

**PRESENTATION DES RESULTATS DE L'ETUDE DES MAISONS  
 TEMOINS A LA MINE CANADIAN MALARTIC**



Pour le compte de la Mine Canadian Malartic et du CSCM

Par Thierry BERNARD  
 Docteur en Sciences de la Terre  
 Ingénieur Arts & Métiers

Ind	Date	Pages	Etabli par	Signature
D	12/06/16	55	T. BERNARD	

**SOMMAIRE :**

**I. RESUME ..... 4**

**II. AVANT-PROPOS..... 5**

**III. LES DONNEES ENREGISTREES ..... 5**

**A. LES MESURES STATIQUES D’OUVERTURE DES FISSURES ..... 5**

**B. LES MESURES DYNAMIQUES D’OUVERTURE DES FISSURES..... 6**

**C. LES MESURES D’INCLINAISON DES BATIMENTS..... 7**

**D. LES DONNEES SISMIQUES..... 8**

**E. LA TEMPERATURE ..... 9**

**F. QUANTITE ET QUALITE DES DONNEES..... 10**

**G. CONCLUSION RELATIVE AU SYSTEME D’INSTRUMENTATION ..... 12**

**IV. ANALYSE DES DONNEES EXPLOITABLES ..... 13**

**A. QUELQUES NOTIONS SUR LES FISSURES DU BETON..... 13**

**B. LES DONNEES STATIQUES ..... 13**

**C. LES DONNEES DYNAMIQUES ..... 16**

**D. LES CORRELATIONS ..... 18**

**E. CONCLUSION..... 31**

**V. L’ANALYSE STRUCTURELLE DES BATIMENTS..... 32**

**A. OBJECTIFS ET PRINCIPE ..... 32**

**B. RESULTATS PAR HABITATION..... 32**

**C. CONCLUSION DE L’ANALYSE STRUCTURELLE DES HABITATIONS..... 49**

**VI. CONCLUSION ..... 50**

**VII. ANNEXES..... 51**

**A. LOCALISATION DES MAISONS TEMOINS..... 51**

**B. ANNEXE 1 : PLAN DES HABITATIONS TEMOINS ..... 52**

**C. LIMITES DE VIBRATION POUR LES HABITATIONS COURANTES..... 54**

**D. RECOMMANDATIONS CONCERNANT L’INSTRUMENTATION ..... 55**

**E. VIBRATIONS ET TASSEMENT DES SOLS..... 56**

**TABLE DES ILLUSTRATIONS**

Figure 1 : Extensomètre	5
Figure 2 : Principe de mesure de l'ouverture d'une fissure	6
Figure 3 : Exemple dévolution de l'ouverture d'une fissure	6
Figure 4 : Exemple d'une évolution dynamique d'une fissure sans effet	7
Figure 5 : enregistrement des vibrations associées aux mesures d'un extensomètre	7
Figure 6 : Détail d'un Tilt-mètre	7
Figure 7 : Exemple de mesure d'angle au Tilt-mètre	8
Figure 8 : Capteur de vibration installé sur un mur porteur de l'habitation #1	8
Figure 9 : Vibrations mesurées dans le sol	9
Figure 10 : Vibrations mesurées sur un revêtement en placage	9
Figure 11 : évolution de la température au droit d'une fissure	10
Figure 12 : Quantité de données disponibles	10
Figure 13 : Qualité des données dynamiques	11
Figure 14 : Qualité des données sismiques	11
Figure 15 : Exemple de données statiques	14
Figure 16 : vibration d'une fissure sans évolution	16
Figure 17 : Exemple de vibration d'une fissure évolution simple	17
Figure 18 : Exemple de vibration d'une fissure évolutions multiples	17
Figure 19 : Exemple de corrélation Valeur de l'extensomètre/ Température	19
Figure 20 : Exemple de données dynamiques	23
Figure 21 : Exemple d'analyse entre ouverture dynamique cumulée / ouverture statique	24
Figure 22 : Exemple de corrélation ouverture dynamique / PPV	27
Figure 23 : PPV susceptible de faire évoluer une fissure de 0.2 mm	31
Figure 24 : Comparaison de différentes réglementations sismiques pour des habitations	54
Figure 25 : Réglementation sismique moyenne pour des habitations courantes	54
Figure 26 : Graphique Fréquence, Vitesse Particulaire, Accélération	56
Tableau 1 : Variation maximale des ouvertures statiques des fissures .....	14
Tableau 2 : Tiltmètres : valeurs max et évolutions.....	16
Tableau 3 : Variation maximale des ouvertures dynamiques des fissures .....	18
Tableau 4 : Corrélation (R) déplacement / Température .....	22
Tableau 5 : corrélation / ouverture statique / ouverture dynamique cumulée .....	26
Tableau 6 : corrélation ouverture dynamique / PPV .....	30
Tableau 7 : PPV susceptible de faire évoluer une fissure de 0.2 mm.....	31

## I. Résumé

La société MCM a instrumenté depuis 2 ans 4 maisons témoins dans la ville de Malartic afin d'étudier l'impact des tirs de mines sur les désordres structuraux des habitations. MCM et le CSVM ont mandaté le groupement ProtekRoc/TBT pour analyser ces données.

L'instrumentation mise en place se compose de fissuromètres associés à des jauges de température, des tilt-mètres ainsi que des capteurs sismiques.

Le groupement ProTekRoc / TBT a analysé l'ensemble des données recueillies ainsi que la structure des bâtiments instrumentés et a obtenu les principales conclusions suivantes :

Les mouvements des fissures mesurés au cours des 21 mois passés, sont dans 77% des cas directement liés aux cycles climatiques et à la dilation thermique du bâtiment. L'amplitude de ces mouvements reste cependant faible (de l'ordre du dixième de millimètre) pour la majeure partie des fissures pour atteindre 1.4 millimètres pour quelques fissures.

Les vibrations des sautages font évoluer dynamiquement et élastiquement les fissures d'une valeur extrêmement faible (1/1000 à 1/100 de millimètre). L'ouverture dans le domaine élastique se résorbe rapidement et les fissures reprennent leurs ouvertures initiales. L'ouverture dynamique de la fissure est proportionnelle au niveau de vibration et reste cependant trop faible pour faire évoluer celle-ci durablement.

Une extrapolation de ces relations de proportionnalité permet de donner un ordre de grandeur probabiliste du niveau de vibration qui serait susceptible de faire évoluer dynamiquement une fissure d'une valeur de 0.2 millimètre, à savoir des vibrations de l'ordre de 90 mm/s.

Les principaux désordres répertoriés sur les structures peuvent s'expliquer principalement par une altération de l'assise des fondations suite aux infiltrations des eaux non drainées, aggravée par les cycles gel/dégel. Les désordres d'ordre cosmétique, principalement sur les revêtements de type plâtre, sont des conséquences du mouvement des fondations.

**L'ensemble de ces éléments n'a pas permis de mettre en évidence une évolution significative et permanente d'une fissure existante d'un élément structural, due aux vibrations d'un tir de mines.**

Avec l'expérience de cette première phase, une instrumentation repositionnée avec des paramètres ajustés, permettrait peut-être d'appréhender le comportement dynamique en fatigue des fissures et d'expliquer le comportement non totalement linéaire de 23% des données statiques.

## II. Avant-propos

En 2014, Mine Canadian Malartic a fait l'acquisition de plusieurs instruments afin de faire un suivi de l'impact du sautage sur les structures et la population. Quatre maisons dites témoins, ont été ciblées et instrumentées afin de faire une analyse des effets du sautage sur les structures de la ville.

Le groupement d'entreprise ProTekRoc / TBT a été mandaté pour analyser ces données. Le présent rapport fait état de l'analyse des données fournies et des résultats associés.

## III. Les données enregistrées

Les bâtiments instrumentés comportent cinq types d'instrumentations :

- Des mesures statiques d'ouverture de fissures
- Des mesures dynamiques d'ouverture de fissures
- Des mesures d'inclinaison du bâtiment
- Des mesures sismiques
- Des mesures de température

### A. Les mesures statiques d'ouverture des fissures

Les données statiques représentent la mesure de l'ouverture des fissures à intervalle de temps régulier. Selon les capteurs la mesure s'effectue toutes les 2 heures (12 fois par jour) ou toutes les 12 heures (2 fois par jour).

La photo ci-dessous illustre un capteur de type « extensomètre » qui mesure l'écartement ou l'ouverture de la fissure.



Figure 1 : Extensomètre

Le graphique ci-dessous illustre le principe de mesure de l'ouverture d'une fissure par l'extensomètre.

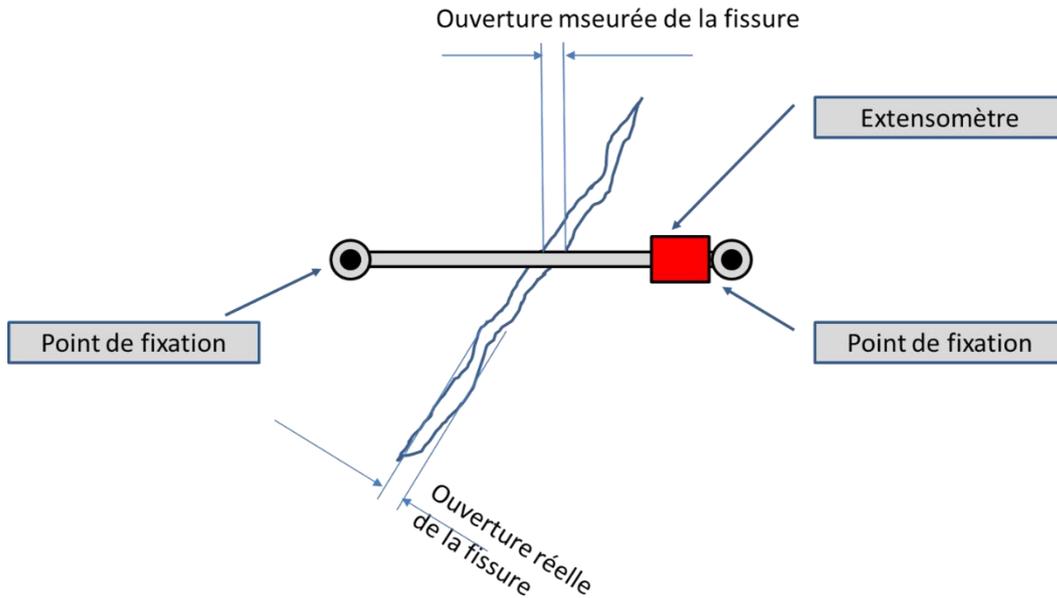


Figure 2 : Principe de mesure de l'ouverture d'une fissure

Le graphique ci-dessous illustre les déplacements d'un extensomètre de la maison #1 en fonction du temps.

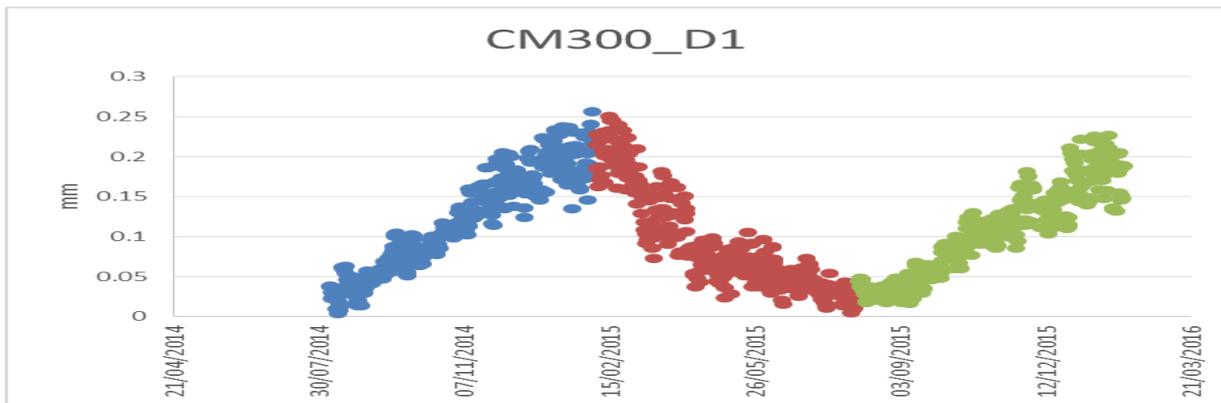


Figure 3 : Exemple dévolution de l'ouverture d'une fissure

### B. Les mesures dynamiques d'ouverture des fissures

Les données dynamiques représentent l'évolution de l'ouverture de la fissure dans un laps de temps court (30 secondes). La mesure, effectuée 100 fois par seconde, sur un extensomètre est déclenchée par l'enregistrement des capteurs sismiques.

Le graphique ci-dessous illustre une mesure dynamique de l'ouverture d'une fissure au cours du temps.

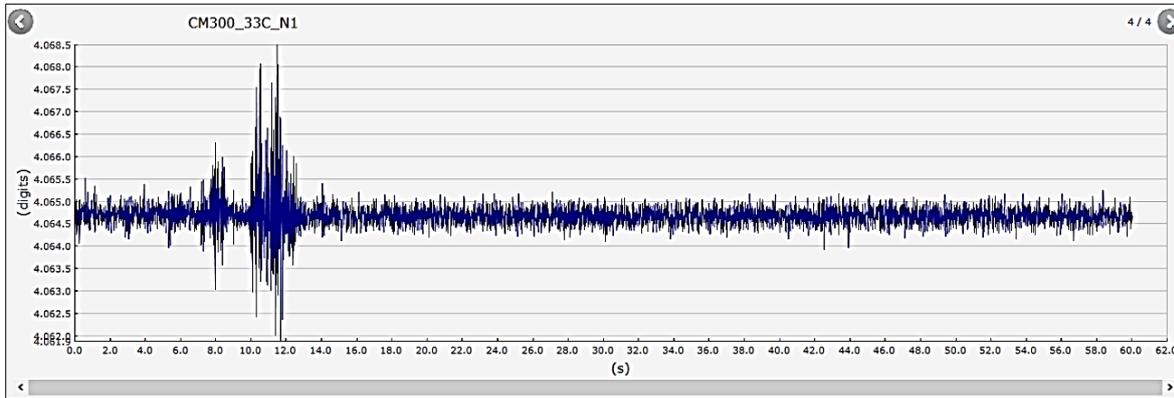


Figure 4 : Exemple d'une évolution dynamique d'une fissure sans effet

On notera que l'ouverture de la fissure vibre au rythme des vibrations du sol (voir Figure 7) et qu'après le tir l'ouverture reprend sa valeur initiale.

