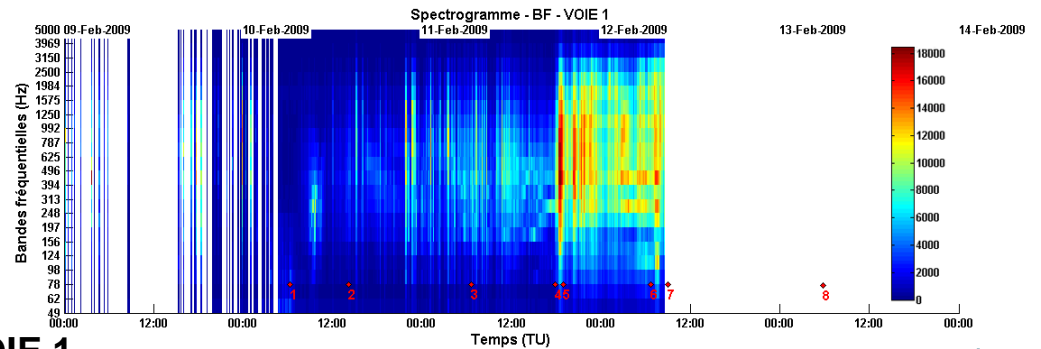
extensomètres

Effondrement : Enregistrements Voie 1

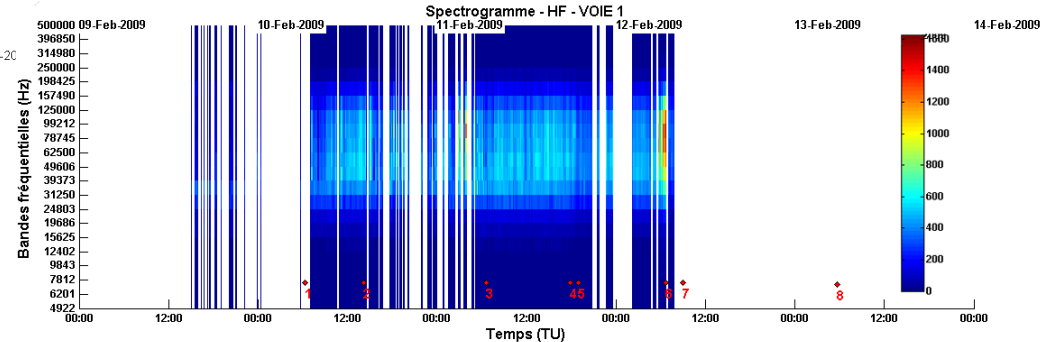
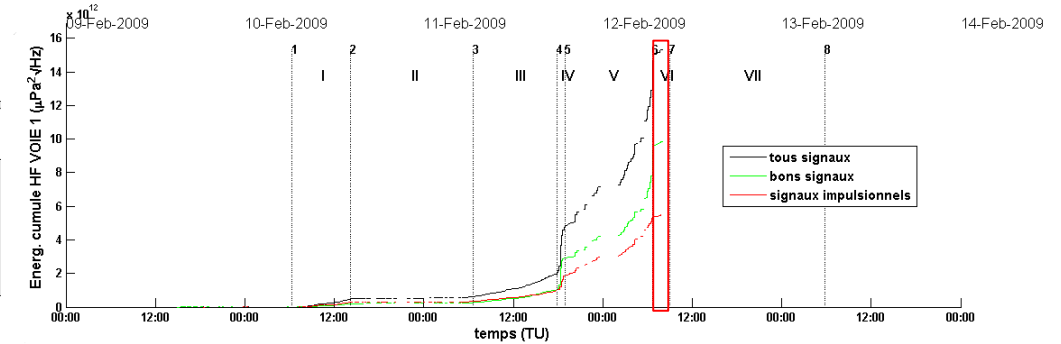
BF – VOIE 1



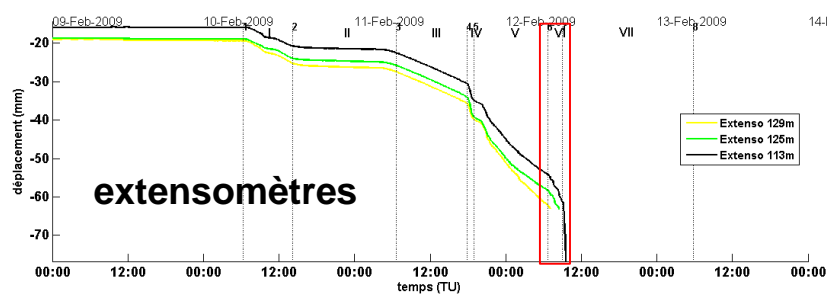
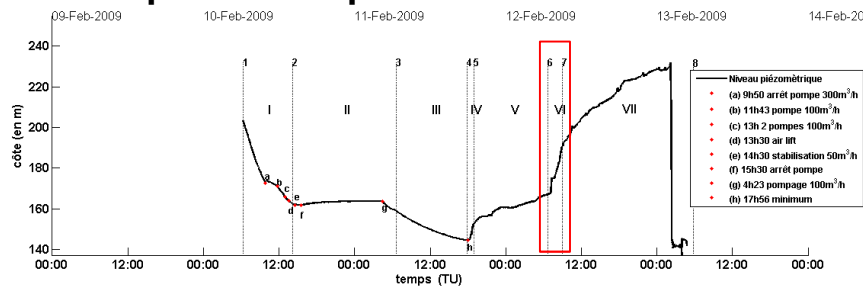
étapes	phases
1- 10/02 6h20	I
2- 10/02 14h10	
3- 11/02 6h40	II
4- 11/02 17h50	III
5- 11/02 19h00	IV
6- 12/02 6h40	V
7- 12/02 9h20	VI
8- 13/02 5h45	VII



HF – VOIE 1



niveau piézométrique



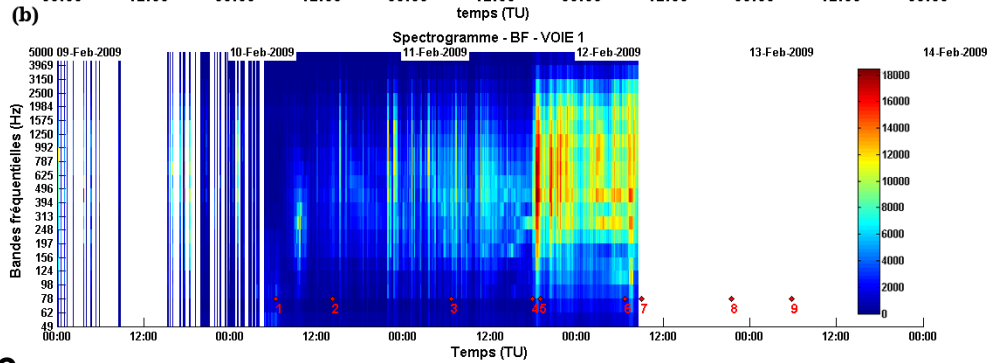
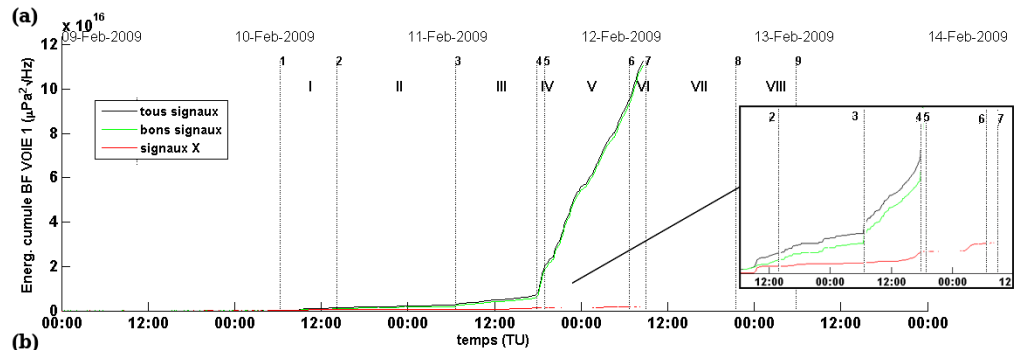
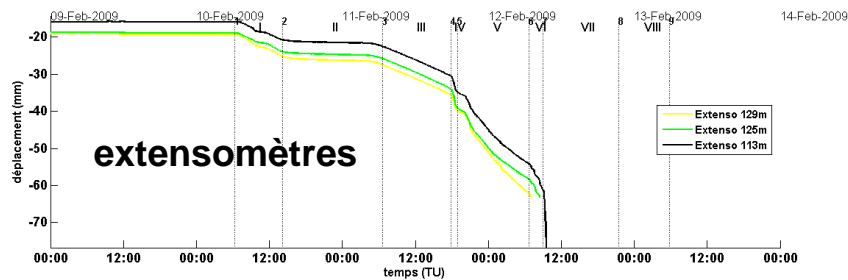
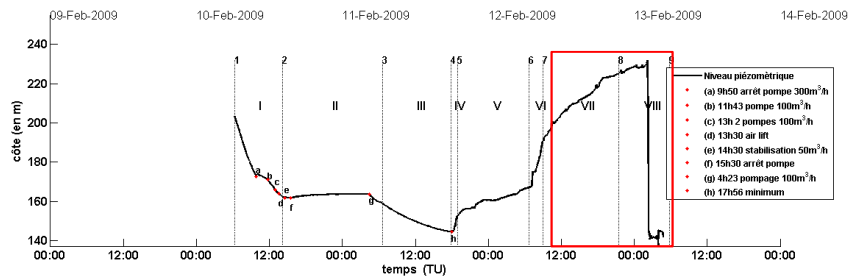
extensomètres

VOIE 1

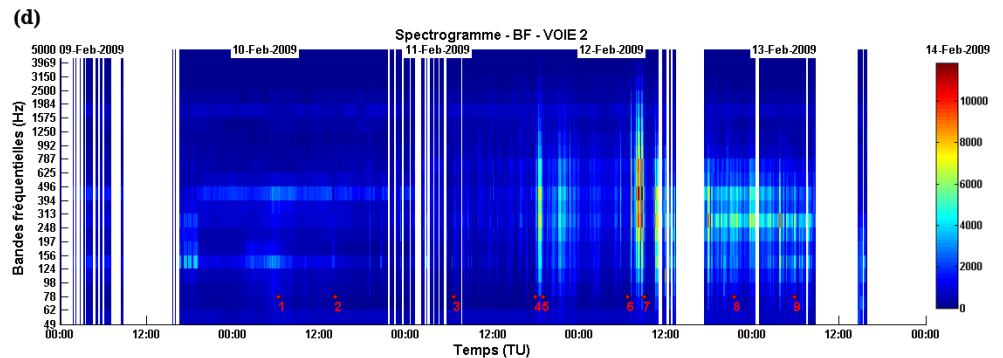
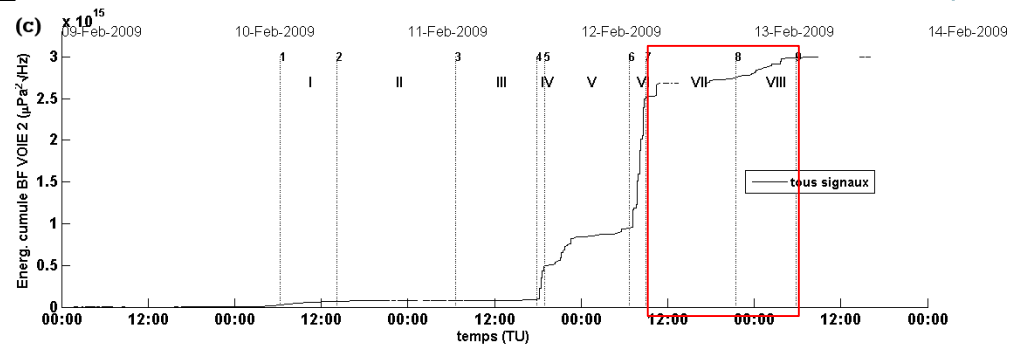
Effondrement : Enregistrements basse fréquence