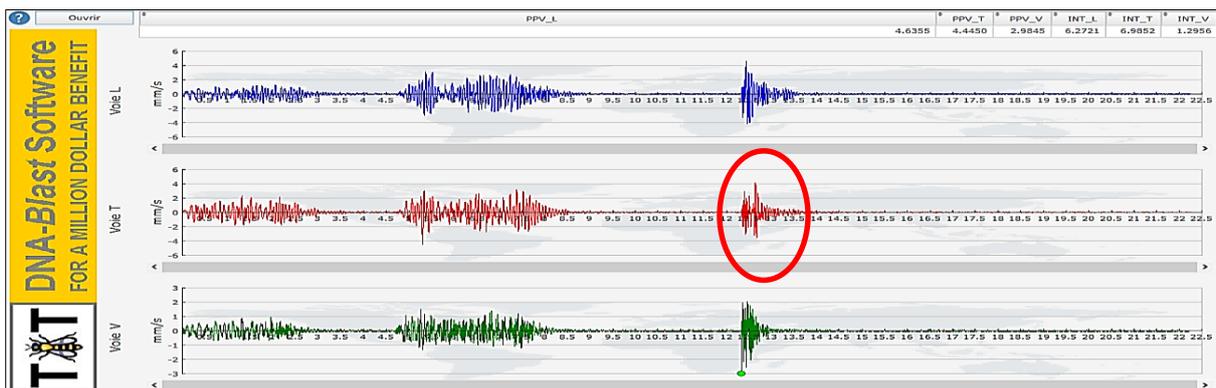


Figure 5 : enregistrement des vibrations associées aux mesures d'un extensomètre

### C. Les mesures d'inclinaison des bâtiments

L'inclinaison de certains bâtiments est mesurée à l'aide d'un tilt-mètre. Cet appareil mesure la variation d'angle de la structure par rapport à la verticale.



Figure 6 : Détail d'un Tilt-mètre

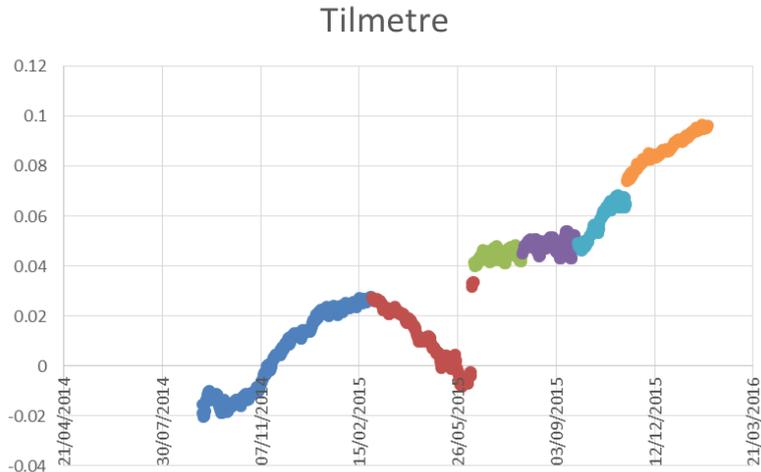


Figure 7 : Exemple de mesure d'angle au Tilt-mètre

On notera les valeurs extrêmement faible (<0.1 °) mesurées

**D. Les données sismiques**

Des capteurs sismiques sont installés dans chaque habitation (à l'extérieur dans le sol, sur les fondations, sur certains murs). Ils permettent de mesurer les niveaux sismiques des ondes émises par les tirs de mines.



Figure 8 : Capteur de vibration installé sur un mur porteur de l'habitation #1

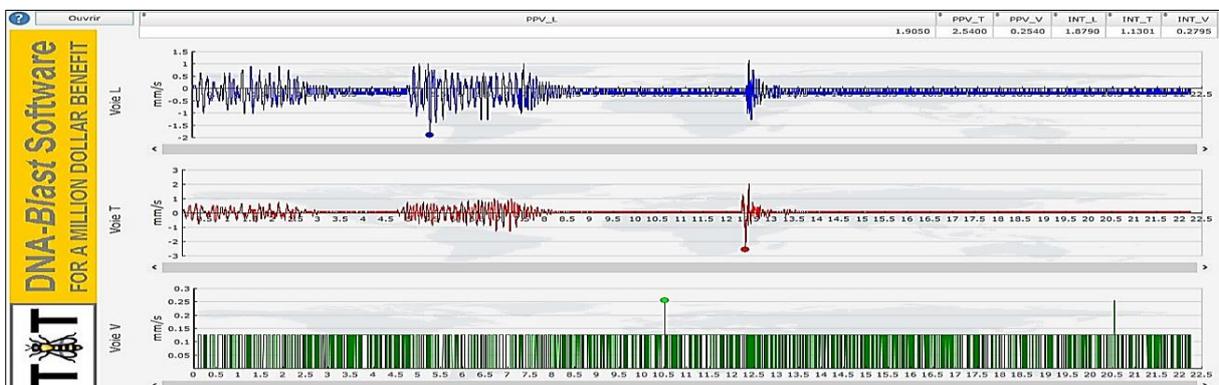


Figure 2 : Exemple d'enregistrement sismique

Dans cette étude, pour l'analyse de l'évolution des fissures structurelles, seuls les capteurs installés dans le sol ou directement sur les fondations ou une structure porteuse des bâtiments ont été pris en compte D'autres capteurs sismiques sont

installés sur les revêtements de placage ou d’habillage au sein des habitations. Ils ont été installés, à priori, pour évaluer le ressenti des tirs de mines par les riverains. Leur utilisation pour l’étude du comportement structurel des habitations est quasiment impossible du fait qu’ils se mettent à vibrer selon les modes propres des panneaux de placage et que leurs amplitudes ne traduisent pas forcément l’amplitude des vibrations des structures porteuses.

L’exemple ci-dessous (figure 9) montre le signal sismique mesuré dans le sol à l’angle d’une habitation. Le niveau de vibration au niveau des fondations est de 0.57 mm/s. Mesuré sur un capteur placé sur un revêtement de placage de la même habitation, le niveau atteint 1.7 mm/s et on note les oscillations au rythme des modes propres de la cloison (cercle rouge).

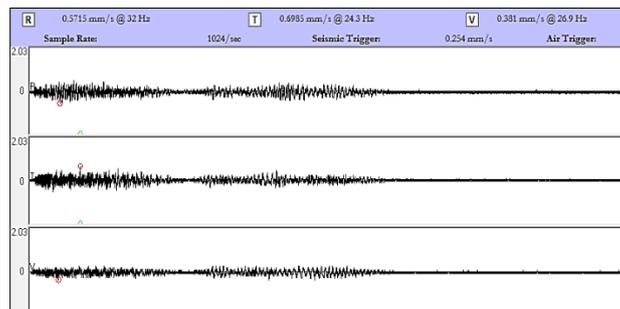


Figure 9 : Vibrations mesurées dans le sol

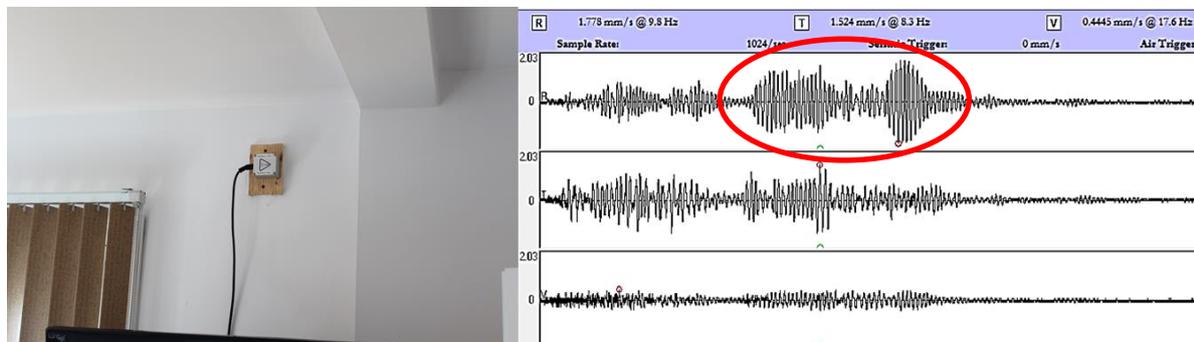


Figure 10 : Vibrations mesurées sur un revêtement en placage

### E. La température

Chaque extensomètre est équipé d’un capteur de température qui mesure la température ambiante au moment de la mesure de l’ouverture de la fissure. Le graphique ci-dessous illustre la variation de température mesurée au droit d’un extensomètre de la maison #1.

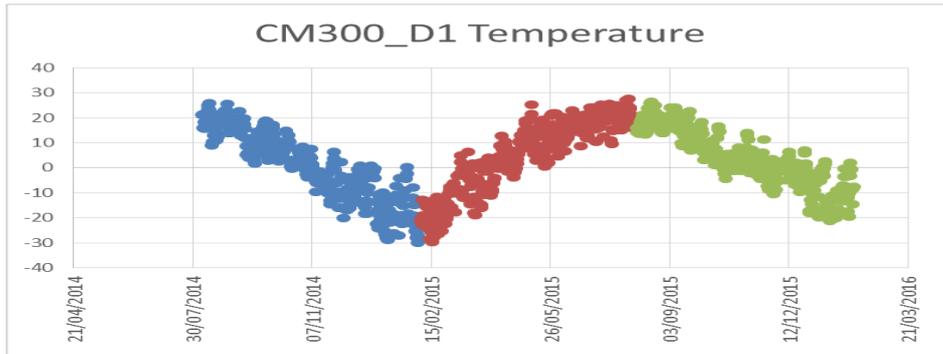


Figure 11 : évolution de la température au droit d'une fissure

On note la grande plage d'évolution des températures de -30°C à +30°C.

**F. Quantité et qualité des données**

Le graphique figure 12 récapitule des données disponibles au cours de la période de Mai 2014 à Février 2016.

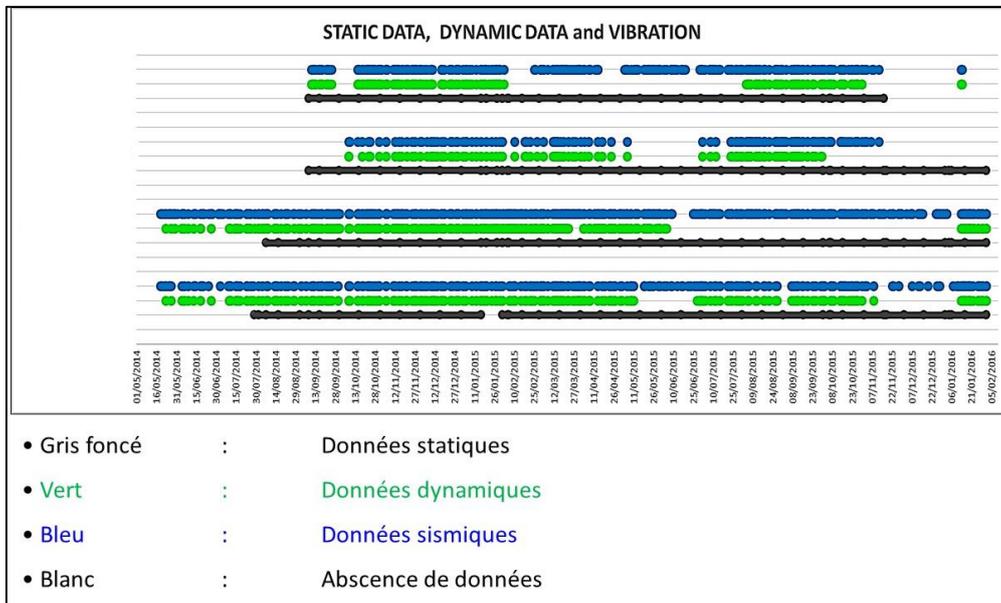


Figure 12 : Quantité de données disponibles

Les données disponibles ont été analysées quant à leur qualité.

Pour les données dynamiques certains enregistrements (en rouge) ne possèdent pas un taux d'échantillonnage satisfaisant pour être exploitable, elles ne seront pas prises en compte dans l'analyse.

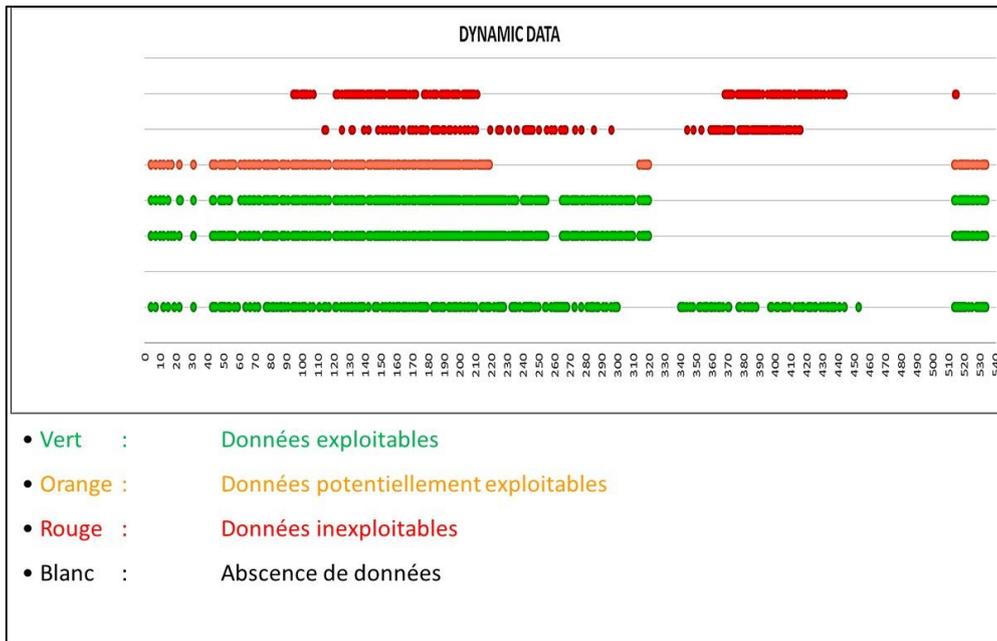


Figure 13 : Qualité des données dynamiques

Quant aux données sismiques, seuls les géophones installés dans le sol ou sur les fondations seront pris en compte dans l’analyse. Ceux montés sur des supports bois sur des cloisons d’habillage non structurale ne sont pas utilisables en tant que tels pour l’analyse des désordres structuraux car ils mesurent les vibrations libres des cloisons (voir exemple figure 10)

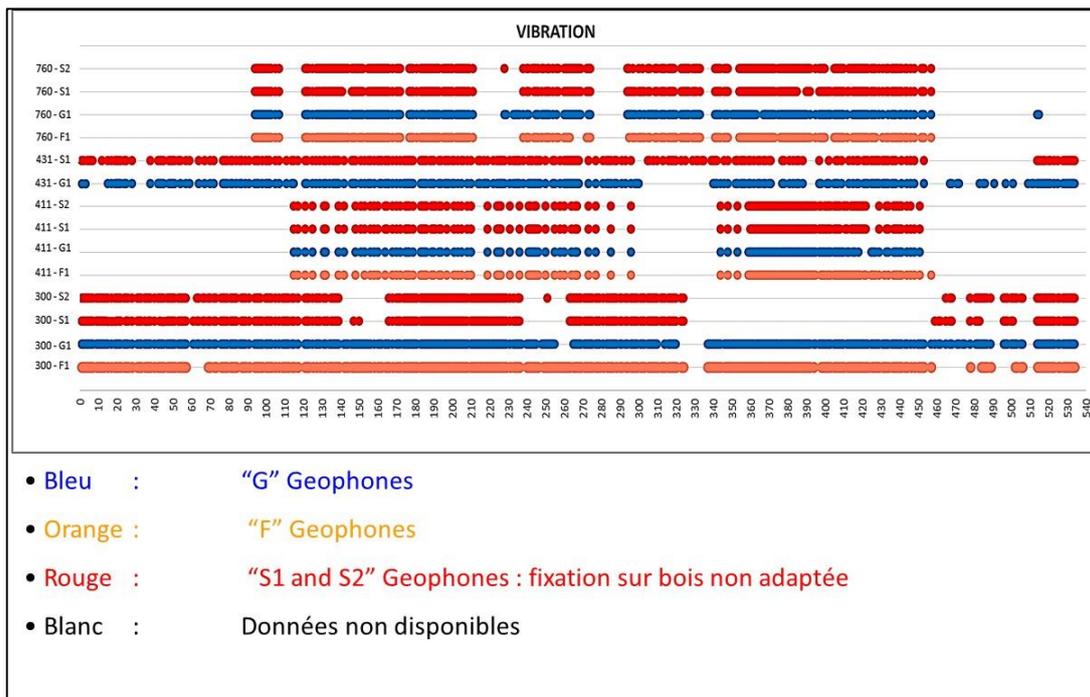


Figure 14 : Qualité des données sismiques

### G. Conclusion relative au système d'instrumentation

Le système d'instrumentation mis en place est relativement complet quant à la surveillance des fissures existantes. Cependant on peut remarquer qu'il existe des périodes de non acquisition de données ainsi que des données non exploitables.

D'autre part certains capteurs pourraient être repositionnés afin d'obtenir une information plus pertinente<sup>1</sup>.

- Extensomètres montés perpendiculairement à l'ouverture de la fissure
- Extensomètres en extérieur des bâtiments protégés du gel et des intempéries
- Paramétrage uniformisé de l'acquisition dynamique des extensomètres
- Capteurs sismiques montés à côté des extensomètres
- Capteurs de température à l'intérieur des murs extérieurs

---

<sup>1</sup> Pour plus détails, se reporter à l'annexe D

## IV. Analyse des données exploitables

### A. Quelques notions sur les fissures du béton

Le béton seul est un matériau très cassant lorsque soumis à un effort de traction. Cette fragilité du béton s'exprime par l'apparition quasi systématique de fissures dans la vie de l'ouvrage dès qu'il sera soumis à la plus minime des contraintes de traction ou de flexion.

Les causes de la fissuration du béton sont multiples mais sont principalement causées par des réactions physico-chimiques. Les conditions climatiques sont toutes aussi importantes. Si la température est trop basse, le béton risque alors de geler et de devenir beaucoup plus cassant, d'où l'apparition de fissures dans les bétons soumis à des cycles gel/dégel : l'eau pénètre dans le réseau de fissures et de pores du béton. Lors du gel, cette eau gonfle et va alors faire éclater localement le béton. Les sels de déverglaçage ont alors un chemin pour corroder les aciers.

Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de définition universelle au sujet de l'ouverture des microfissures, mais une limite supérieure de 0,1mm a été suggérée, ce qui correspond en fait à la dimension minimale pouvant être détectée à l'œil nu.

### B. Les données statiques

#### 1. LES EXTENSOMETRES

Ces données représentent la base de cette étude. Elles traduisent le comportement au cours du temps des fissures existantes. Le tableau ci-dessous donne pour chaque fissure instrumentée, la plage de variation maximale au cours de 21 mois de mesure. On notera les faibles voire très faibles amplitudes mesurées pour les maisons #3 et #4 et des amplitudes significatives pour les fondations des maisons #1 et #2.

Maison	Capteur	Variation maximale	Commentaire
#1	CM300_H2	0.996 mm	Significatif
#1	CM300_33D4	0.951 mm	Significatif
#1	CM300_26C1	0.620 mm	Significatif
#1	CM300_33B2	0.978 mm	Significatif
#1	CM300_33A3	0.178 mm	Faible
#1	CM300_D1	0.253 mm	Faible
#1	CM300_J2	0.308 mm	Faible
#1	CM300_33C1	0.246 mm	Faible
#1	CM300_33C_N1	0.037 mm	Très faible
Maison	Capteur	Variation maximale	Commentaire
#2	CM431_I4	1.497 mm	Significatif
#2	CM431_I2	0.863 mm	Faible

Maison	Capteur	Variation maximale	Commentaire
#2	CM431_I_N1	0.099 mm	Très faible
#2	CM431_I15	0.329 mm	Faible
Maison	Capteur	Variation	Commentaire
#3	LVDT_EXT	0.254 mm	Faible
#3	CV_EXT	0.572 mm	Faible
#3	LVDT_SB_SS	0.393 mm	Faible
#3	LVDT_NUL_SB_SS	0.127 mm	Faible
#3	LVDT_CENTRE_RDC	0.158 mm	Faible
Maison	Capteur	Variation	Commentaire
#4	LVDT_VS	0.164 mm	Faible
#4	CV_VS	0.372 mm	Faible
#4	LVDT_H_EXT	0.227 mm	Faible
#4	LVDT_V_EXT	0.088 mm	Très faible
#4	LVDT_RDC_CH	0.082 mm	Très faible
#4	LVDT_ETAGE_CH	0.375 mm	Faible
#4	LVDT_NUL_ETAGE	0.005 mm	Très faible

Tableau 1 : Variation maximale des ouvertures statiques des fissures

Dans l'exemple figure 15, on notera que l'ouverture de la fissure évolue de quasiment 0 millimètre à 2.5/10 de millimètre en fonction des saisons. En juillet 2015 l'ouverture de la fissure est revenue à quasiment zéro comme en Juillet 2014 après être passé par un maximum en janvier 2014.

Sur le graphique figure 15 on notera qu'en plus de l'évolution liée aux saisons, il existe une évolution de l'ouverture de la fissure liée au cycle nuit / jour.

Evolution de l'ouverture en fonction du cycle nuit / jour

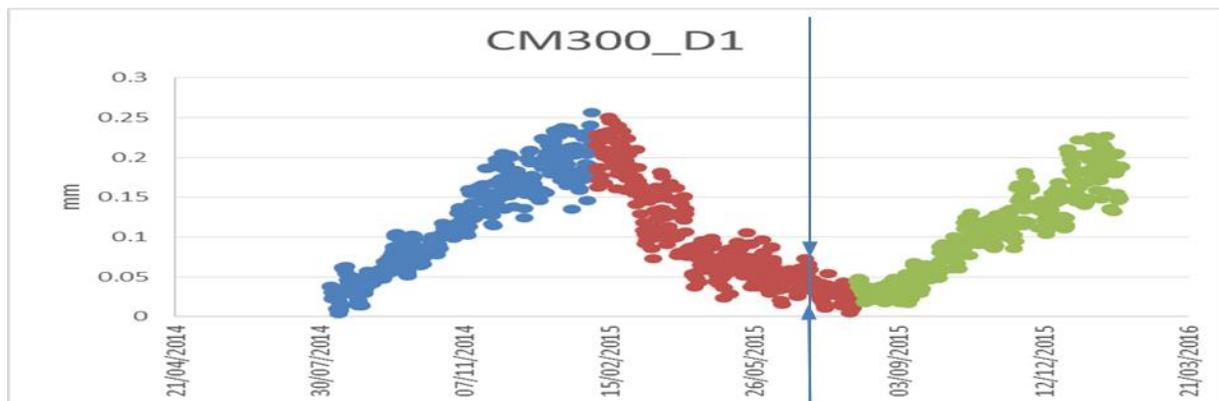
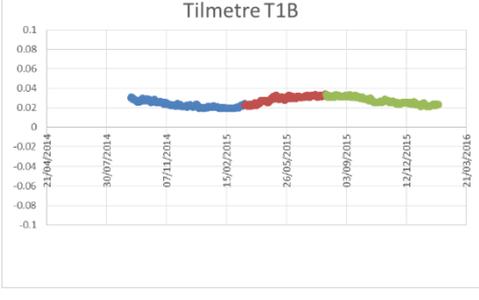
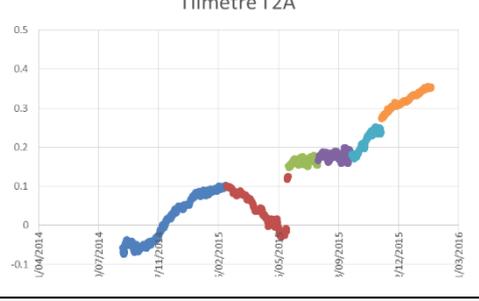
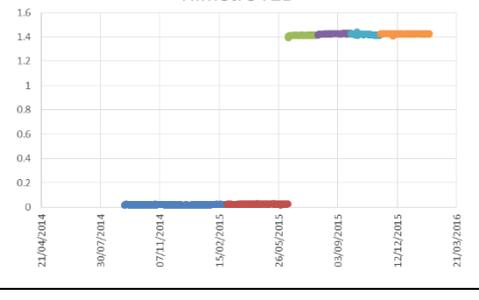


Figure 15 : Exemple de données statiques

Ce type de comportement est visible sur tous les extensomètres installés dans toutes les habitations et traduit le comportement de la fissure en fonction des conditions climatiques et en particulier de la température.

**2. LES TILTMETRES**

L'analyse des données des tiltmètres n'a pas permis de tirer de conclusion. Les variations sont extrêmement faibles, de l'ordre du dixième de degré, sauf pour le TS300\_T2B qui a visiblement reçu un choc au cours de la période de mesure. Elles sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Maison	Capteur	Angle maximal	Variation
#1	TS300_T1A	0.030322 °	
#1	TS300_T1B	0.034298 °	
#1	TS300_T2A	0.355927 °	
#1	TS300_T2B	1.441070 °	

Maison	Capteur	Angle maximal	Variation
#1	TS300_T3A	0.231266 °	
#1	TS300_T3B	0.412530 °	

Tableau 2 : Tiltmètres : valeurs max et évolutions

### C. Les données dynamiques

On peut distinguer deux cas de figure lors de l'analyse des données dynamiques des extensomètres.

#### 1. MOUVEMENT OSCILLATOIRE DE LA FISSURE AUTOUR DE SA VALEUR MOYENNE SANS EVOLUTION VISIBLE

C'est le cas de l'enregistrement ci-dessous (figure 16). La vibration du tir de mines fait uniquement vibrer la fissure et son ouverture moyenne (ligne rouge) n'évolue pas au cours du temps. Les vibrations de ce tir de mines n'ont aucune influence sur la fissure.

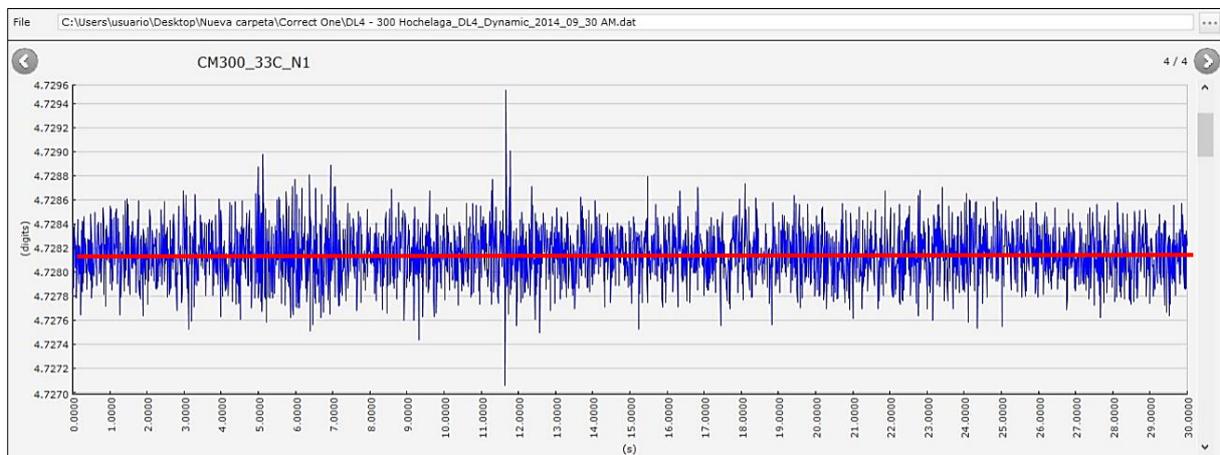


Figure 16 : vibration d'une fissure sans évolution

#### 2. MOUVEMENT OSCILLATOIRE DE LA FISSURE AVEC EVOLUTION VISIBLE

Dans certains cas (figure 17) pendant la vibration du tir, l'ouverture moyenne de la fissure change de valeur. On notera que le saut, bien que nettement visible sur le graphique, représente une variation de 5 microns (millième de millimètres). De plus

cette ouverture va se résorber au fil du temps (pente décroissante en rouge pointillé sur la figure 17) pour revenir à sa valeur initiale que l'on retrouvera dans les valeurs statiques.

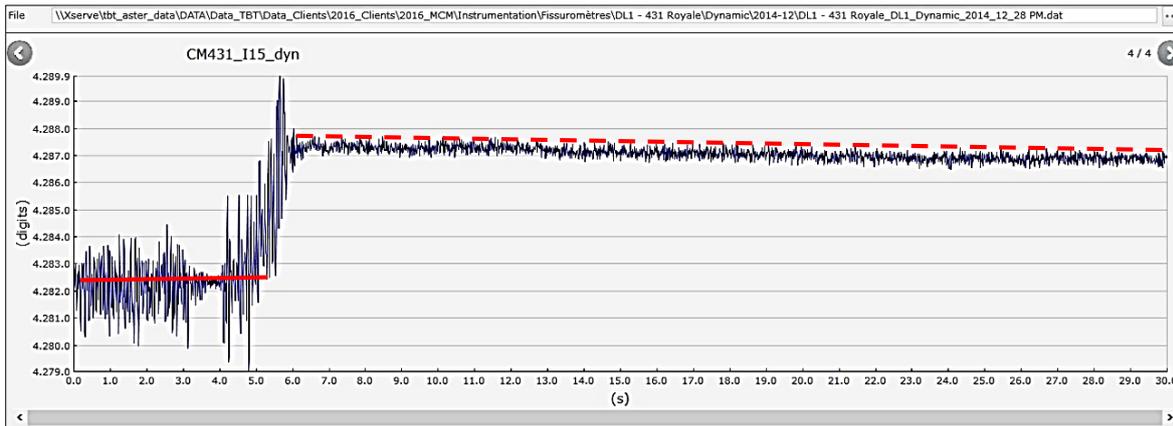


Figure 17 : Exemple de vibration d'une fissure évolution simple

Dans l'exemple ci-dessous (figure 18), on notera plusieurs évolutions successives de la valeur moyenne de l'ouverture, les sauts sont dus à plusieurs tirs de mines effectués à la suite. De la même manière que sur la figure 17, l'évolution de l'ouverture de la fissure est de 6 microns (millièmes de millimètres), ce qui est insignifiant.