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

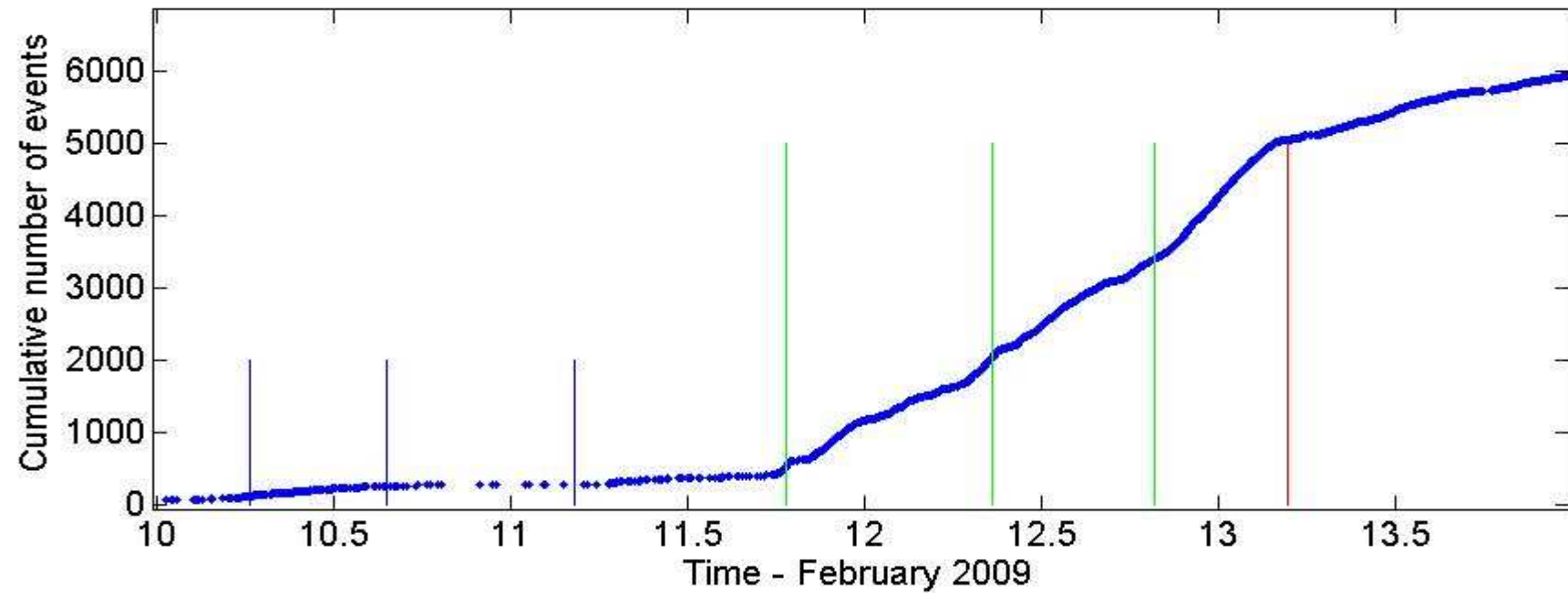
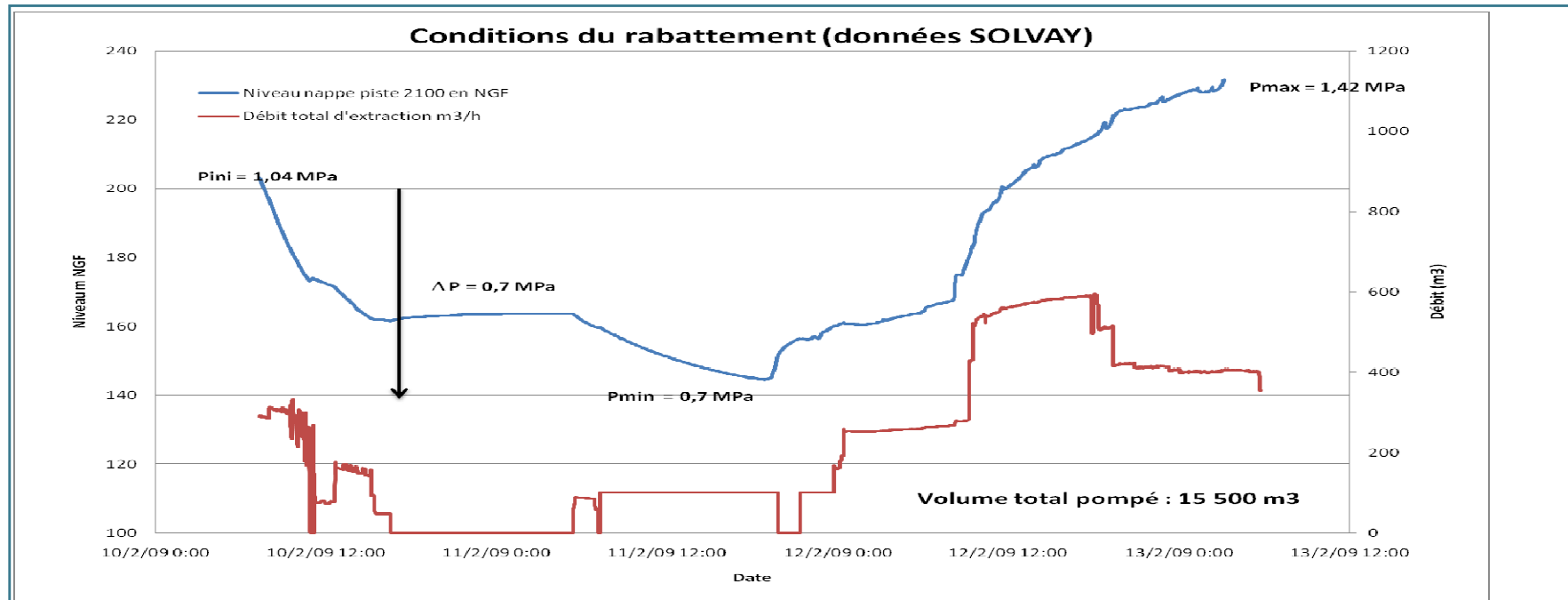
Génération de **basses fréquences** en plus des fréquences microsismiques:

sismomètres « large-bande »

gravimètre

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





Différents évènements observés

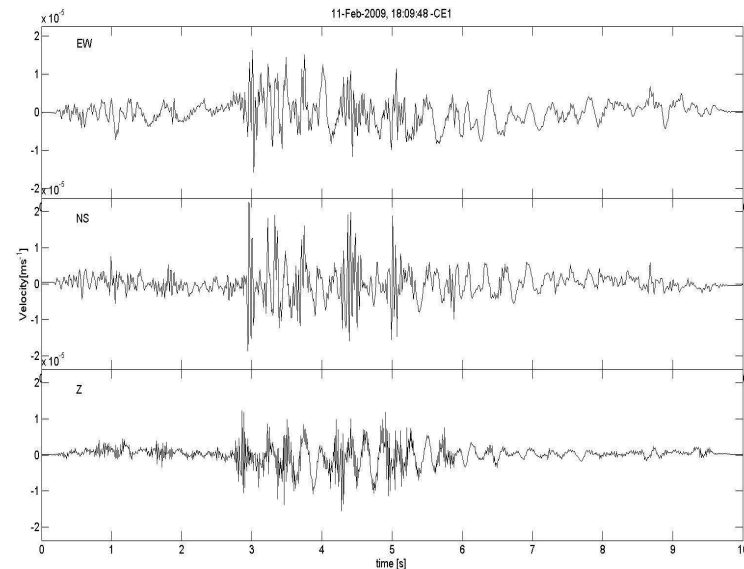
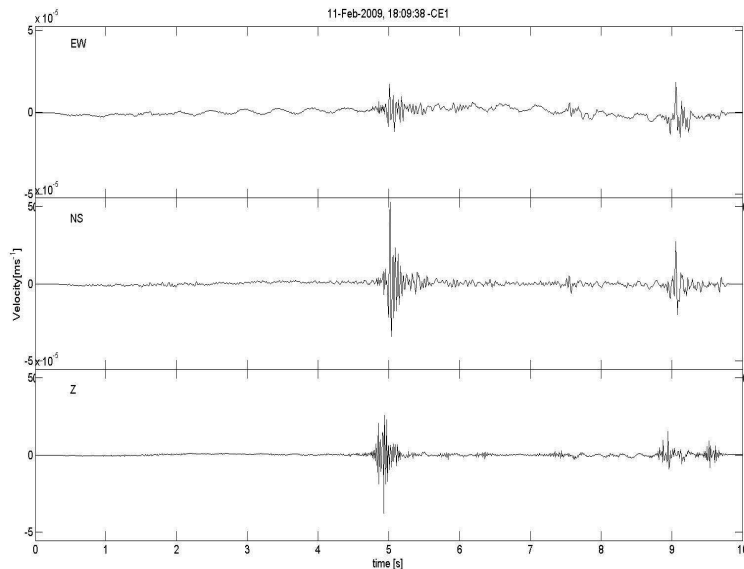
> Signaux hautes fréquences (2 – 50 Hz)

- Rupture fragile des bancs de dolomie et autres bancs

> Signaux longue-période (0.2 – 5 Hz)

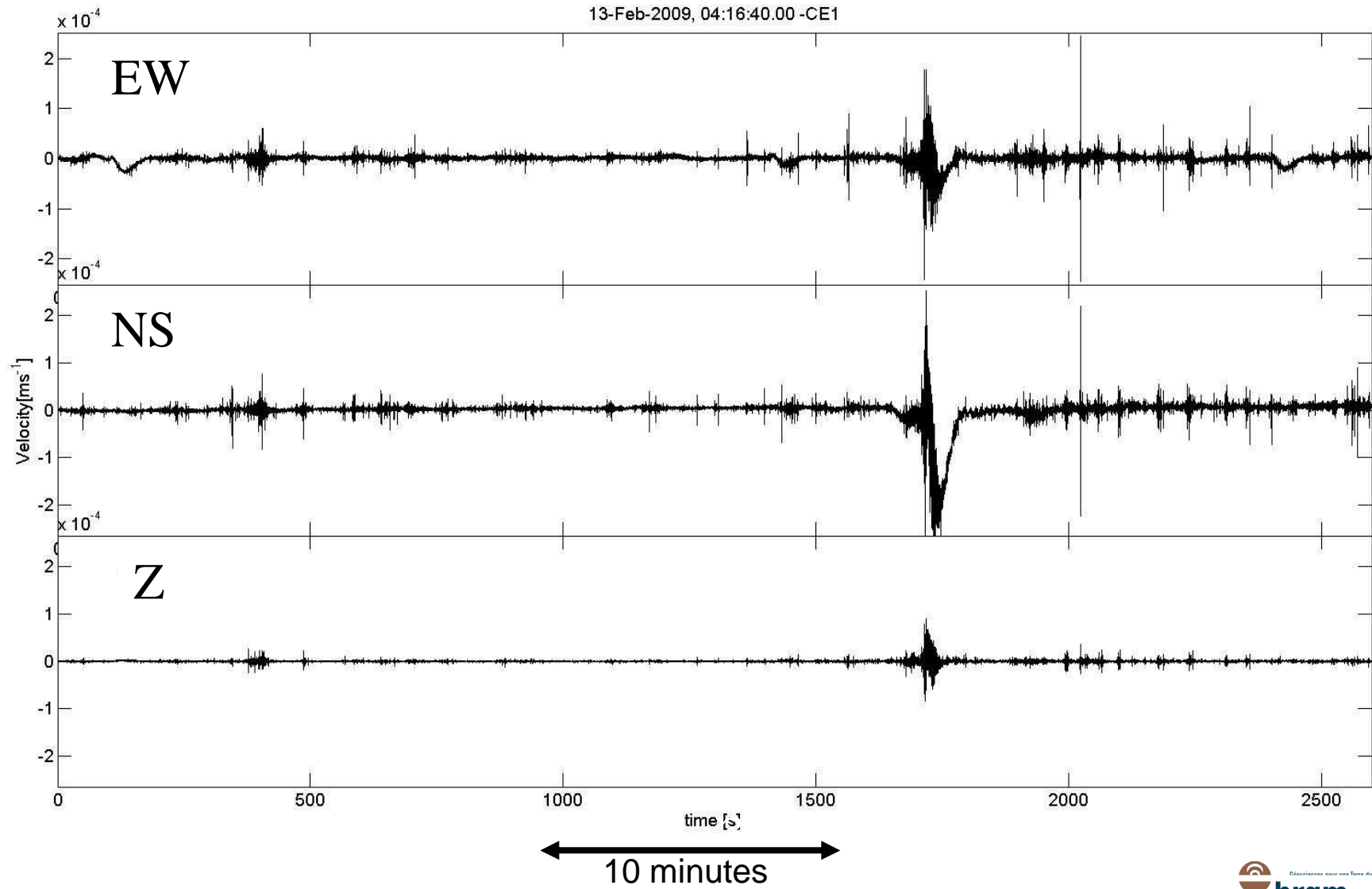
- Résonance de fractures
- Migration de fluide dans les fractures