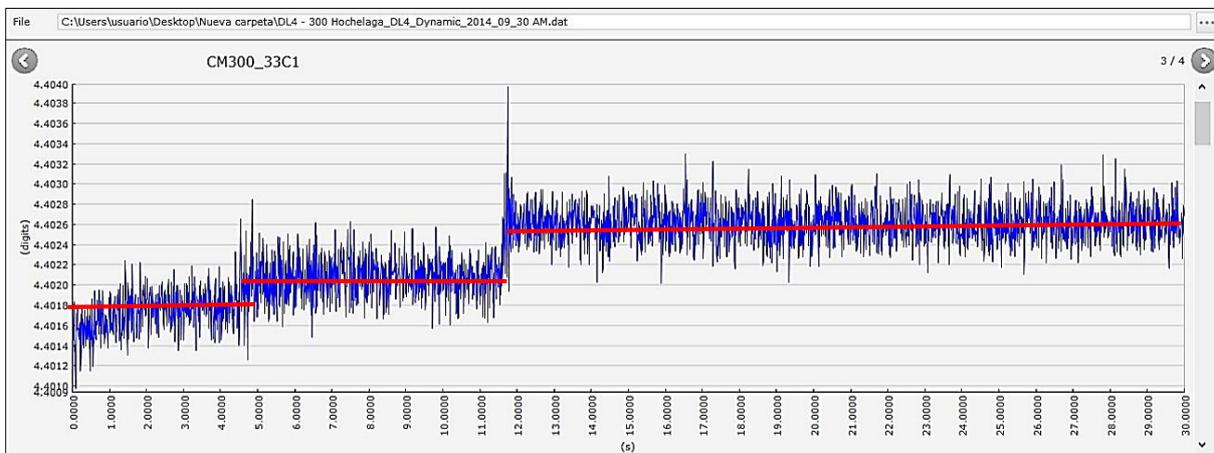


Figure 18 : Exemple de vibration d'une fissure évolutions multiples

Le tableau ci-dessous récapitule les évolutions dynamiques maximales mesurées sur les maisons #1 et #2, les données n'étant pas exploitables pour les maisons #3 et #4 (voir l'explication au §III-F). On notera que toutes les valeurs sont de l'ordre de grandeur du micron (millième de millimètre), excepté une valeur en centième de millimètres. Dans tous les cas, ces évolutions de l'ouverture des fissures sous sollicitations sismiques sont négligeables devant les variations dues aux effets thermiques des saisons ou des cycles nuit/jour.

Maison	Capteur	Variation maximale	Commentaire
#1	CM300_H2	0.005 mm	Insignifiant

Maison	Capteur	Variation maximale	Commentaire
#1	CM300_33D4	0.002 mm	Insignifiant
#1	CM300_26C1	0.003 mm	Insignifiant
#1	CM300_33B2	0.003 mm	Insignifiant
#1	CM300_33A3	0.002 mm	Insignifiant
#1	CM300_D1	0.033 mm	Très faible
#1	CM300_J2	0.009 mm	Insignifiant
#1	CM300_33C1	0.001 mm	Insignifiant
#1	CM300_33C_N1	0.0005 mm	Insignifiant
Maison	Capteur	Variation	Commentaire
#2	CM431_I4	0.001 mm	Insignifiant
#2	CM431_I2	0.005 mm	Insignifiant
#2	CM431_I_N1	0.004 mm	Insignifiant
#2	CM431_I15	0.008 mm	Insignifiant

Tableau 3 : Variation maximale des ouvertures dynamiques des fissures

## D. Les corrélations

### 1. PRINCIPE

La recherche d'une corrélation consiste à afficher la valeur d'un paramètre en fonction de l'autre pour voir s'il existe une relation entre les deux.

L'exemple ci-dessous illustre la corrélation entre l'ouverture d'une fissure et la température ambiante au voisinage de celle-ci. On notera que sur le graphique Valeur de l'extensomètre / Température, les points sont alignés ce qui signifie qu'il existe une relation linéaire entre les deux paramètres. L'ouverture de la fissure est donc directement proportionnelle à la température.

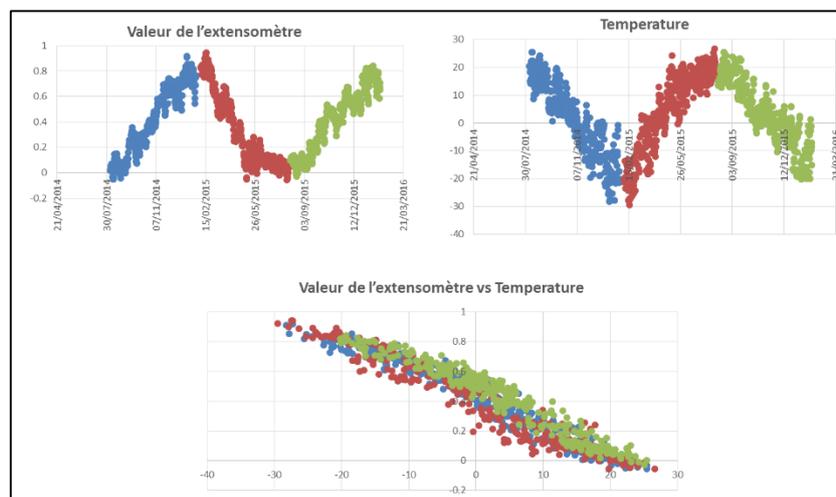


Figure 19 : Exemple de corrélation Valeur de l'extensomètre/ Température

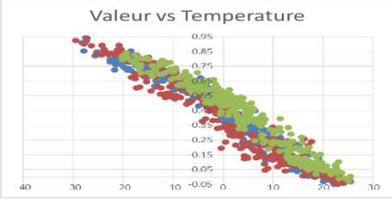
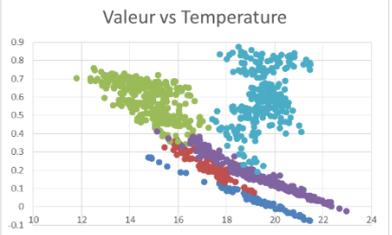
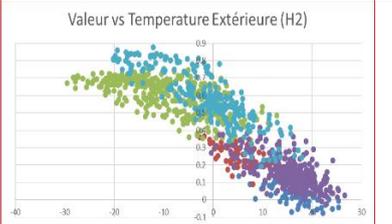
**2. RESULTATS DE CORRELATIONS**

De nombreuses corrélations ont été testées et les principaux résultats sont les suivants :

**a) CORRELATION : VALEUR DE L'EXTENSOMETRE / TEMPERATURE**

Comme expliqué ci-dessus la corrélation du déplacement de l'ouverture de la fissure avec la température est la principale corrélation obtenue. Une corrélation linéaire est constatée dans 77% des cas (voir le tableau 3 ci-dessous). Dans 23% des cas, elle est quasi linéaire et présente une anomalie de linéarité qui, compte tenu des valeurs absolues de déplacement extrêmement faibles (quelques dixièmes de millimètres), pourrait provenir soit :

- D'une prise en compte erronée de la température due à la mesure uniquement d'un côté du mur (dont l'épaisseur non nulle induit une inertie thermique)
- D'une dérive de la mesure : pour les capteurs extérieurs non protégés des intempéries (gel, vent) ; pour les capteurs intérieurs, montée brusque de la température
- D'une réelle évolution de la fissure

Maison	Capteur	Corrélation	Commentaire
#1	CM300_H2		Parfaitement linéaire  (R=0.92)
#1	CM300_33D4		Quasi linéaire avec une anomalie due à la température intérieure de la pièce
	CM300_33D4		Linéaire en prenant la température extérieure du mur  (R=0.78)

Maison	Capteur	Corrélation	Commentaire
#1	CM300_26C1		<p>Linéaire</p> <p>(R=0.91)</p>
#1	CM300_33B2		<p>Quasi linéaire avec une anomalie certainement due à la température intérieure de la pièce</p>
#1	CM300_33B2		<p>Quasi Linéaire en prenant la température extérieure au mur</p> <p>(R=0.89)</p>
#1	CM300_33A3		<p>Parfaitement linéaire</p> <p>(R=0.77)</p>
#1	CM300_D1		<p>Parfaitement linéaire</p> <p>(R=0.91)</p>
#1	CM300_J2		<p>Parfaitement linéaire</p> <p>(R=0.80)</p>
#1	CM300_33C1		<p>Linéaire</p> <p>(R=0.58)</p>

Maison	Capteur	Corrélation	Commentaire
#1	CM300_33C_N1		Parfaitement linéaire, capteur de référence sans fissure  (R=0.98)
#2	CM431_I4		Parfaitement linéaire  (R=0.96)
#2	CM431_I2		Linéaire  (R=0.82)
#2	CM431_I_N1		Parfaitement linéaire  (R=0.94)
#2	CM431_I15		Linéaire  (R=0.66)
Maison	Capteur	Corrélation	Commentaire
#3	LVDT_EXT		Linéaire avec dérive  (R <sup>2</sup> =0.)
#3	CV_EXT		Linéaire avec dérive
#3	LVDT_SB_SS	Pas de température disponible	

Maison	Capteur	Corrélation	Commentaire
Maison	Capteur	Corrélation	Commentaire
#4	LVDT_VS		Parfaitement linéaire  (R=0.86)
#4	CV_VS		Quasi linéaire  (R=0.87)
#4	LVDT_H_EXT	Pas de température disponible	
#4	LVDT_V_EXT	Pas de température disponible	
#4	LVDT_RDC_CH	Pas de température disponible	
#4	LVDT_ETAGE_CH	Pas de température disponible	
#4	LVDT_NUL_ETAGE	Pas de température disponible	

Tableau 4 : Corrélation (R) déplacement / Température

**b) CORRELATION : OUVERTURE DYNAMIQUE / OUVERTURE STATIQUE ET TEMPERATURE**

Cette phase a consisté à regarder s’il existait un lien entre le mouvement dynamique de la fissure lors d’un tir de mines et l’ouverture statique de celle-ci, différente de l’ouverture résultant de la température.

La première étape a consisté à analyser toutes les mesures dynamiques et à en mesurer la principale caractéristique, à savoir l’écart d’ouverture mesuré entre avant le tir de mines et après le tir de mines. La figure 20 illustre des données dynamiques issues d’un extensomètre, analysées automatiquement par un logiciel développé pour la circonstance.

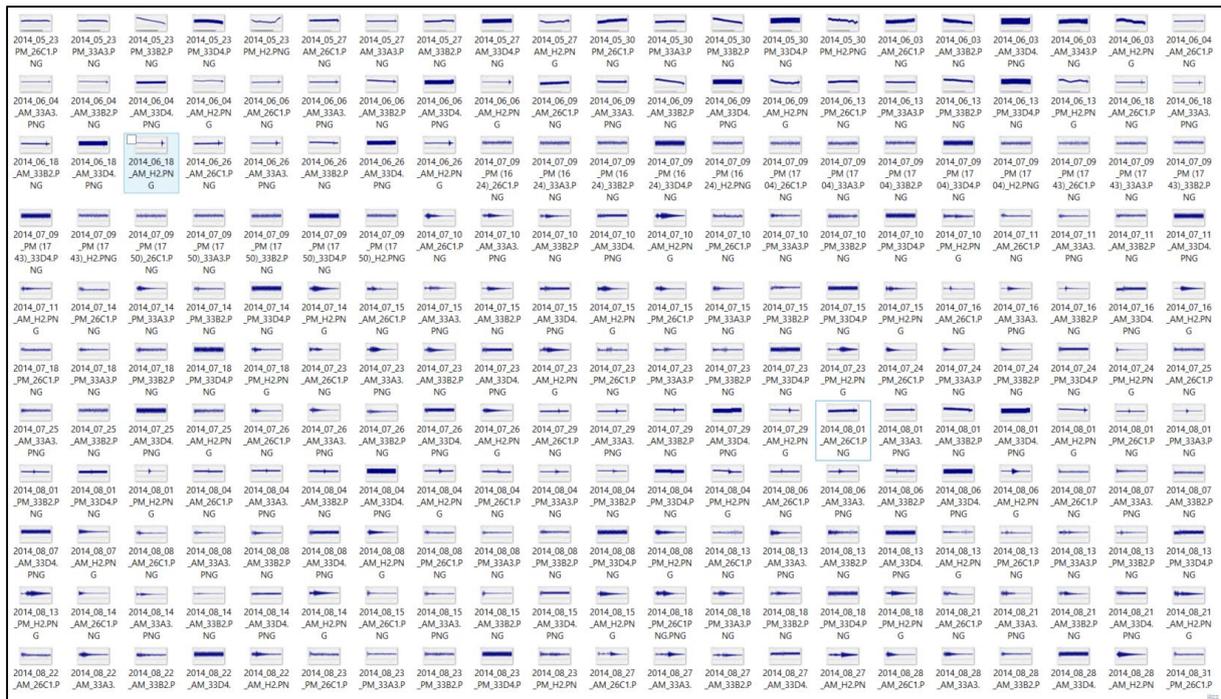


Figure 20 : Exemple de données dynamiques

Comme les ouvertures dynamiques de fissures se résorbent au bout de quelques minutes, l'étape suivante a consisté à comparer l'évolution cumulée de l'ouverture dynamique de la fissure aux données statiques compensées de la température (voir §2-a) afin de vérifier si une accumulation d'énergie pouvait être associée à une anomalie d'évolution statique.

Dans l'exemple ci-dessous (figure 21) il y a 3 graphiques. Celui du haut représente l'ouverture statique de la fissure en fonction du temps. Une couleur arbitraire a été attribuée en fonction des cycles visibles d'ouverture (montée) ou de fermeture (descente) de la fissure.

Le deuxième graphique illustre la corrélation de l'ouverture de la fissure avec la température, qui est parfaitement linéaire, c'est-à-dire que la fissure se dilate et se contracte uniquement en fonction des variations de température. Les couleurs du graphique précédent sont reportées sur les points en fonctions des dates. On notera qu'il n'y a aucune anomalie visible.

Le troisième graphique illustre l'ouverture dynamique cumulée de la fissure en fonction du temps. Les mêmes couleurs sont reportées sur la graphique. On notera qu'il n'existe aucune corrélation entre les valeurs dynamiques cumulées et les valeurs statiques parfaitement linéaires.

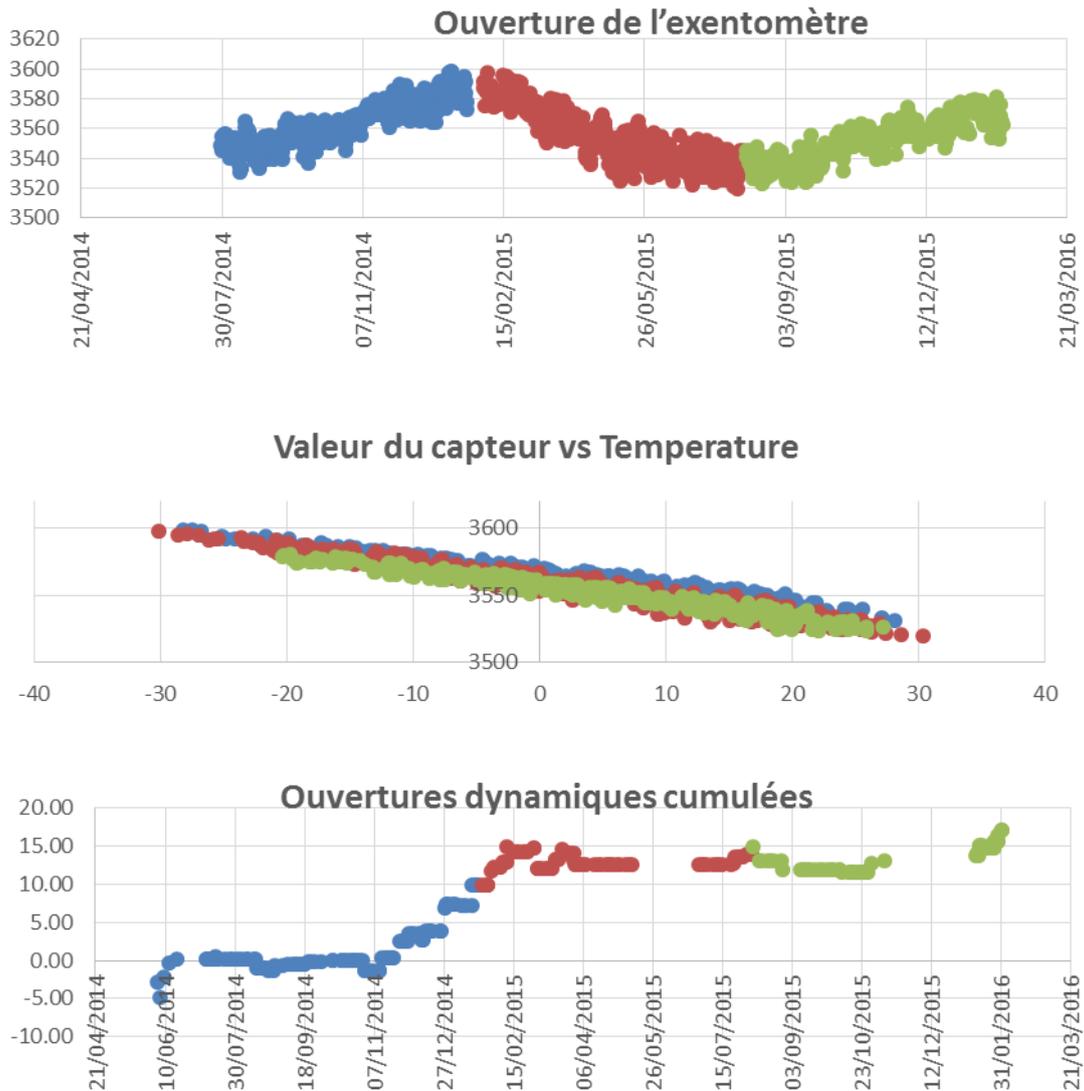


Figure 21 : Exemple d'analyse entre ouverture dynamique cumulée / ouverture statique

Dans le tableau 4 ci-dessous, on trouvera l'évolution des ouvertures dynamiques cumulées en face des corrélations ouvertures statiques / Températures. On notera que les valeurs absolues des ouvertures dynamiques sont seulement de quelques centièmes de millimètres ce qui est négligeable devant les ouvertures liées à la température et qu'il n'existe aucun lien visible entre les deux, ce qui conforte l'idée que le mouvement des fissures est principalement dû aux variations de température.

Maison	Capteur	Corrélation ouverture statique / Température	Ouverture dynamique cumulée
#1	CM300_H2		
	CM300_33D4		
#1	CM300_26C1		
#1	CM300_33B2		
#1	CM300_33A3		
#1	CM300_D1		

#1	CM300_J2		
#1	CM300_33C1		
#1	CM300_33C_N1		
<b>Maison</b>	<b>Capteur</b>	<b>Corrélation ouverture statique / Température</b>	<b>Ouverture dynamique cumulée</b>
#2	CM431_I4		
#2	CM431_I2		
#2	CM431_I_N1		
#2	CM431_I15		

Tableau 5 : corrélation / ouverture statique / ouverture dynamique cumulée

**c) CORRELATION : OUVERTURE DYNAMIQUE / NIVEAU DE VIBRATION**

Pour chaque extensomètre, en traçant un graphique dont l'axe horizontal représente le niveau de vibration (PPV) et l'axe vertical représente l'ouverture dynamique de la fissure en mm, on obtient un graphique de ce type :

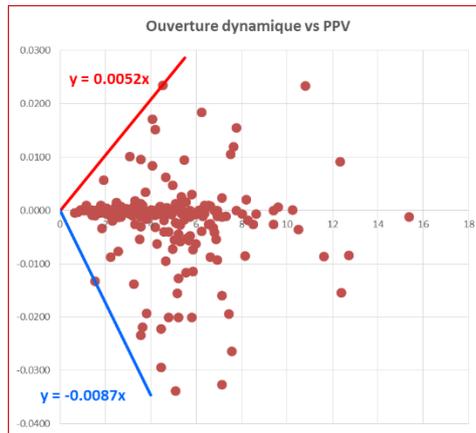


Figure 22 : Exemple de corrélation ouverture dynamique / PPV

Sur ce graphique on voit très nettement que l'ensemble des points se situe dans un cône décrivant la relation ouverture dynamique de la fissure en fonction du niveau de vibration. L'ouverture dynamique maximale croît avec le niveau de vibration.

La droite rouge représente la droite enveloppe (des valeurs positives) traduisant la relation : ouverture dynamique maximale de la fissure par rapport au PPV.

La droite bleue représente la droite enveloppe (des valeurs négatives) traduisant la relation : fermeture dynamique maximale de la fissure par rapport au PPV.

Dans le tableau ci-dessous on trouvera pour chaque fissure équipée d'un extensomètre à mesure dynamique la même analyse ainsi que l'équation de la droite enveloppe des mesures.

Maison	Capteur	Corrélation PPV/ ouverture Dynamique	Equation de la droite enveloppe
#1	CM300_H2		<p><b>Ouverture</b> <b>y = 0.0007x</b></p> <p>-----</p> <p><b>Fermeture</b> <b>y = -0.0005x</b></p>

Maison	Capteur	Corrélation PPV/ ouverture Dynamique	Equation de la droite enveloppe
#1	CM300_33D4		<p><b>Ouverture</b> <b>y = 0.0004x</b></p> <p>-----</p> <p><b>Fermeture</b> <b>y = -0.0003x</b></p>
#1	CM300_26C1		<p><b>Ouverture</b> <b>y = 0.0005x</b></p> <p>-----</p> <p><b>Fermeture</b> <b>y = -0.0005x</b></p>
#1	CM300_33B2		<p><b>Ouverture</b> <b>y = 0.0004x</b></p> <p>-----</p> <p><b>Fermeture</b> <b>y = -0.0006x</b></p>
#1	CM300_33A3		<p><b>Ouverture</b> <b>y = 0.0004x</b></p> <p>-----</p> <p><b>Fermeture</b> <b>y = -0.0005x</b></p>
#1	CM300_D1		<p><b>Ouverture</b> <b>y = 0.00052x</b></p> <p>-----</p> <p><b>Fermeture</b> <b>y = -0.00087x</b></p>

Maison	Capteur	Corrélation PPV/ ouverture Dynamique	Equation de la droite enveloppe
#1	CM300_J2		<b>Ouverture</b> $y = 0.0003x$ <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> <b>Fermeture</b> $y = -0.00018x$
#1	CM300_33C1		<b>Ouverture</b> $y = 0.0003x$ <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> <b>Fermeture</b> $y = -0.0003x$
#1	CM300_33C_N1		<b>Ouverture</b> $y = 0.0001x$ <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> <b>Fermeture</b> $y = -0.0001x$
Maison	Capteur	Corrélation PPV/ ouverture Dynamique	Equation de la droite enveloppe
#2	CM431_I4		<b>Ouverture</b> $y = 0.0006x$ <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> <b>Fermeture</b> $y = -0.0005x$
#2	CM431_I2		<b>Ouverture</b> $y = 0.0021x$ <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> <b>Fermeture</b> $y = -0.0037x$

Maison	Capteur	Corrélation PPV/ ouverture Dynamique	Equation de la droite enveloppe
#2	CM431_I_N1		<b>Ouverture</b> $y = 0.0026x$ <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> <b>Fermeture</b> $y = -0.0029x$
#2	CM431_I15		<b>Ouverture</b> $y = 0.0042x$ <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> <b>Fermeture</b> $y = -0.0039x$

Tableau 6 : corrélation ouverture dynamique / PPV

En prenant comme hypothèse que cette relation (ouverture dynamique de fissure / niveau de vibrations) continue d'être linéaire pour des valeurs supérieures du niveau de vibration, il est possible, pour chaque fissure d'extrapoler le niveau de vibration qui conduirait à une ouverture dynamique de 0.2 millimètre (0.2 de millimètre représentant une valeur moyenne couramment citée dans la littérature comme étant un seuil significatif d'évolution d'une fissure). Cette valeur est prise comme hypothèse d'un seuil faisant évoluer la fissure en dynamique hors du domaine élastique et de manière permanente.

**ATTENTION : ces valeurs non rien à voir avec le niveau de vibration susceptible de créer une nouvelle fissure dans un matériau sain. Pour ce faire il faudrait atteindre la limite à la rupture en traction ce qui pour un béton de résistance en compression moyenne de 40 Mpa et une densité de 2.4 se situe vers 4 000 mm/s.**

Maison	Capteur	Equation de la droite enveloppe	Valeur du PPV pour une ouverture de 0.2 mm
#1	CM300_H2	$y = 0.0007x$	274.4 mm/s
#1	CM300_33D4	$y = 0.0004x$	478.9 mm/s
#1	CM300_26C1	$y = 0.0005x$	399.2 mm/s
#1	CM300_33B2	$y = 0.0004x$	486.4 mm/s
#1	CM300_33A3	$y = 0.0004x$	492.2 mm/s
#1	CM300_D1	$y = 0.0052x$	38.4 mm/s
#1	CM300_J2	$y = 0.003x$	66.4 mm/s

Maison	Capteur	Equation de la droite enveloppe	Valeur du PPV pour une ouverture de 0.2 mm
#1	CM300_33C1	$y = 0.0003x$	<b>622.0 mm/s</b>
Maison	Capteur	Equation de la droite enveloppe	
#2	CM431_I4	$y = 0.0006x$	<b>317.6mm/s</b>
#2	CM431_I2	$y = 0.0021x$	<b>96.7 mm/s</b>
#2	CM431_I15	$y = 0.0042x$	<b>47.2 mm/s</b>

Tableau 7 : PPV susceptible de faire évoluer une fissure de 0.2 mm

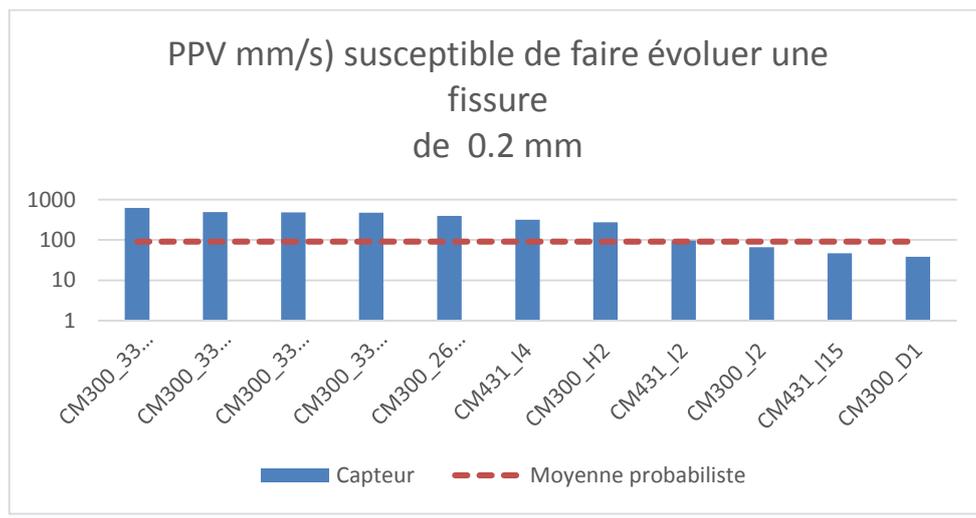


Figure 23 : PPV susceptible de faire évoluer une fissure de 0.2 mm

### E. Conclusion

Les principales évolutions des ouvertures de fissures sont liées aux variations de température. Le comportement linéaire, proportionnalité entre l'ouverture statique d'une fissure et la température, est clairement identifié dans 77% des cas avec des variations d'ouverture de quelques dixièmes de millimètres.

Pour les 23 % restants, le comportement est quasi-linéaire ou présente une linéarité avec une dérive dans le temps. En première analyse cela est certainement dû à une mauvaise localisation de la prise de température ou à une dérive du capteur.

L'analyse des ouvertures de fissure en dynamique (solicitations sismiques) montre que celles-ci évoluent avec des amplitudes extrêmement faibles (de quelques microns au centième de millimètre). L'ouverture se fait dans le domaine élastique et les fissures reprennent leurs ouvertures d'origines quelques minutes après les tirs.