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

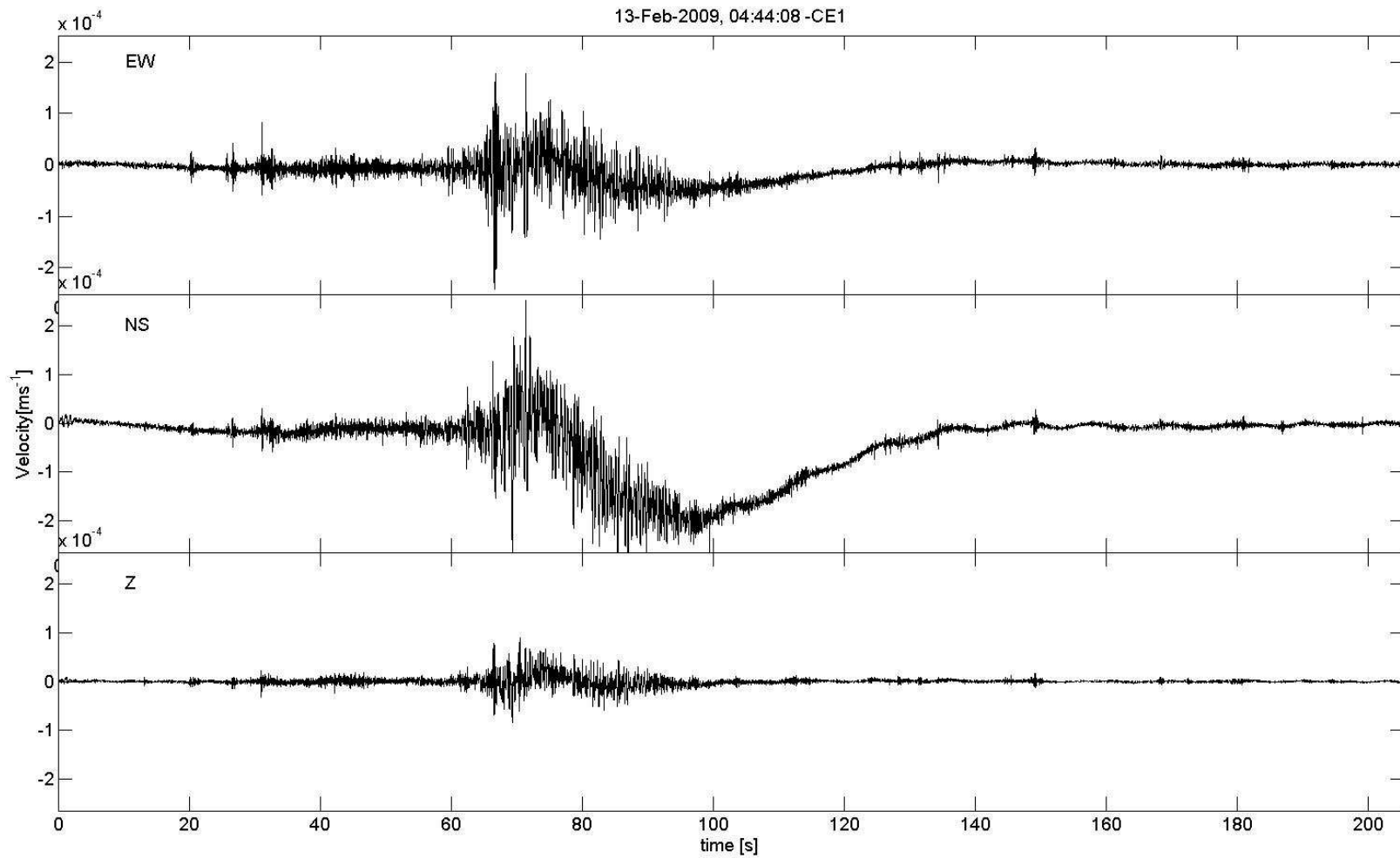


Effondrement

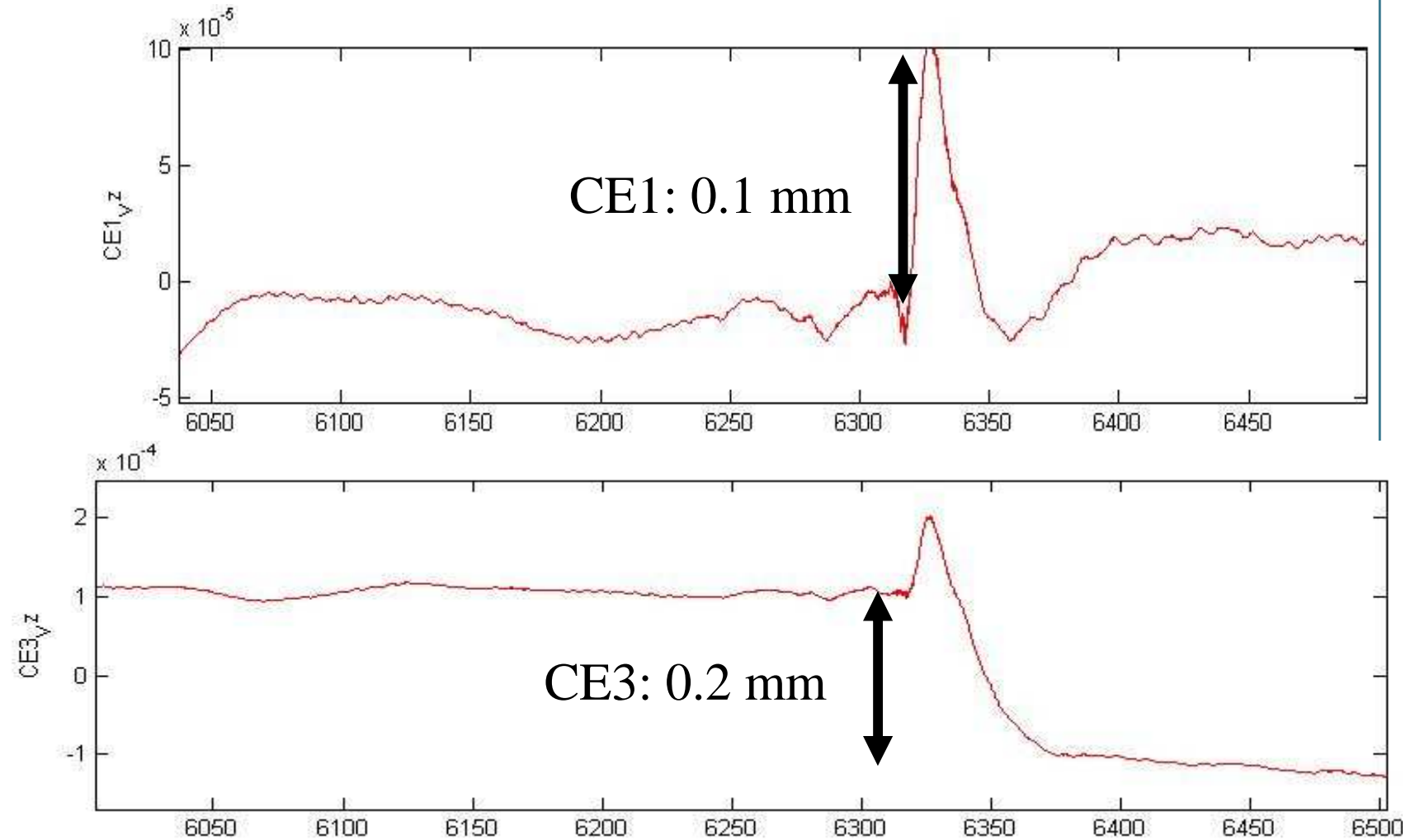
Données non filtrées



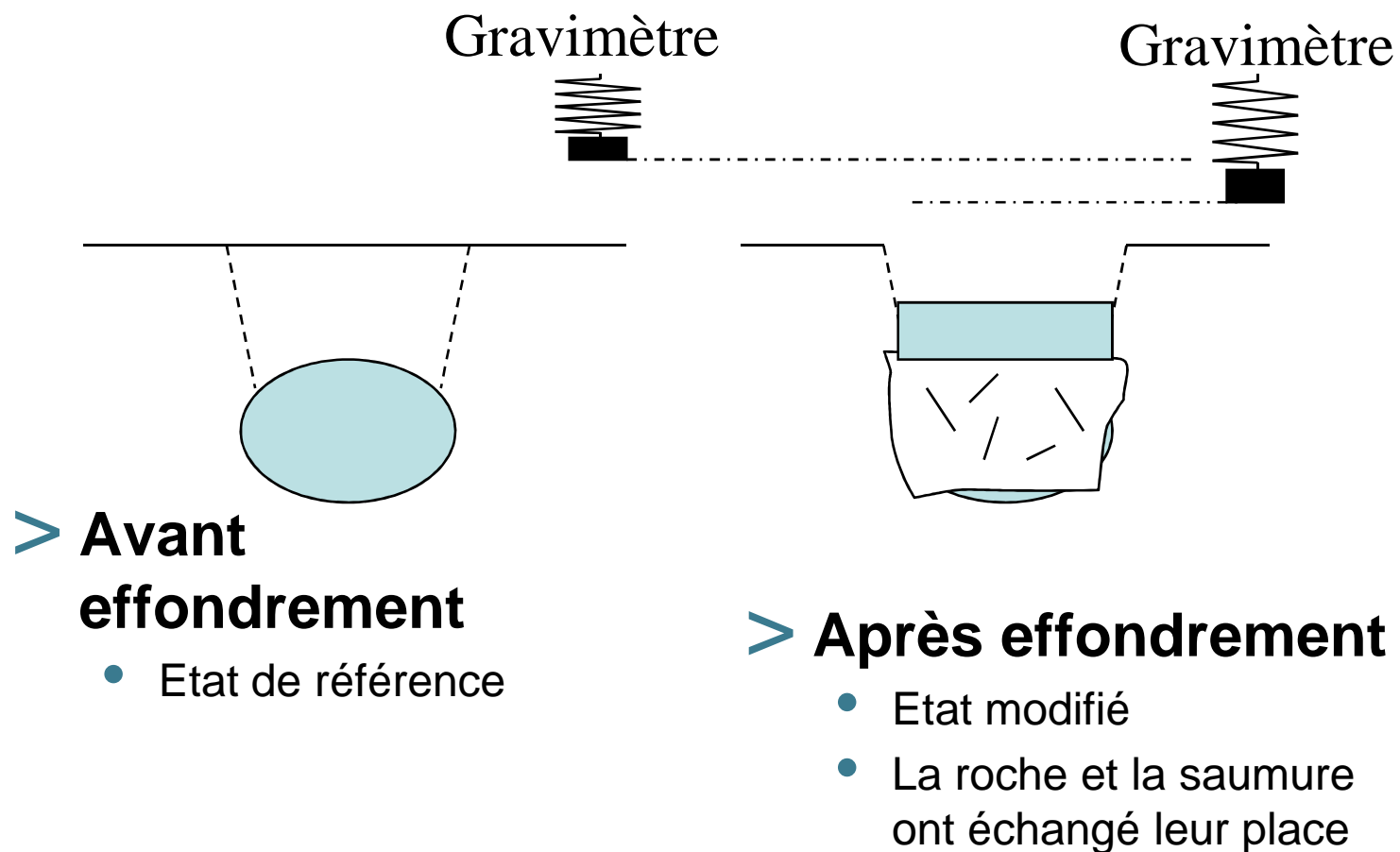
Effondrement



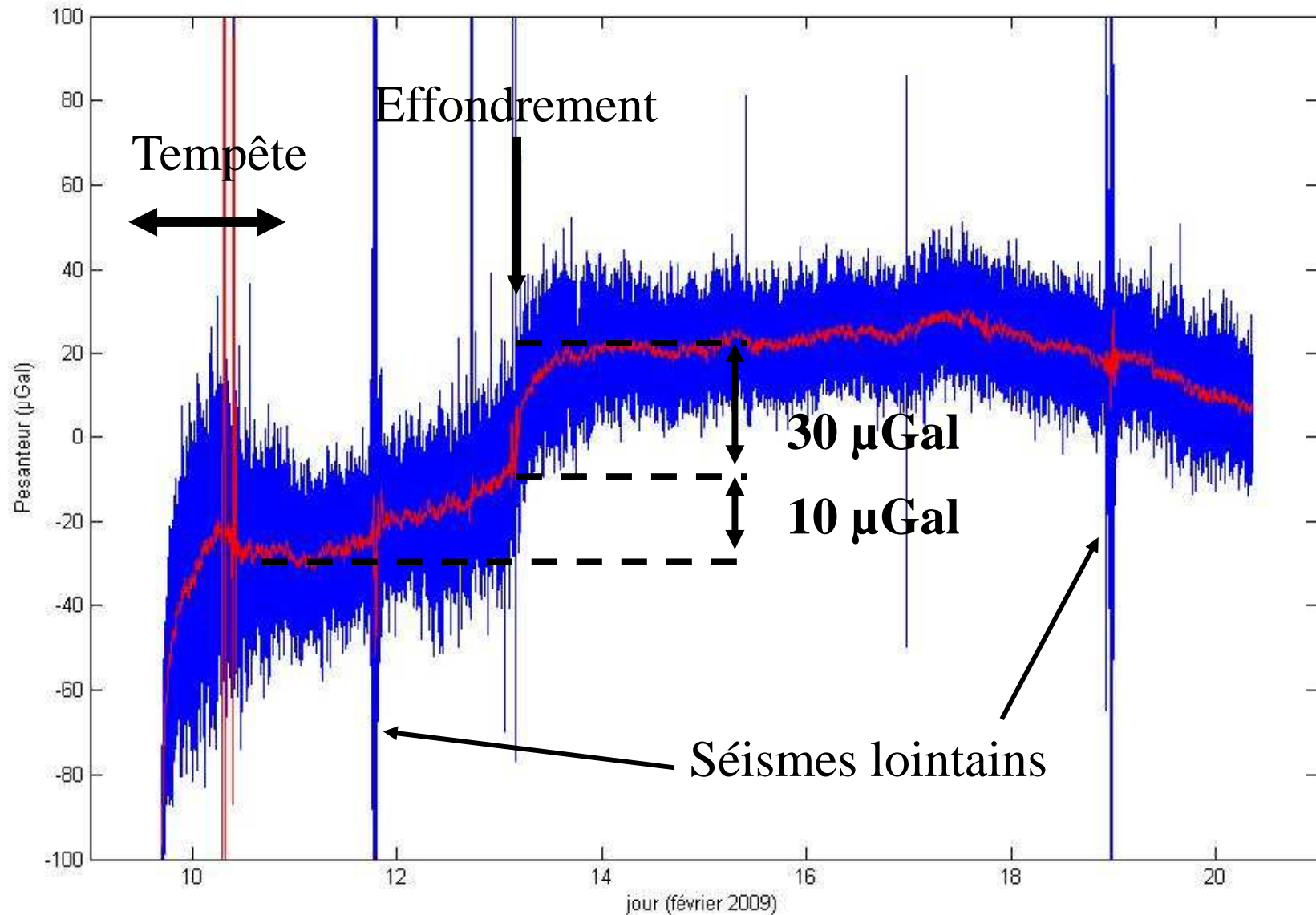
Déplacements



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



ANNEXES