Une extrapolation de ses ouvertures dynamiques permet de donner un ordre de grandeur probabiliste de 90 mm/s qui serait susceptible de faire évoluer l'ouverture de certaines fissures de 0.2 millimètres, valeur qui peut être considérée comme significative si elle est répétitive. **Cet ordre de grandeur est vraiment donné à titre indicatif et nécessiterait des investigations complémentaires basées sur une instrumentation modifiée et complétée pour en confirmer la valeur ainsi qu'une**

**zone témoin proche des tirs de mines et recevant des sollicitations sismiques élevées (> 50 mm/s).**

## **V. L'analyse structurelle des bâtiments**

### **A. Objectifs et Principe**

L'analyse structurelle d'un bâtiment consiste à comprendre son architecture, la manière dont elle est fondée, la méthode construction, les matériaux afin de déterminer le comportement mécanique des différents éléments.

Cette analyse s'effectue à partir des plans, des notes de calcul existantes, de différentes mesures, essais ou sondages in situ.

Pour cette étude, nous avons effectué une analyse structurelle « légère » avec un minimum d'investigations afin d'avoir une idée de l'origine des désordres existants et de leur évolutions possibles.

### **B. Résultats par habitation**

#### **1. MAISON #1**

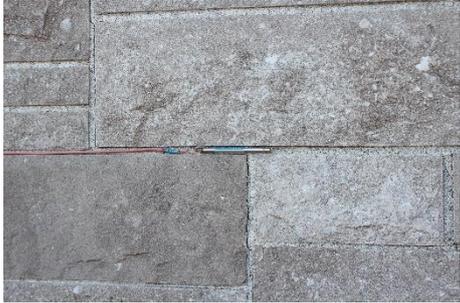
##### **a) DESCRIPTION STRUCTURELLE SOMMAIRE DE LA MAISON**

La maison est composée des éléments structurels suivants :

- Le sous-sol semi enterré est réalisé avec des voiles en béton de l'ordre de 20 à 25 cm d'épaisseur. Le type de fondation n'est pas connu mais semble être des semelles filantes superficielles. Un dallage est présent au niveau du sous-sol.
- Le plancher bas du Rez-de-Chaussée (RdC) est une structure bois revêtu d'un parquet ou d'un sol souple.
- Les murs dans la hauteur du RdC possèdent un parement pierre ou brique d'une épaisseur de l'ordre de 5 / 7 cm. La structure porteuse n'est pas connue (aucun sondage n'a été réalisé).
- La structure des combles et toitures n'est pas connue

## b) PRINCIPAUX POINTS RETENUS SUITE A L'INSPECTION

Zone	Description	Photos
Les eaux pluviales	<p>Il a été constaté que certaines descentes d'eaux pluviales ne sont pas raccordées à un drain et que les eaux se déversent en pied de façade.</p> <p>D'autres descentes sont raccordées à un drain mais il n'a pas pu être vérifié le fonctionnement global du drain périphérique (s'il existe).</p>	 <p><u>Pied de descente d'eaux pluviales non raccordé</u></p>
Les fissures façade Est	<p>Des fissures sont présentes au niveau des linteaux des ouvertures qui donnent sur le sous-sol. Ces fissures sont verticales, traversantes et à mi-portée.</p> <p>Il est à noter l'absence de prolongation de la fissure dans le parement brique.</p>	 <p><u>Exemple de fissure dans un linteau de la façade</u> <u>SUD</u></p>

Zone	Description	Photos
Façade OUEST	<p>Une fissure verticale est visible dans la partie haute du sous-sol. Cette fissure est traversante car visible au niveau du voile intérieur du sous-sol.</p>	 <p><i>Fissure visible depuis l'extérieur</i></p>
Façade NORD	<p>Au niveau de cette façade, 2 fissures sont visibles.</p> <p>Une fissuration en biais dans l'angle NORD/EST qui part depuis le sous-bassement en béton et remonte au niveau du parement pierre. La fissure suit préférentiellement les joints au niveau du parement.</p>	 <p><i>Localisation de la fissure visible</i></p>  <p><i>Détail de la fissure visible</i></p>
Façade NORD	<p>L'autre est située dans la hauteur du soubassement au niveau de l'entrée. Elle est la fissure présentant</p>	 <p><i>Détail de la fissure visible</i></p>

Zone	Description	Photos
	l'ouverture la plus importante.	 <p data-bbox="858 734 1331 763"><i>Sondage réalisé au niveau de la fissure</i></p>
Façade SUD	RAS	
Intérieur	Description	Photos
Rez-de-chaussée	L'intérieur présente une fissure visible au niveau de la porte d'entrée principale sur le doublage de la façade	
Sous-sol	Les fissures présentes sont verticales sur la quasi-totalité de la hauteur du soubassement en béton.	 <p data-bbox="863 1630 1321 1659"><i>Exemple de fissure visible au sous-sol</i></p>
Le béton	Des essais ont été réalisés à l'aide d'un scléromètre afin d'estimer la résistance en compression du béton.	

Zone	Description	Photos
	<p>La résistance moyenne obtenue sur les voiles périphériques est de 52 MPa.</p> <p>La résistance moyenne obtenue sur le voile de refend est de 55 MPa</p>	<p><u>Mesure de la résistance au scléromètre</u> <u>(chaque évaluation de la résistance se fait sur la base d'une cinquantaine de mesures)</u></p>
Les armatures	<p>Le voile de refend ne possède pas d'armature. Cela a été déduit du fait que l'ouverture dans ce voile, qui a été réalisée après la construction de la maison, ne laisse apparaître aucune armature.</p>	 <p><u>Linteau sans armature apparente après sciage</u></p>
	<p>Des détections d'armatures ont été effectuées sur les voiles périphériques. Il n'a été détecté aucune armature dans les voiles.</p>	 <p><u>Recherche d'armatures dans le béton</u></p>
Infiltrations	<p>En partie basse des voiles du sous-sol, il a été constaté la présence de traces d'infiltration d'eau et de calcite. Ces traces indiquent la présence d'eau à l'arrière des voiles périphériques de la façade</p>	 <p><u>Traces de calcite en partie basse du sous-bassement</u></p>

### c). CONCLUSIONS

L'ensemble des constatations effectuées sur site nous permet d'apporter les commentaires suivants :

- Le béton présente de bonnes caractéristiques mécaniques : de l'ordre de 50 MPa.
- Aucune armature n'a été détectée dans les voiles (périphériques et de refend).
- Les eaux pluviales ne sont pas drainées et l'écoulement des eaux de la toiture est déversé en pied de façade. Ceci est vérifié par la présence d'infiltration en partie basse du sous-sol.

Compte tenu de ces observations, l'hypothèse préférentielle de l'origine de ces désordres est un éventuel tassement des fondations du aux écoulements des eaux au niveau de l'assise de ces dernières. Les phénomènes observés sont aggravés par une superstructure avec un béton non armé.

## 2. MAISON #2

### a) DESCRIPTION STRUCTURELLE SOMMAIRE DE LA MAISON

La maison est composée des éléments structurels suivants :

- Le sous-sol semi enterré est réalisé avec des voiles en béton de l'ordre de 20 à 25 cm d'épaisseur. Le type de fondation n'est pas connu mais semble être des semelles filantes superficielles. Un dallage est présent au niveau du sous-sol complété de gradins en béton sur une façade. La hauteur des voiles du niveau sous-sol visible (environ 1m de hauteur) est revêtue d'un enduit au mortier.
- Le plancher bas du Rez-de-Chaussée est une structure bois revêtu d'un parquet ou d'un sol souple.
- Les murs dans la hauteur du Rez-de-Chaussée sont peints et sans parement. La structure porteuse n'est pas connue (aucun sondage n'a été réalisé).
- La structure des combles et toitures est composée de panes en bois supportant une couverture en pierres plates.

**b) PRINCIPAUX POINTS RETENUS SUITE A L'INSPECTION**

Zone	Description	Photos
<p>Les eaux pluviales</p>	<p>Il a été constaté que certaines descentes d'eaux pluviales ne sont pas raccordées à un drain et que les eaux se déversent en pied de façade.</p> <p>D'autres descentes sont raccordées à un drain mais il n'a pas pu être vérifié le fonctionnement global du drain périphérique (s'il existe).</p> <p>De plus, on constate que la présence d'eau à ce niveau-là a entraîné un affaissement du remblai périphérique de plusieurs centimètres</p>	 <p><i>Pied de descente d'eaux pluviales non raccordé</i></p>
<p><b>Les fissures</b></p>	<p><b>De nombreuses fissures sont visibles sur les façades.</b></p>	
<p>Façade NORD (côté entrée)</p>	<p>Il n'a pas pu être constaté si ces fissures sont traversantes. Le doublage intérieur masque la partie structurelle.</p>	

Zone	Description	Photos
		<i>Fissures de l'ordre du mm sur la façade NORD</i>
Façade OUEST	Le même type de fissure que sur la façade NORD (ouverture de l'ordre du mm) a été observé.	 <p data-bbox="911 1402 1326 1435"><i>Fissures visibles depuis l'extérieur</i></p>
Façade SUD		 <p data-bbox="895 1917 1342 1951"><i>Fissures du soubassement côté SUD</i></p>

Zone	Description	Photos
Façade EST	Sans objet car mitoyenne avec la villa d'à côté.	
Intérieur	Description	Photos
Rez-de-chaussée	Aucune fissure structurelle sur les faces intérieures n'est visible compte tenu de la présence d'un doublage généralisé du type lambris.	
Sous-sol	<p>Le sous-sol comporte un dallage et des gradins en béton. Il peut être supposé que la roche est affleurante au niveau des gradins et qu'elle a été recouverte par la mise en œuvre de béton.</p> <p>Cette roche se situe au niveau de la façade OUEST mais n'est pas visible sur les autres façades (absence de gradins)</p> <p>Les voiles périphériques du sous-sol comportent une isolation globale et les éventuels désordres n'ont pas pu être observés</p>	 <p><i>Vue en sous-sol de l'angle SUD / OUEST</i></p>
Le béton	<p>Des essais ont été réalisés à l'aide d'un scléromètre afin d'estimer la résistance en compression du béton.</p> <p>La résistance moyenne obtenue sur les voiles périphériques est de l'ordre de 46 MPa.</p>	 <p><i>Mesure de la résistance en compression du béton avec un scléromètre</i></p>

**c) CONCLUSION**

L'ensemble des constatations effectuées sur site nous permet d'apporter les commentaires suivants :

- Le béton présente de bonnes caractéristiques mécaniques : de l'ordre de 46 MPa.
- Les eaux pluviales ne sont pas drainées et l'écoulement des eaux de la toiture est déversé en pied de façade. Ceci est vérifié par les tassements des remblais périphériques.

Compte tenu de ces observations, l'hypothèse préférentielle de l'origine de ces désordres est un éventuel tassement des fondations du aux écoulements des eaux au niveau de l'assise de ces dernières, probablement complété par une nature de sol d'assise différente entre la façade OUEST (roche) et les autres façades.

**3. MAISON # 3**

**a) DESCRIPTION STRUCTURELLE SOMMAIRE DE LA MAISON**

La maison est composée des éléments structurels suivants:

- La maison est fondée sur un sous-sol semi enterré d'environ 2,50m de hauteur.
- La structure du plancher bas du RdC est supposée être un plancher bois mais la présence d'un faux plafond global en sous face de ce dernier n'a pas permis de confirmer la composition de cette structure.
- La structure porteuse dans la hauteur du RdC n'est pas connue (aucun sondage n'a été réalisé).
- La structure des combles n'est pas connue.

Suivant les informations communiquées par Mine Canadian Malartic, la superstructure de cette maison a été déplacée pour les besoins de l'exploitation de la mine.

**b) PRINCIPAUX POINTS RETENUS SUITE A L'INSPECTION**

Zone	Description	Photos
Les eaux pluviales	<p>Aucune descente d'eaux pluviales n'est drainée, ce qui a pour conséquence de ramener l'ensemble des eaux pluviales en pied de façade sur toute la bâtisse.</p> <p>Cependant, il n'a pas été constaté d'infiltration au niveau des voiles du sous-sol enterré.</p>	 <p>Affaissement du remblai en périphérie de la maison</p> <p><i>Pied de descente d'eaux pluviales non raccordé</i></p>

Zone	Description	Photos
Les fissures	Seule la structure de la partie haute du sous-sol enterré (1.20m de hauteur environ) est visible depuis l'extérieur. Le reste des façades possède un bardage bois empêchant toute inspection visuelle.	 <p>Photo retirée par respect pour la vie privée des participants</p>
Façade NORD (côté entrée)	Cette façade ne possède pas de fissure apparente.	
Façade SUD	Cette façade ne possède pas de fissure apparente.	
Façade EST	La façade EST présente une fissure en dessous du plancher bois de la terrasse extérieure. Cette fissure possède une ouverture d'environ 0.1mm	 <p><i>Localisation de la fissure</i></p>

Zone	Description	Photos
Façade OUEST	<p>Cette façade possède une fissure au niveau de l'angle NORD/OUEST.</p> <p>A ce stade d'évolution de la fissure et de ce qui en est visible, il est envisageable que la fissure ne concerne que l'épaisseur de l'enduit recouvrant les murs du sous sol et que la partie structurelle du mur ne présente pas de désordre</p>	
Intérieur		
Rez-de-chaussée et sous-sol	Aucune fissure structurelle sur les faces intérieures	
Le béton	<p>Des essais ont été réalisés à l'aide d'un scléromètre afin d'estimer la résistance en compression du béton.</p> <p>La résistance moyenne obtenue sur les voiles périphériques est de l'ordre de 40 MPa.</p>	
Les armatures	Les murets ne comportent pas d'armature sur les zones accessibles testées à l'extérieur de la maison au niveau des parties hautes du sous-sol.	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; text-align: center;"> <p>Photo retirée par respect pour la vie privée des participants</p> </div> <p style="text-align: center;"><i>Recherche d'armature dans le béton</i></p>

**c) CONCLUSION**

L'ensemble des constatations effectuées sur site nous permet d'apporter les commentaires suivants :

- Le béton présente de bonnes caractéristiques mécaniques : de l'ordre de 40 MPa.
- Les eaux pluviales ne sont pas drainées et l'écoulement des eaux de la toiture est déversé en pied de façade et ceci sur l'ensemble des façades.
- Il n'y a pas d'armatures dans les parties hautes des murets du sous-sol.

Compte tenu de ces observations, les fissures intérieures visibles au niveau des cloisons peuvent avoir comme origine le démontage, le transport et la mise en place de la maison (suivant les informations fournies par Mine Canadian Malartic).

De plus, les écoulements d'eau provenant des descentes peuvent induire des phénomènes de tassement au niveau des fondations. Cependant, compte tenu de la faiblesse de l'ouverture des fissure visible (de l'ordre de 0.1mm), il ne peut être statué à ce jour une hypothèse unique et certaine sur l'origine des désordres.