-1.89 3740 46 -625 5

GISOS

SOLVAY FRANCE

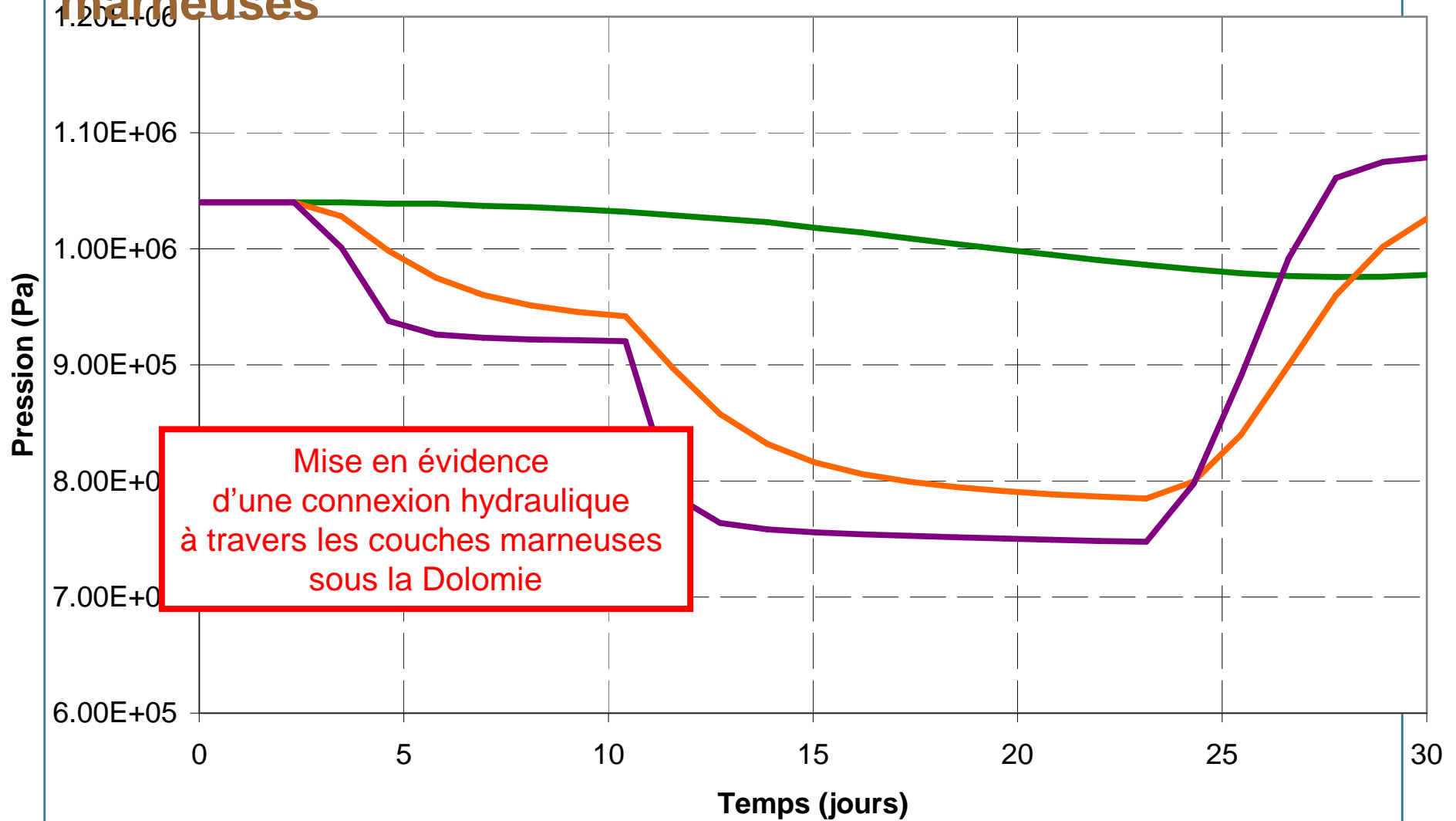


Géomécanique

> Annexes:

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

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

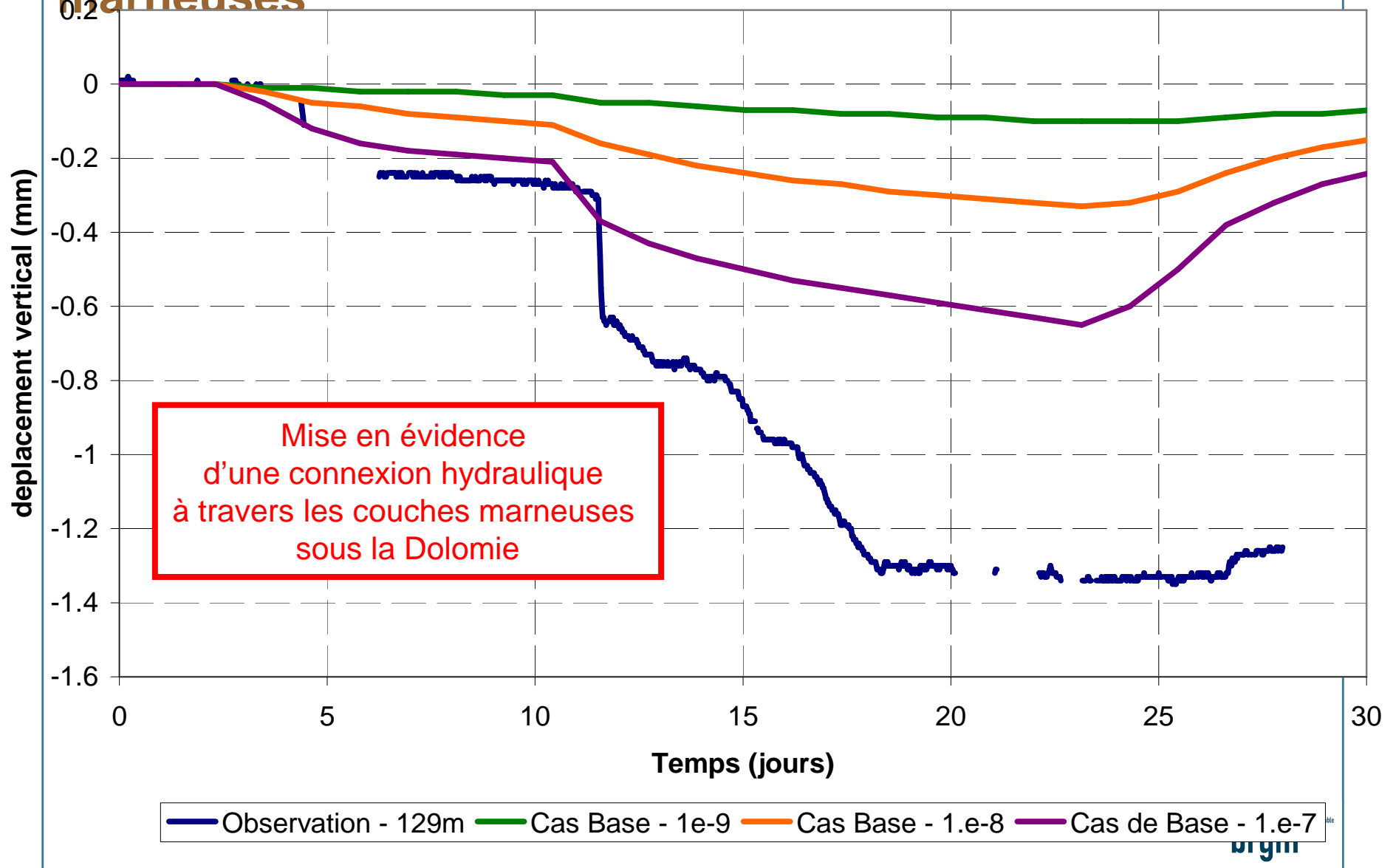


Mise en évidence d'une connexion hydraulique à travers les couches marneuses sous la Dolomie

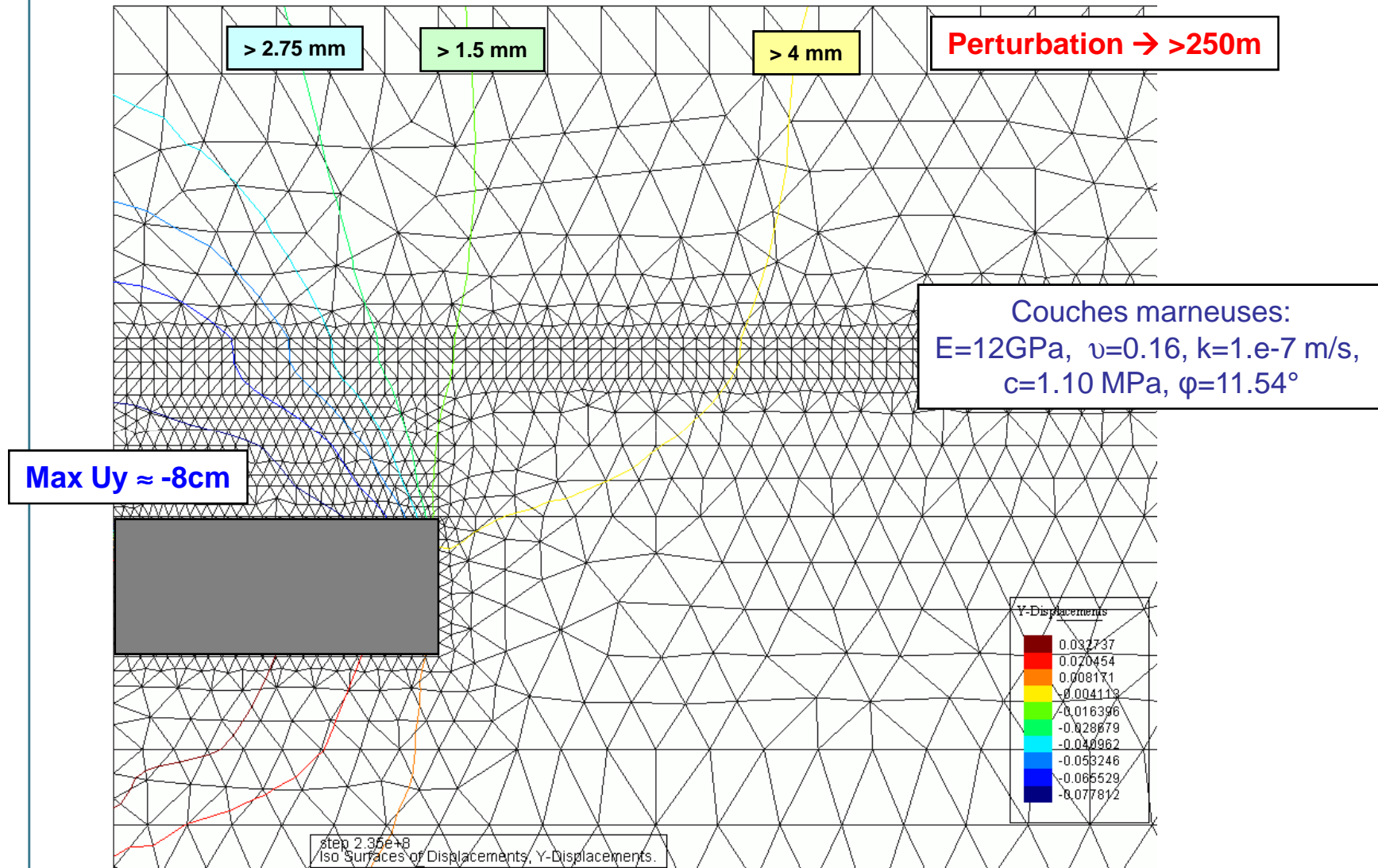
— Cas Base - 1e-9 — Cas Base - 1.e-8 — Cas de Base - 1.e-7



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



Champ des déplacements U_y , après essai n°1

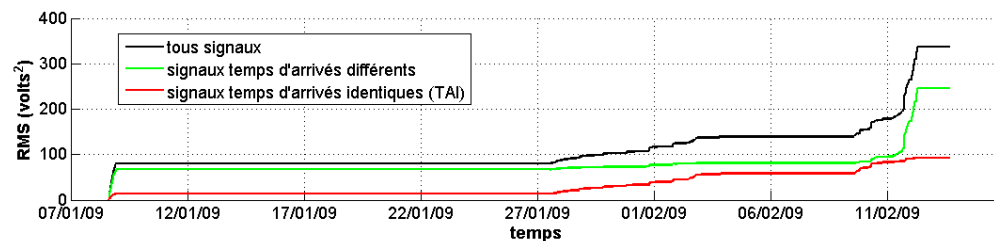
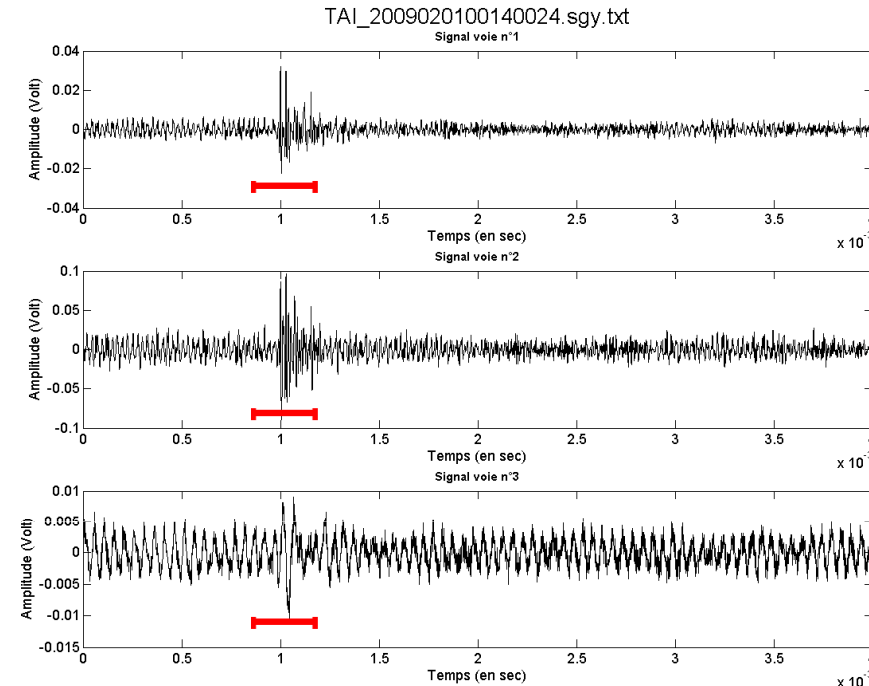


ANNEXES – Hydroacoustique

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

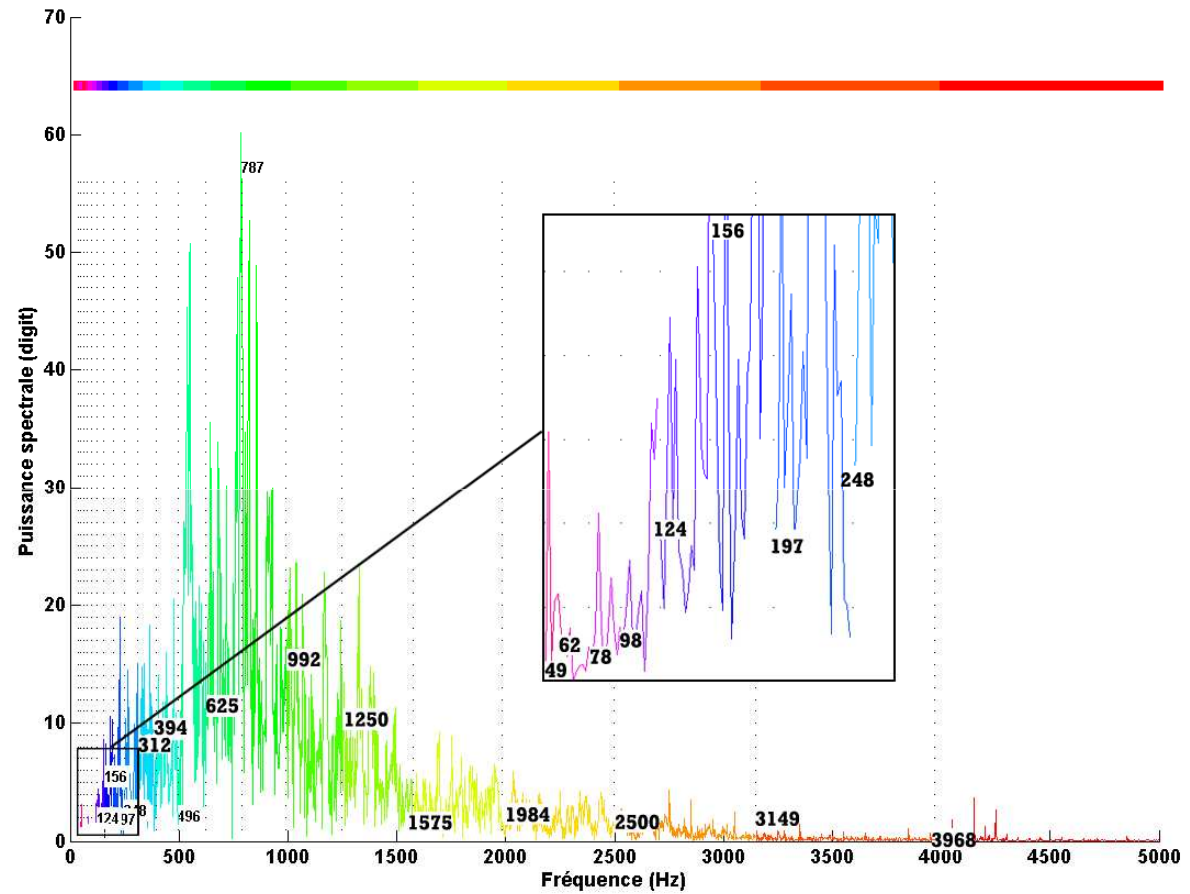
$$V_{dBref1V_{RMS}} = Vs - Gp - Gf$$

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

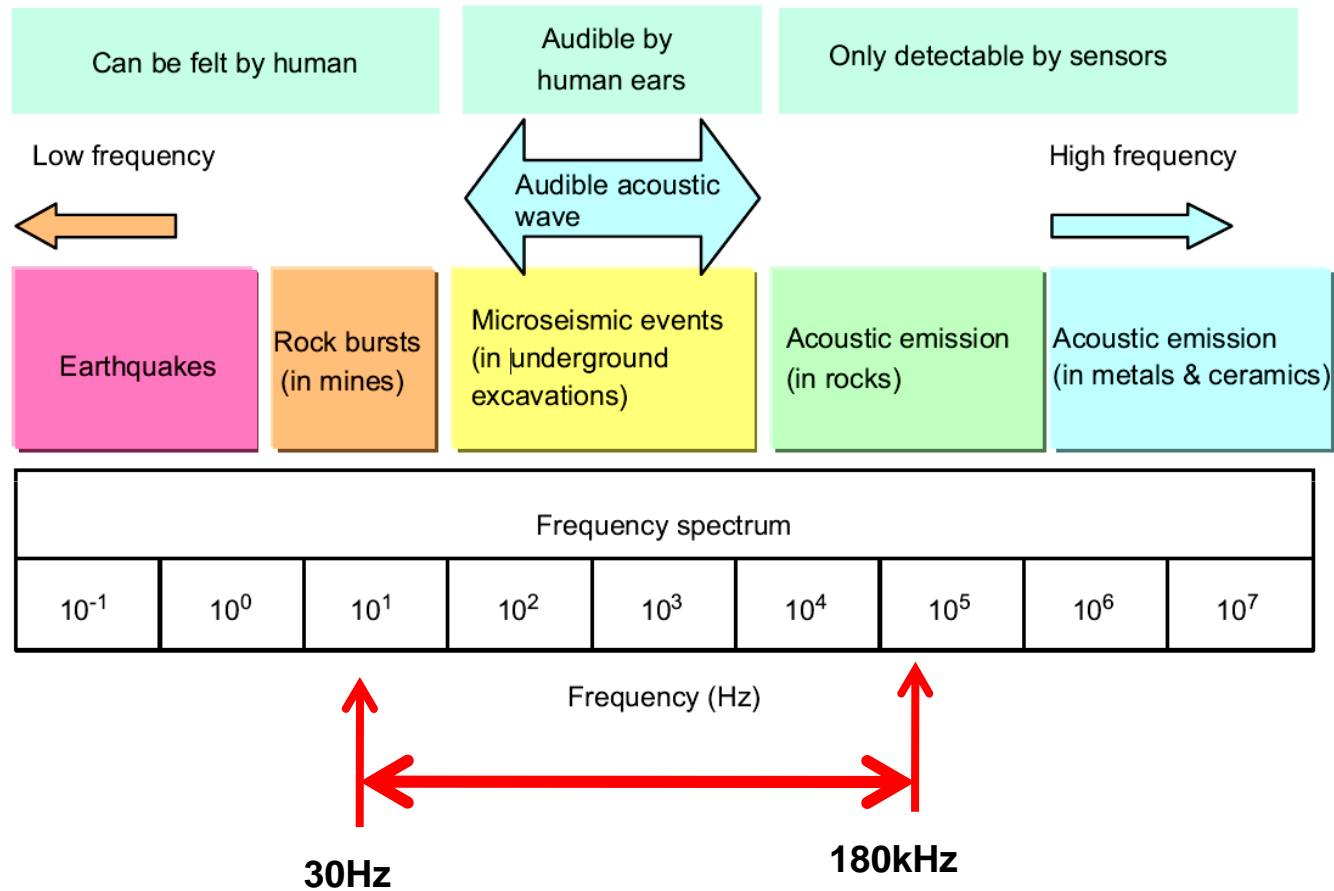
$$\Delta P = V_{dBref1V_{RMS}} - S_b - 10 \times \log_{10}(120 \cdot 10^3)$$