**4. MAISON #4**

**a) DESCRIPTION STRUCTURELLE SOMMAIRE DE LA MAISON**

La maison est composée des éléments structurels suivants :

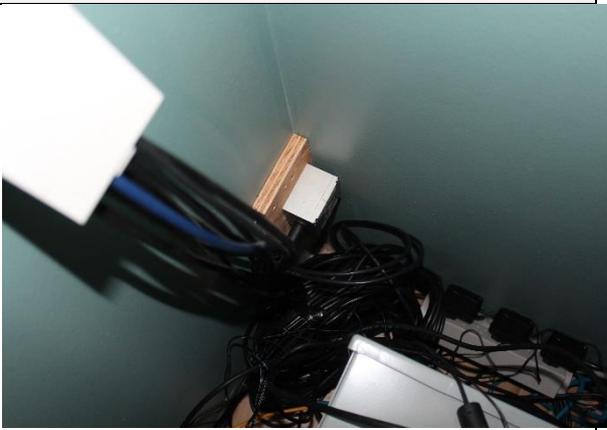
- La maison est fondée sur un vide sanitaire d'environ 1,50 mètre sur la moitié de la surface de la maison et d'environ 0.8 mètre sur l'autre partie. Sur la partie la plus haute, un dallage au sol a été réalisé. Les murets périphériques sont en béton.
- Les planchers haut et bas du RdC sont des structures bois.
- La structure porteuse dans la hauteur du rdC n'est pas connue (aucun sondage n'a été réalisé).
- La structure des combles n'est pas connue.

**b) PRINCIPAUX POINTS RETENUS SUITE A L'INSPECTION**

Zone	Description	Photos
Les eaux pluviales	Il a été constaté que certaines descentes d'eaux pluviales ne sont pas raccordées à un drain et que les eaux se déversent en pied de façade.	 <p><i>Pied de descente d'eaux pluviales non raccordé</i></p>

Zone	Description	Photos
	<p>L'ensemble de la maison présente un affaissement des remblais périphériques sur une largeur d'environ 1m. Cette largeur correspond probablement à la limite extérieure du terrassement réalisé pour la création de la maison.</p> <p>Par conséquent, en complément de l'absence de raccordement des descentes d'eaux pluviales, les fondations se situent dans une « cuvette » aggravant les stagnations et infiltrations d'eau.</p> <p>Ce phénomène a pu être confirmé par la présence de stagnation d'eau dans le vide sanitaire.</p>	<div data-bbox="815 241 1385 651" style="border: 1px solid black; padding: 10px; text-align: center;"> <p>Photo retirée par respect pour la vie privée des participants</p> </div> <p data-bbox="815 674 1385 707"><i>Pied de descente d'eaux pluviales non raccordé</i></p> <div data-bbox="871 719 1329 1025" style="border: 1px solid black; padding: 5px;">  </div> <p data-bbox="871 1037 1329 1070"><i>Présence d'eau dans le vide sanitaire</i></p>
<p><b>Les fissures</b></p>		
<p>Façades</p>	<p>Aucune fissure n'est visible au niveau des façades car elles sont entièrement bardées.</p>	<div data-bbox="815 1144 1385 1462" style="border: 1px solid black; padding: 10px; text-align: center;"> <p>Photo retirée par respect pour la vie privée des participants</p> </div> <p data-bbox="935 1480 1265 1514"><i>Façade entièrement bardée</i></p>

Zone	Description	Photos
Fondations	Cependant des fissures importantes de l'ordre de 1 à plusieurs centimètres sont visibles au niveau des fondations.	 <p><i>Fissures de l'ordre de plusieurs mm avec désaffleur</i></p>
Vide Sanitaire	Lors de l'inspection du vide sanitaire, il a été détecté la présence d'une poutre bois qui est en appui sur la fondation au niveau de cette fissure.	 <p><i>Vue de l'appui de la poutre bois au droit de la fissure</i></p>
Façade SUD		 <p><i>Fissures visibles depuis l'extérieur dans l'angle rentrant de la façade SUD</i></p>

Zone	Description	Photos
Façade NORD	<p>Cette fissure présente une ouverture importante (supérieure à 1 cm) mais elle n'a pas été instrumentée.</p>	 <p><i>Fissures de l'ordre du cm au niveau du soubassement</i></p>
Intérieur	Description	Photos
Rez de chaussée	<p>Aucune fissure structurelle sur les faces intérieures n'est visible compte tenu de la présence d'un doublage généralisé du type lambris. Une fissure a été instrumentée mais au niveau d'une cloison comportant une ouverture.</p>	 <p><i>Capteur sismique monté sur un doublage (buanderie)</i></p>
Soubassement / vide sanitaire	<p>Le soubassement de la maison est composé de murets périphériques et d'un muret de refend. Ce dernier présente une fissure infiltrante à mi-longueur. Le sens d'infiltration (depuis le NORD vers le SUD) est dû à la différence d'altimétrie des terrassements du vide sanitaire.</p>	

Zone	Description	Photos
		<p><u>Vue d'ensemble du muret de refend dans le vide sanitaire</u></p>
<p>Le beton</p>	<p>Des essais ont été réalisés à l'aide d'un scléromètre afin d'estimer la résistance en compression du béton.</p> <p>La résistance moyenne obtenue sur les voiles périphériques est de l'ordre de 44 MPa.</p>	 <p><u>Mesure de la résistance du béton au scléromètre</u></p>
<p>Les armatures</p>	<p>Les murets ne comportent pas d'armature sur les zones accessibles testées.</p> <p>De plus, une partie du muret de refend a été démolie afin de permettre le passage d'un vide sanitaire à l'autre et aucune armature n'est visible sur le tableau de l'ouverture.</p>	 <p><u>Absence d'armature dans le tableau de l'ouverture</u></p>

**c)CONCLUSION**

L'ensemble des constatations effectuées sur site nous permet d'apporter les commentaires suivants :

- Le béton présente de bonnes caractéristiques mécaniques : de l'ordre de 44 MPa.
- Les eaux pluviales ne sont pas drainées et l'écoulement des eaux de la toiture est déversé en pied de façade. Ceci est vérifié par les tassements des remblais périphériques sur une largeur de 1 mètre qui a créé une « cuvette » engendrant des infiltrations d'eau très importantes dans le vide sanitaire.

- La détérioration de la poutre bois du plancher bas du RdC (vrille et gonflement) au niveau de la fissure instrumentée sur le façade EST peut être à l'origine de la création de la fissure sur cette zone.

Compte tenu de ces observations, l'hypothèse préférentielle de l'origine de ces désordres est un éventuel tassement des fondations du aux écoulements des eaux au niveau de l'assise de ces dernières et probablement complété par une détérioration due à la poutre bois du plancher bas du RdC.

De plus, les écoulements et infiltrations d'eau observés à travers les fissures peuvent également induire des désordres structurels (augmentation des ouvertures de fissures) lors de cycles de gel/dégel.

### C. Conclusion de l'analyse structurelle des habitations

Pour les 4 habitations, nous avons trouvé que les principaux désordres structurels, qui existaient avant le début de la période d'instrumentation, sont certainement créés par un mauvais drainage des écoulements des eaux pluviales provoquant des tassements de sols<sup>2</sup>. Les cycles gel/ dégel viennent aggraver le phénomène sur des zones non drainées et amplifient un mouvement différentiel sur les fondations dont les murs béton sont, à priori, non armés.

---

<sup>2</sup> A noter que les vibrations des tirs de mines ne sont pas de nature à créer des tassements de sol (cf annexe E)

## VI. Conclusion

A partir d'un système d'instrumentation relativement complet quant à la surveillance des fissures existantes il a été possible d'établir les constatations suivantes :

Les principales évolutions des ouvertures de fissures sont liées aux variations de température. Le comportement linéaire, proportionnalité entre l'ouverture statique d'une fissure et la température, est clairement identifié dans 77% des cas avec des variations d'ouverture de quelques dixièmes de millimètres.

L'analyse des ouvertures de fissure en dynamique (solicitations sismiques) montre que celles-ci évoluent avec des amplitudes extrêmement faibles (de quelques microns au centième de millimètre). L'ouverture se fait dans le domaine élastique et les fissures reprennent leur ouverture d'origine quelques minutes après les tirs.

Une extrapolation de ces ouvertures dynamiques permet de donner un ordre de grandeur probabiliste de 90 mm/s qui serait susceptible, dans certains cas, de faire évoluer l'ouverture de certaines fissures de 0.2 millimètres, valeur qui peut être considérée comme significative dans le cas de sollicitations répétitives. **Cet ordre de grandeur est vraiment donné à titre indicatif et nécessiterait des investigations complémentaires basées sur une instrumentation modifiée et complétée pour en confirmer la valeur ainsi qu'une zone témoin proche des tirs de mines et recevant des sollicitations sismiques élevées (> 50 mm/s).**

Les 23% de comportement quasi linéaire entre température et ouverture de fissures pourraient certainement trouver une explication, en améliorant le système d'instrumentation grâce à un repositionnement des capteurs :

- Extensomètres montés perpendiculairement à l'ouverture de la fissure
- Extensomètres en extérieur des bâtiments protégés du gel et des intempéries
- Paramétrage uniformisé de l'acquisition dynamique des extensomètres
- Capteurs sismiques montés à côté des extensomètres
- Capteurs de température à l'intérieur des murs extérieurs

De même pour les mesures dynamiques qui permettraient de mieux appréhender le niveau de vibration susceptible de faire évoluer une fissure existante.

Concernant les 4 habitations témoins, nous avons trouvé que les principaux désordres structuraux, qui existaient avant le début de la période d'instrumentation, sont certainement créés par des tassements de sol provoqués par les écoulements des eaux pluviales non drainées. Les cycles gel/ dégel viennent aggraver le phénomène sur des zones non drainées et amplifient un mouvement différentiel sur les fondations dont les murs béton sont, à priori, non armés.

**L'ensemble de ces éléments n'a pas permis de mettre en évidence une évolution significative et permanente d'une fissure existante d'un élément structural, due aux vibrations d'un tir de mines.**

## VII. Annexes

### A. Localisation des maisons témoins

Les quatre maisons témoins sont situées dans les secteurs suivants:

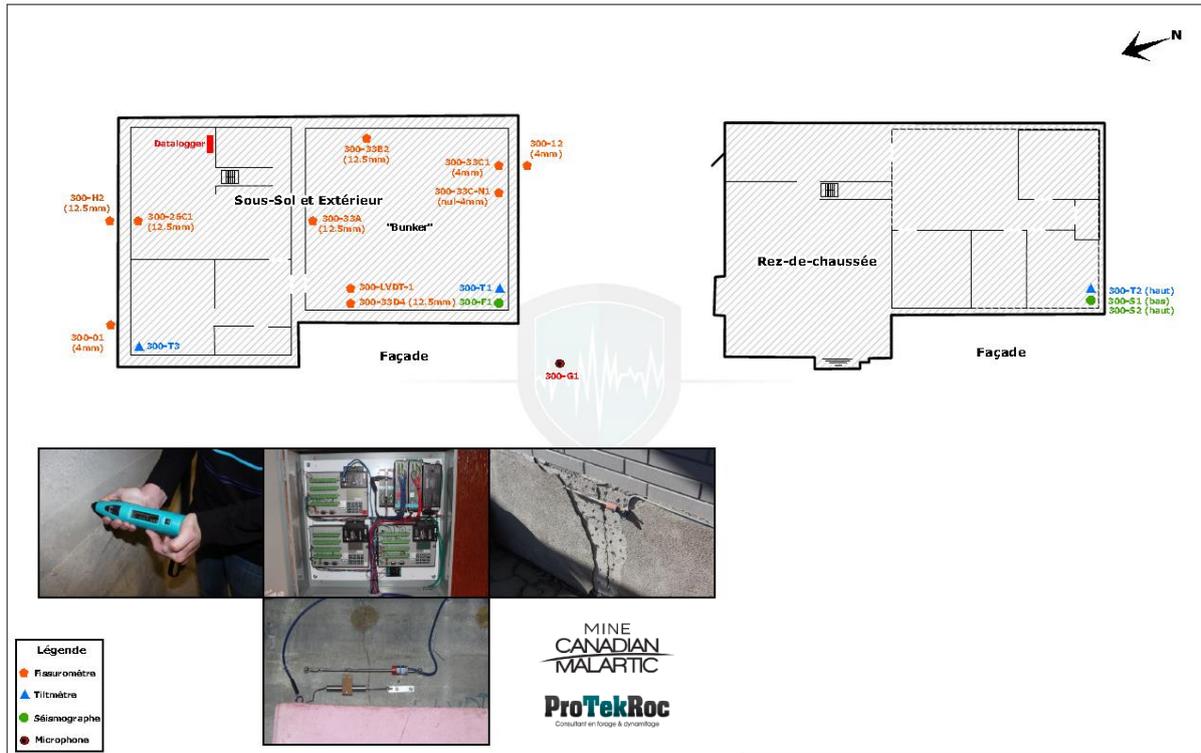
- 3 résidences dans le quartier sud-est
- 1 résidence dans le quartier nord-est

Sur la figure ci-dessous se trouve la localisation de ces quatre maisons.