Spectrogramme

Pas en tiers
d'octave

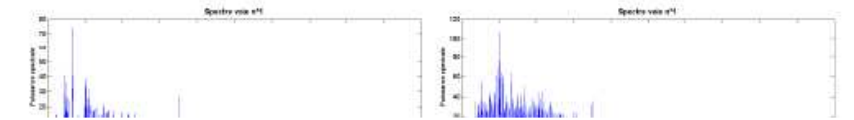
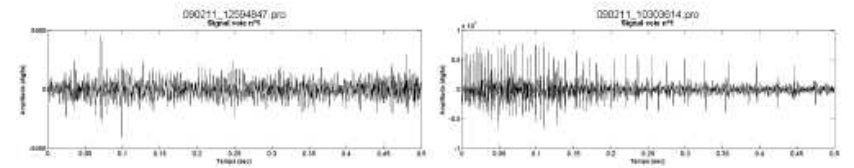
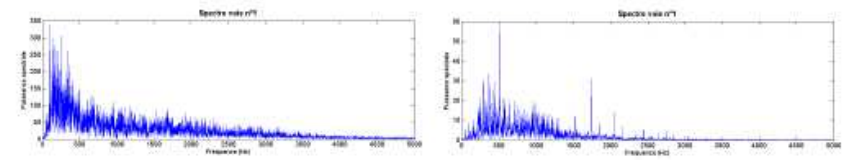
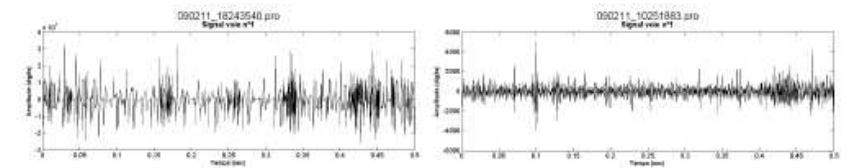
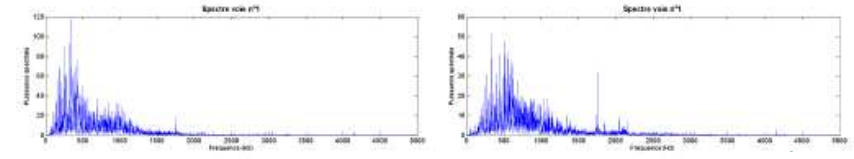
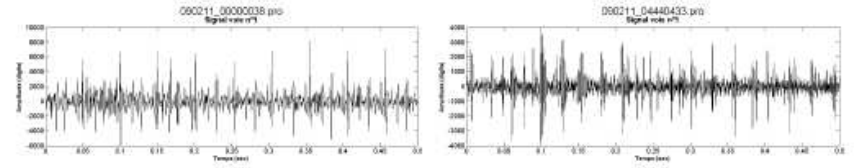
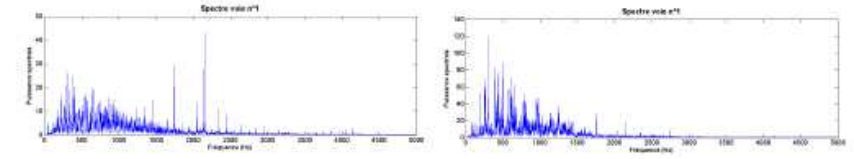
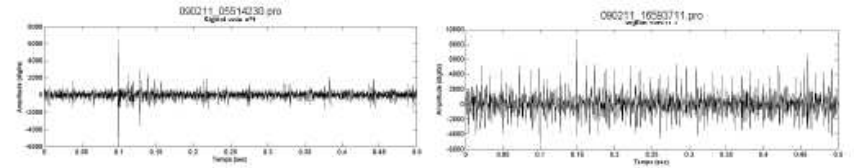
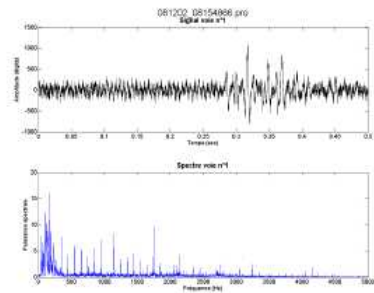
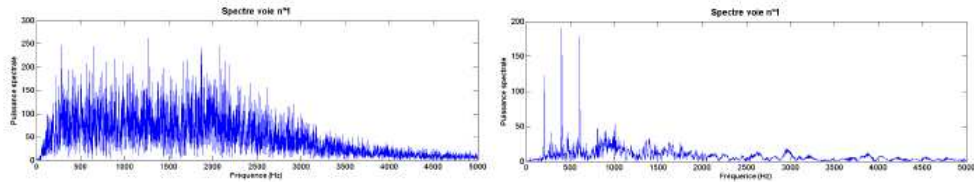
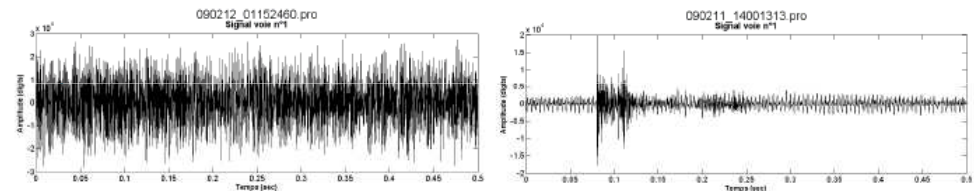
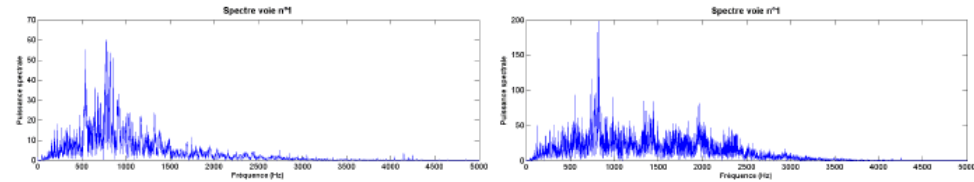
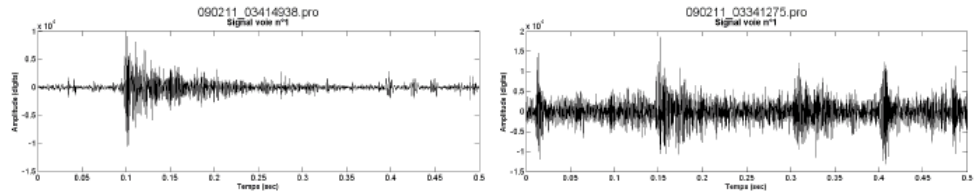


ONDE ACCOUSTIQUE

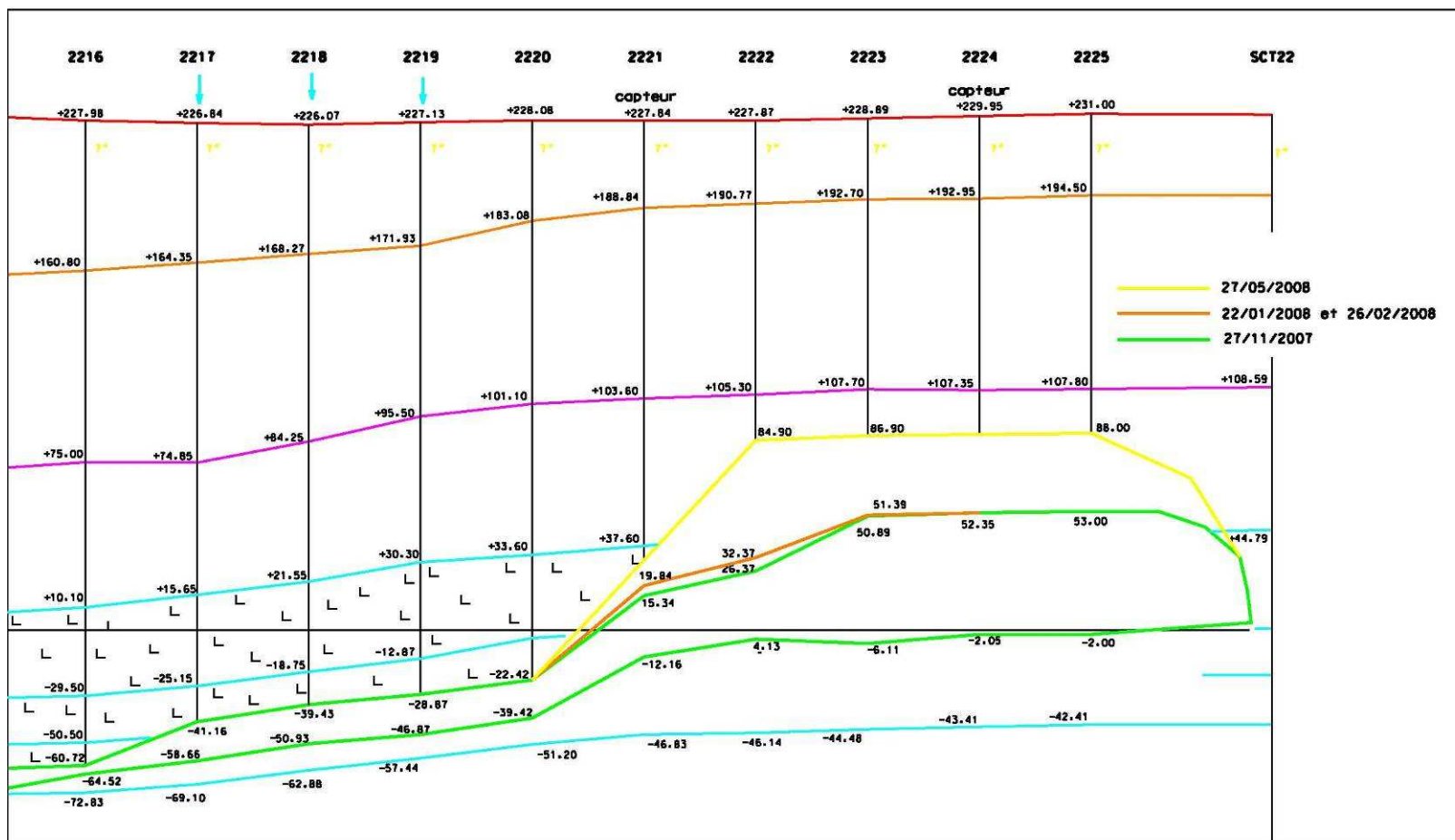


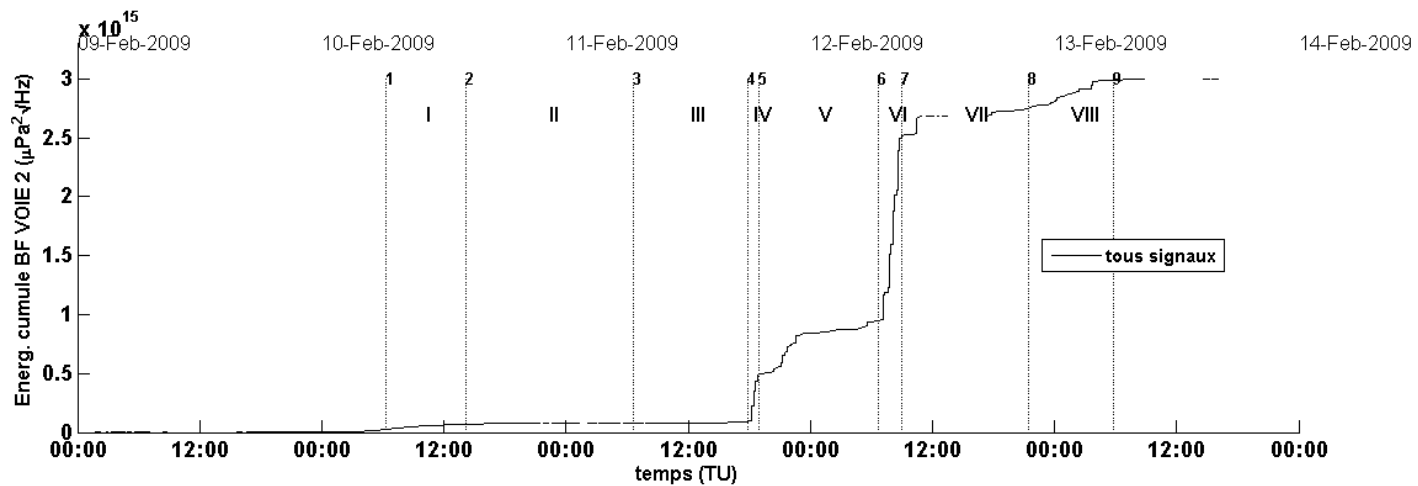
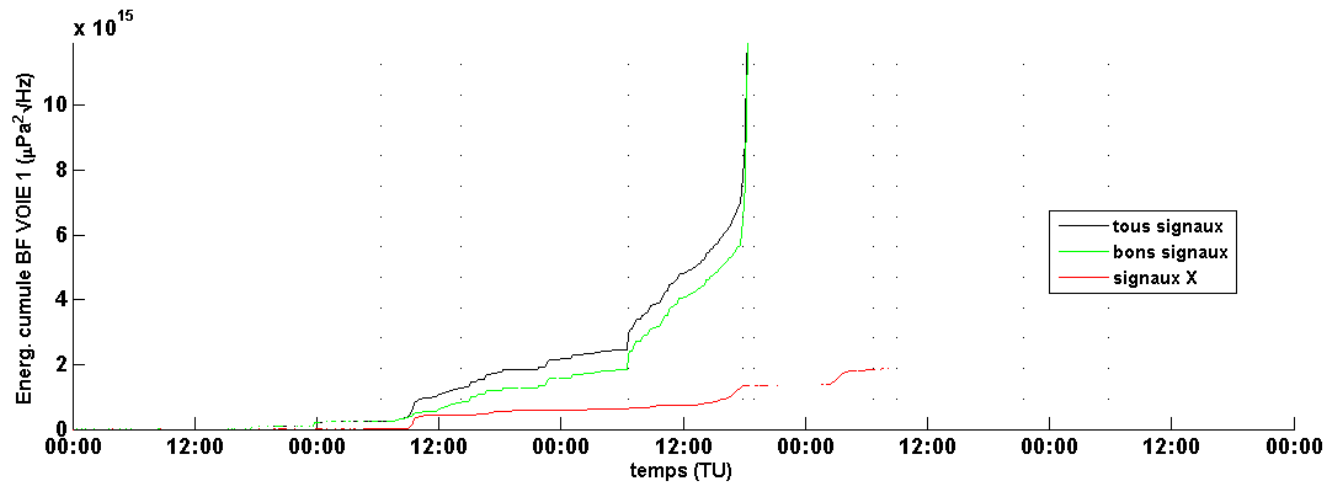
SIGNAUX X BF VOIE1

BONS SIGNAUX BF VOIE1



Excavations de la cavité saline



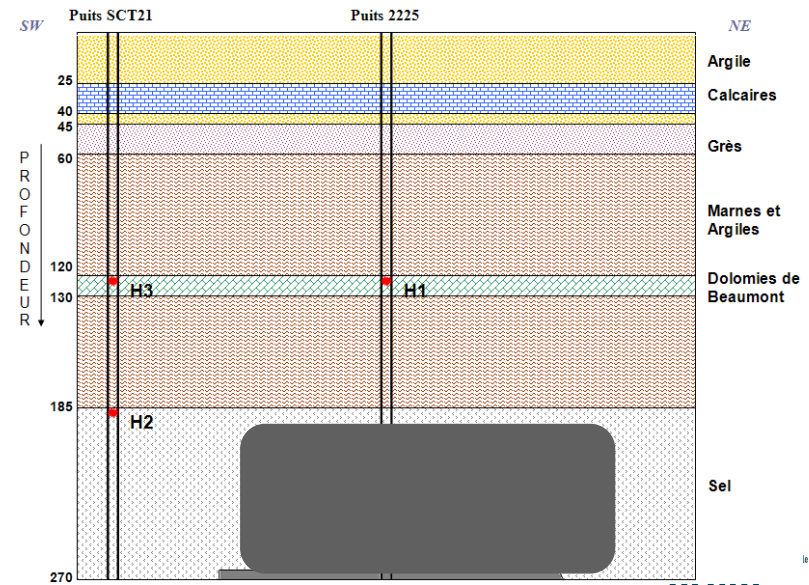
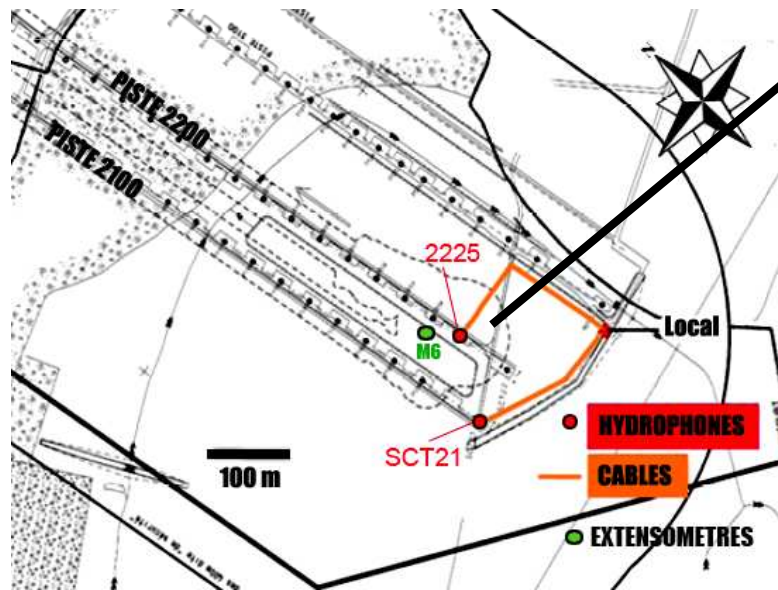


Localisation des 3 hydrophones

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

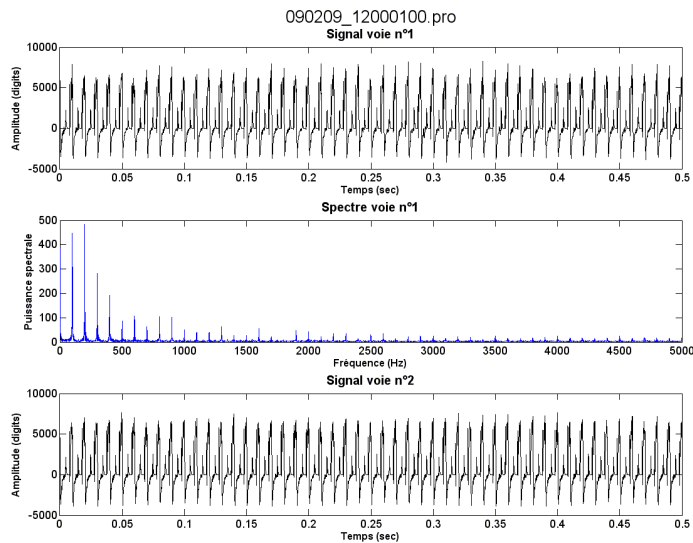


Bernardie et Lebert, 2005 (Document SOLVAY)

Narayanan (2006)

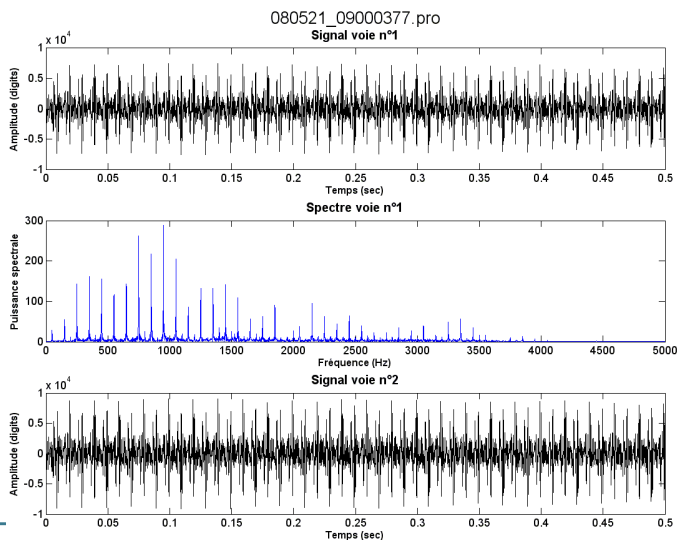
Ugim

TRAITEMENT INITIAL DES BF



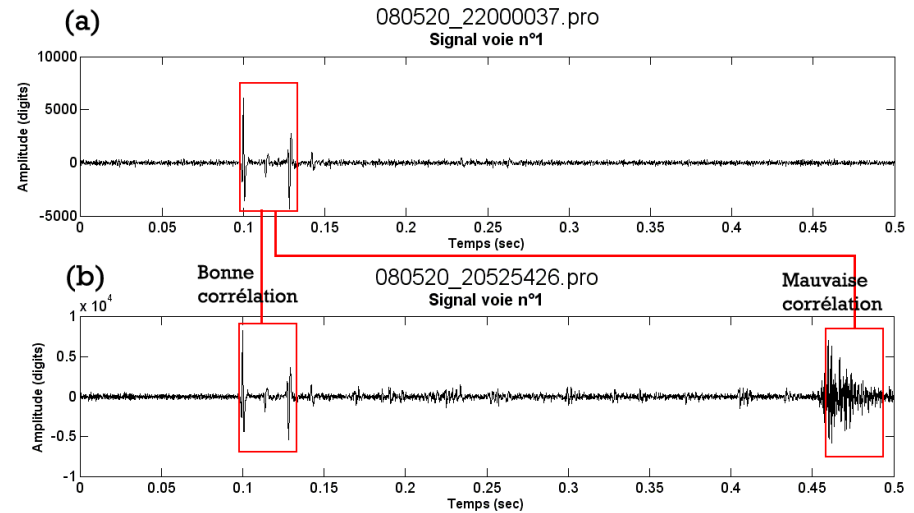
BE1 « Bruit Electronique 1 »

➤ 1 346 733 événements



BE2 « Bruit Electronique 2 »

➤ 8 640 événements



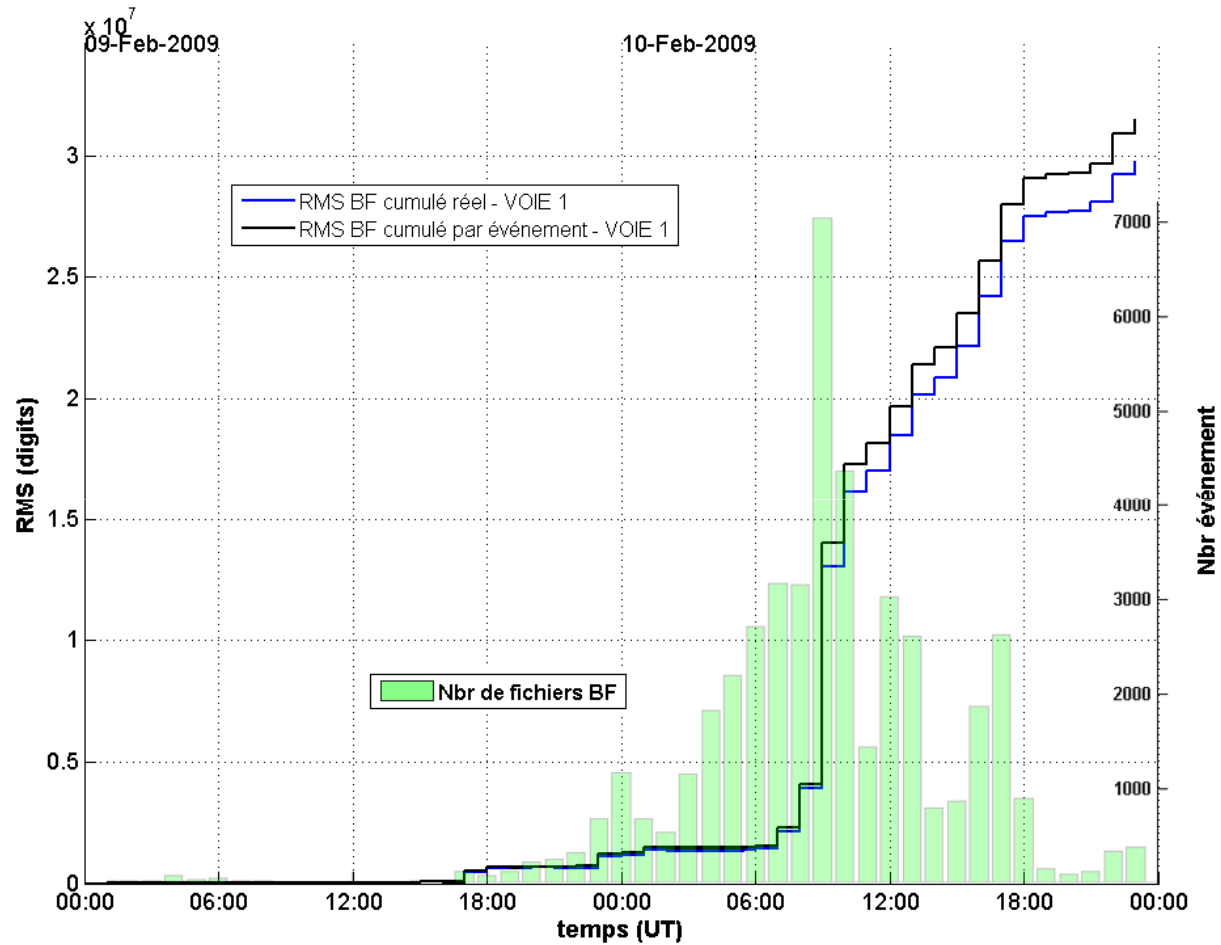
BDI « Bruit Double Impulsion »