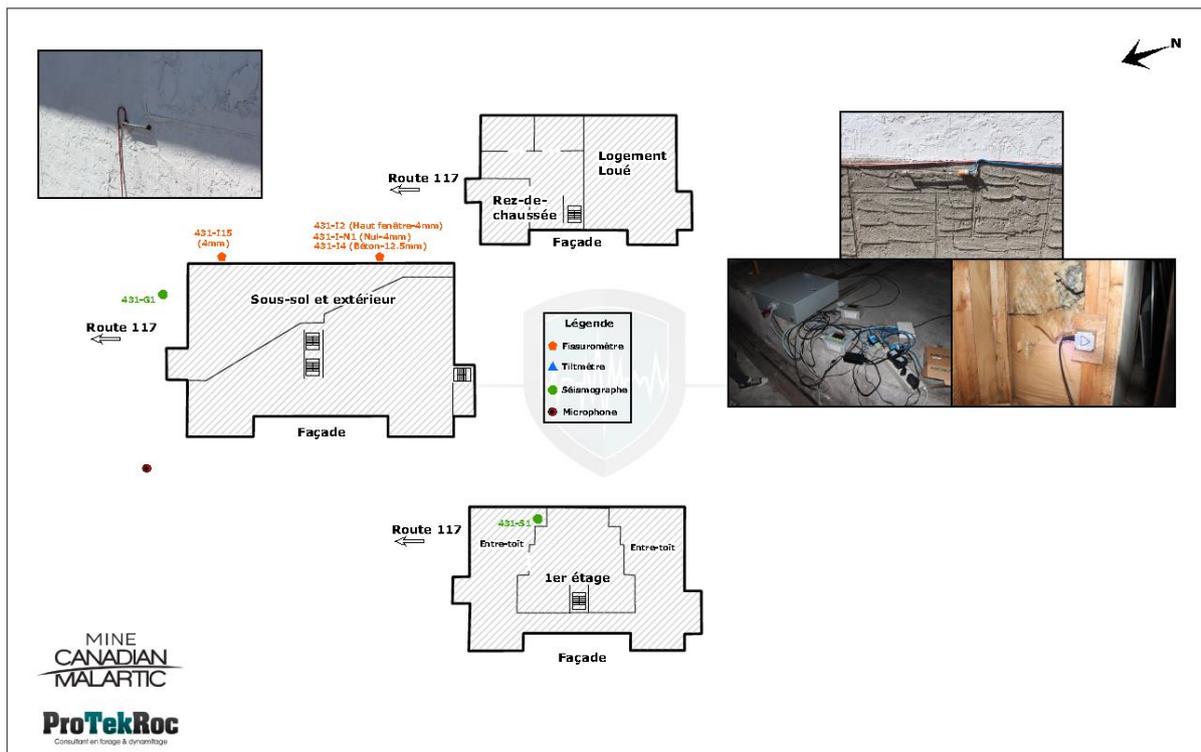


**B. Annexe 1 : Plan des habitations témoins**

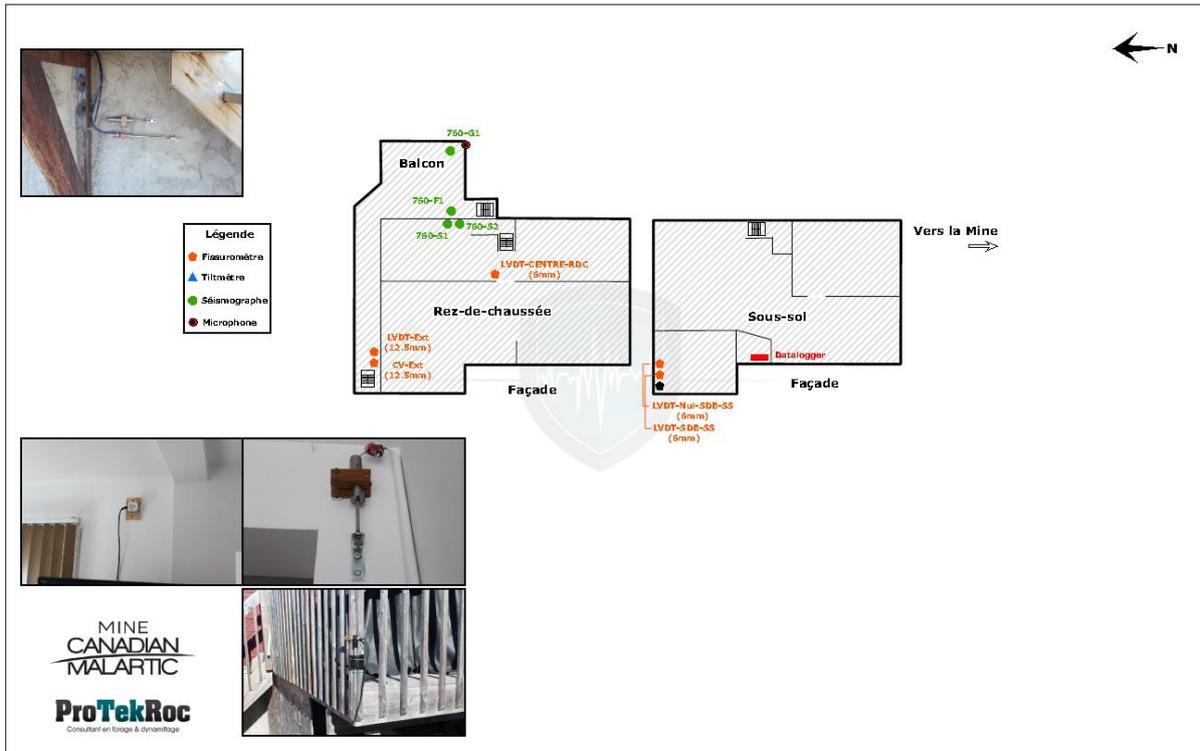
**a) MAISON #1**



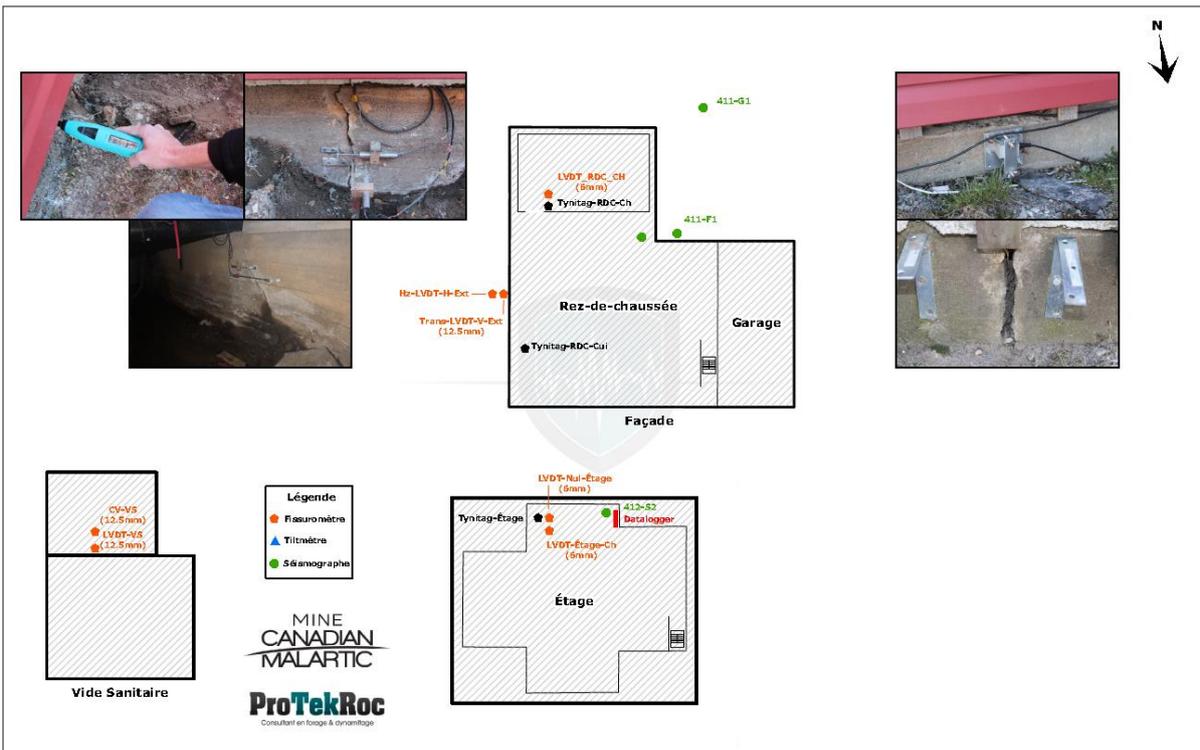
**b) MAISON #2**



**c) MAISON #3**



**d) MAISON #4**



### C. Limites de Vibration pour les habitations courantes

On entend par habitation courante, les habitations individuelles et les petits bâtiments de moins de 6 étages. De nombreux pays ont légiféré sur les limites sismiques admissibles sur ces ouvrages pour ne pas créer de désordres structuraux. Parmi ces pays on citera la France, l'Espagne, l'Angleterre, les Etats-Unis et le Canada (Québec). On notera que toutes les réglementations font état d'un niveau de vibration limite variant avec la fréquence dominante de la vibration mesurée. Pour les basses fréquences (inférieures à 5 Hz) les limites sont plus sévères et inversement pour les « hautes » fréquences les limites sont moins sévères.

La figure ci-dessous, récapitule les courbes d'amplitude limite de la vibration en fonction de la fréquence pour les pays cités.

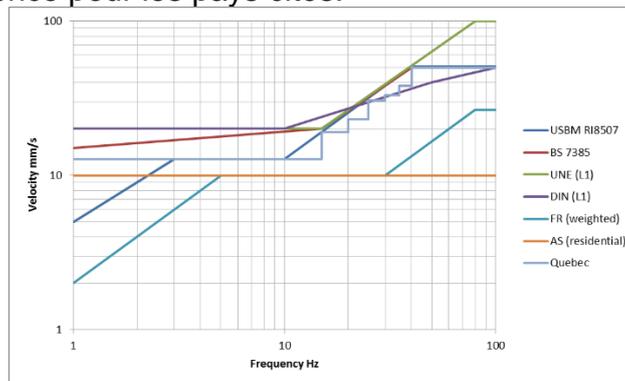


Figure 24 : Comparaison de différentes réglementations sismiques pour des habitations

On remarquera que ces réglementations sont toutes plus ou moins similaires. Le graphique figure 22 illustre l'enveloppe de ces réglementations et trace une courbe moyenne des niveaux sismiques admissibles en fonction de la fréquence de la vibration.

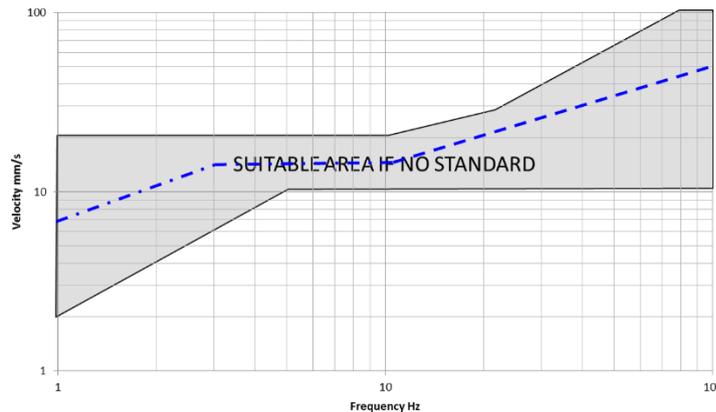


Figure 25 : Réglementation sismique moyenne pour des habitations courantes

On retiendra comme limite moyenne la courbe en pointillés bleus avec un niveau de vibration de 12,5 mm/s à 20 Hz s'élevant à 50 mm/s à 100 Hz

#### D. Recommandations concernant l'instrumentation

Afin d'optimiser l'acquisition de données pour une meilleure compréhension des phénomènes les améliorations ci-dessous sont préconisées :

- Les fissuromètres doivent être installés perpendiculairement à l'ouverture de la fissure pour mesurer l'ouverture vraie.
- La mesure de la température devra être prise à l'intérieur des murs pour prendre en compte l'inertie thermique des matériaux
- Les fissuromètres doivent être protégés de manière à voir leur température la plus stable possible (excursion limitée entre 5 et 20 ° max par exemple) pour éviter les dérives des mesures
- Chaque fissuromètre doit être accompagné d'un capteur sismique placé au droit de la fissure et sur le même support afin de pouvoir prendre en compte l'orientation des tirs dans l'analyse.
- L'ensemble des fissuromètres doit posséder le même paramétrage à savoir pour les mesures statiques toutes les 2h et pour les mesures dynamiques une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz avec une mesure sur 30s avec un pre-trigger de 3s.
- Généraliser les tiltmètres sur l'ensemble des habitations instrumentées
- Instrumenter des habitations de structures différentes et représentatives de l'habitat de la ville de Mallartic
- Mettre en place une instrumentation sur un mur de référence, non sollicité par les tirs de mines.
- Mettre en place une instrumentation sur un mur fortement sollicité par les tirs de mines (par exemple dans l'enceinte de la mine) pour mesurer des évolutions de fissures significatives permettant de confirmer les extrapolations

## E. Vibrations et tassement des sols

Les techniques de densification de sols meubles à l'aide des effets des sollicitations dynamiques (vibrations, chocs) sont bien connues. De nombreux ouvrages et publications les décrivent. Le principe consiste à générer des vibrations à l'aide d'engins mécaniques tels que compacteurs vibrants, vibro-fonceurs ou impacteurs à boule. Les vibrations générées au droit de la source de vibration doivent avoir une amplitude de l'ordre de 50 mm/s dans une plage de fréquence de 15 à 20 Hz pour permettre le compactage du sol. L'énergie sismique se dissipe très rapidement en quelques mètres, ce qui explique la nécessité de couvrir toute la zone à compacter avec les moyens mécaniques.

Le compactage dynamique a lieu lorsque l'accélération est supérieure à 1g. Le graphique ci-dessous donne les niveaux de vibration en fonction des fréquences pour obtenir une accélération supérieure à 1g. On notera que pour des fréquences comprises en 10 et 50 Hz, on obtient une accélération supérieure à 1g pour un niveau de vibration compris entre 35 mm/s et 110 mm/s.

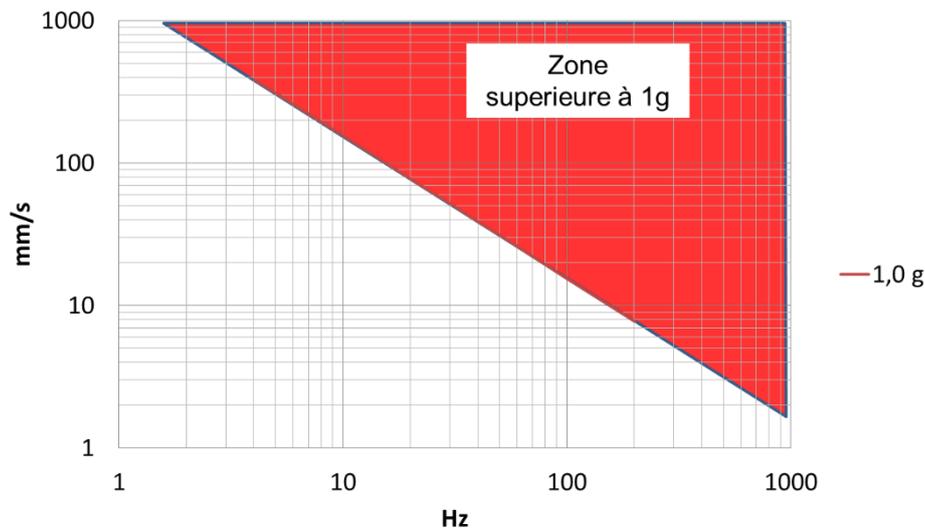


Figure 26 : Graphique Fréquence, Vitesse Particulaire, Accélération

Ces niveaux de vibrations sont nettement supérieurs à ceux générés par les tirs de mines dans les zones habitées où la limite réglementaire se situe aux alentours de 12 mm/s. Il est donc fort peu probable que les vibrations des tirs de mines créent des tassements de sols dans des zones résidentielles par effet de compactage dynamique.