➤ 13 766 événements



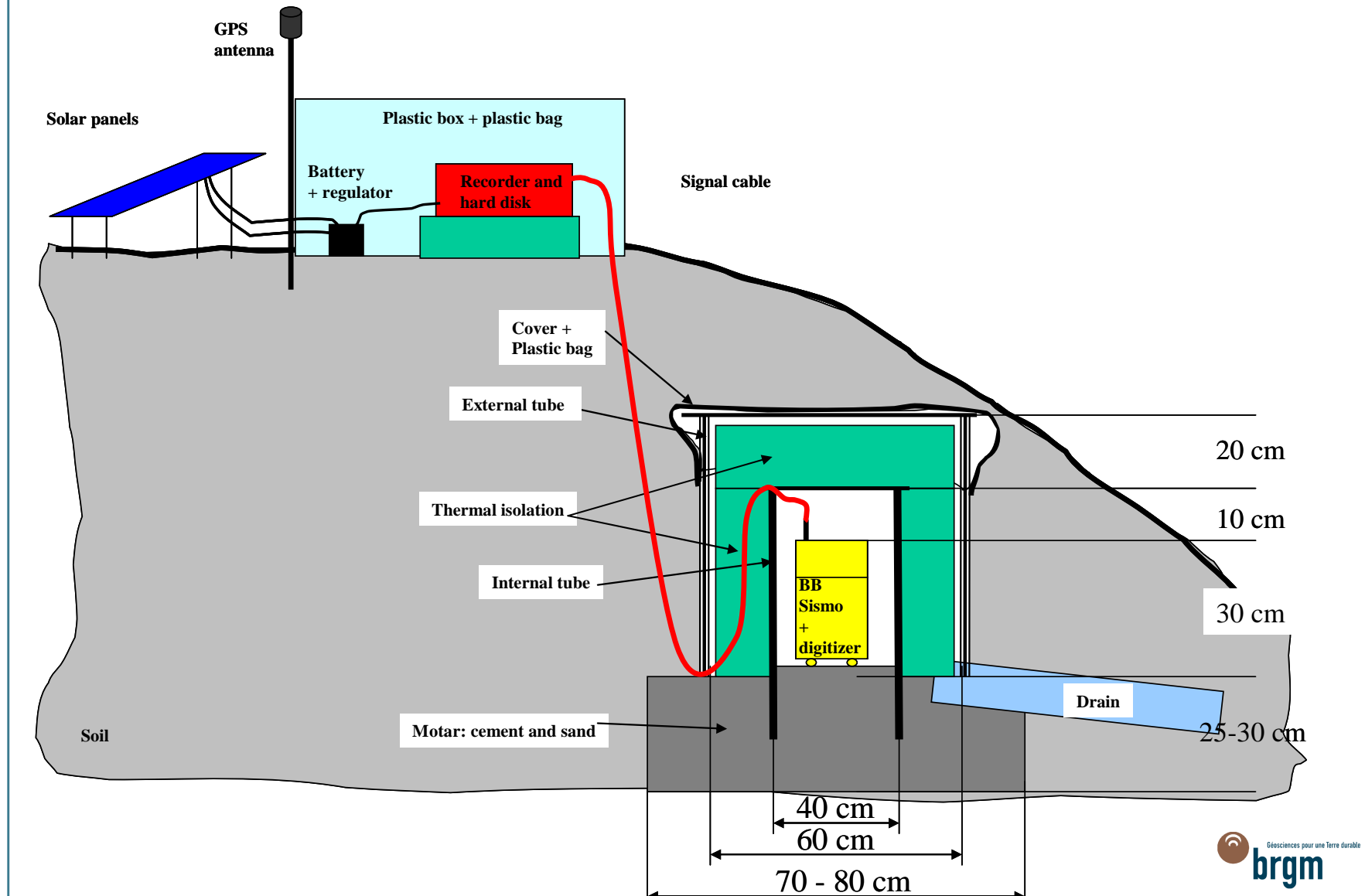
751 629 événements restants (sur 2 120 768 initiaux)

SUPERPOSITION DES BF

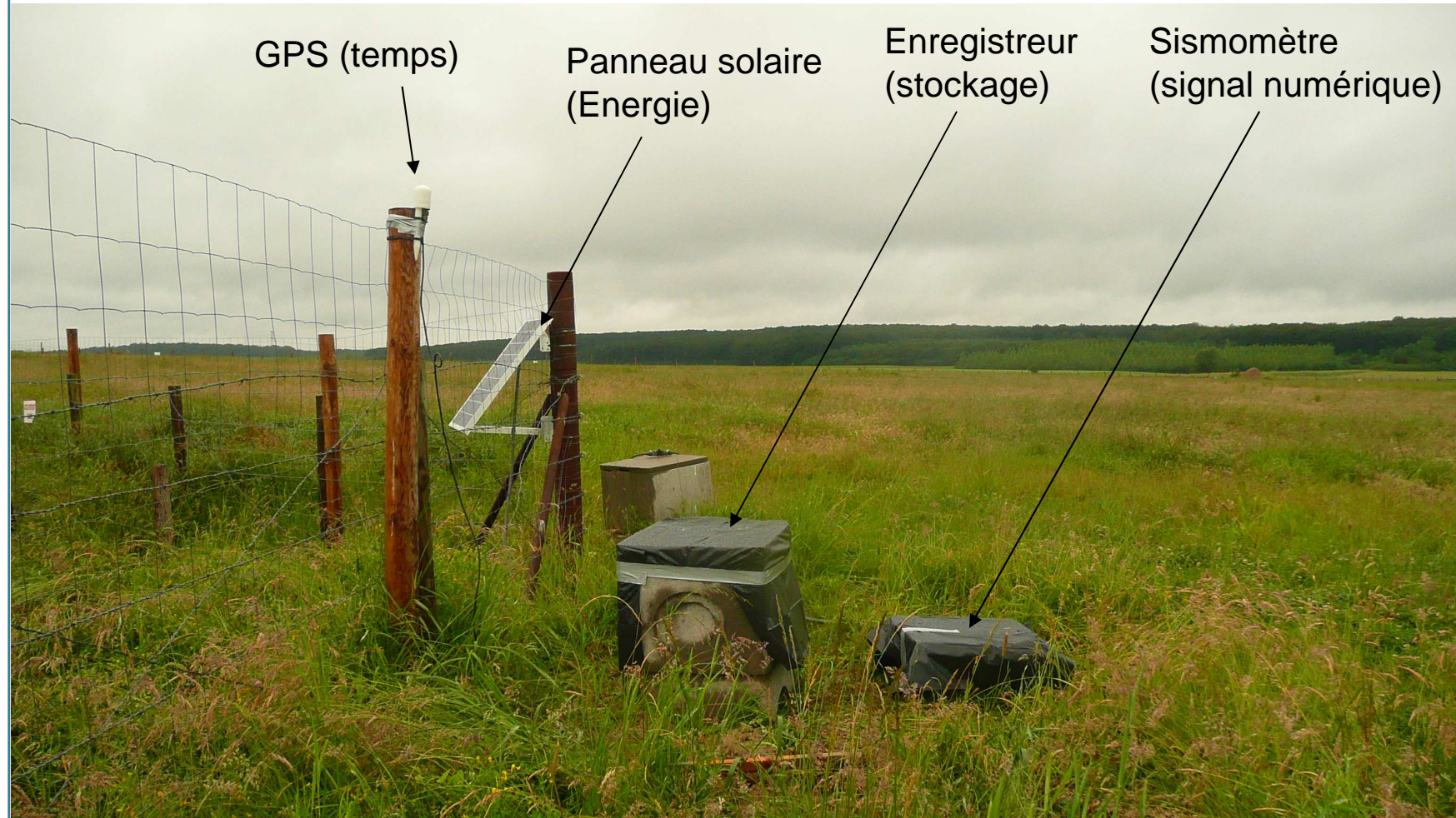


ANNEXES – Sismo LB

Réseau sismomètre large bande - Schéma d'installation

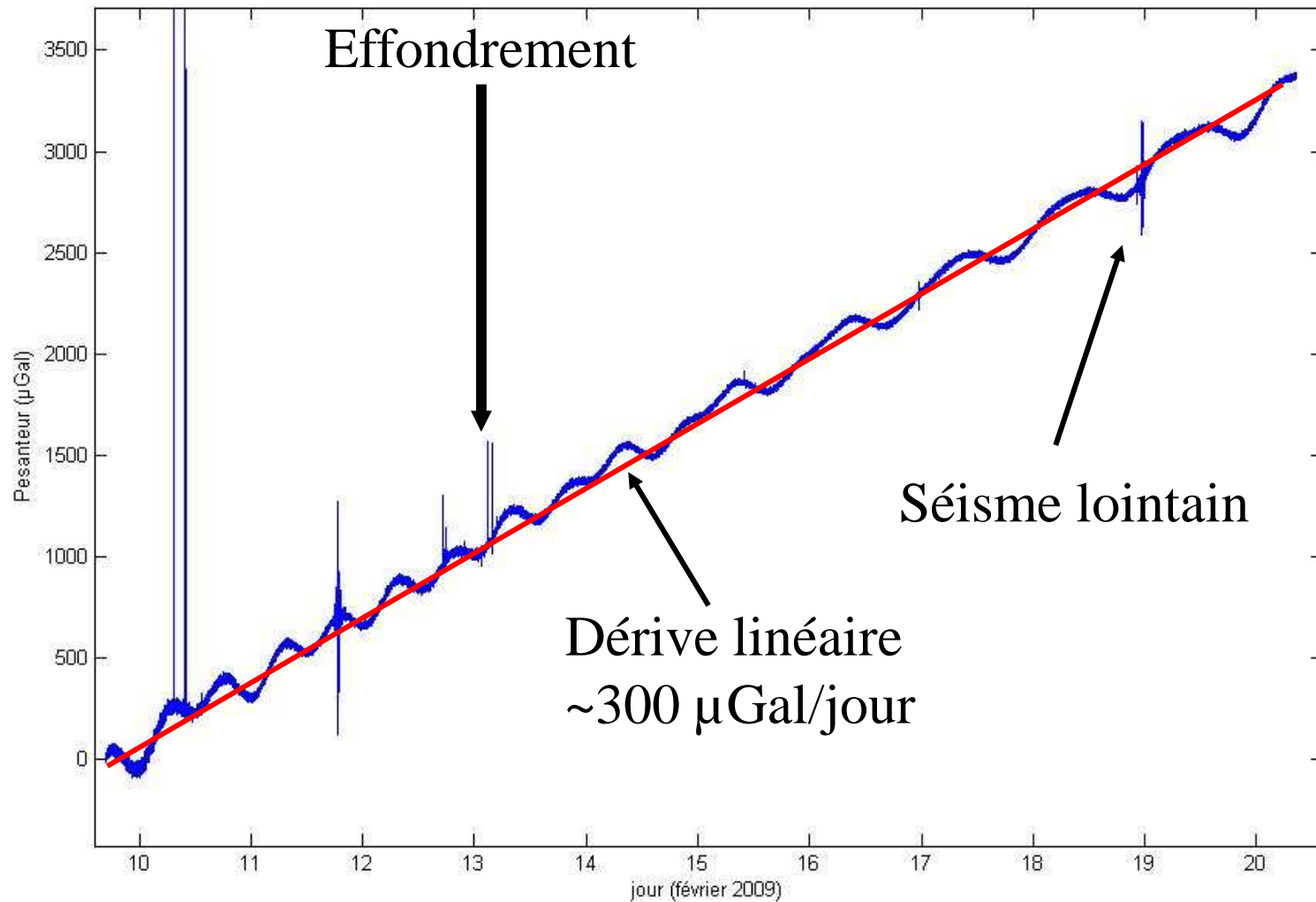


Exemple: station CE1



Pesanteur et effondrement

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



Pesanteur et effondrement

> Modélisation de la marée terrestre (Wenzel, 1996)

