

RAPPORT

CETE de LYON
Centre d'Études
Techniques
de LYON

Département
Laboratoire de Lyon

Affaire
42262-1

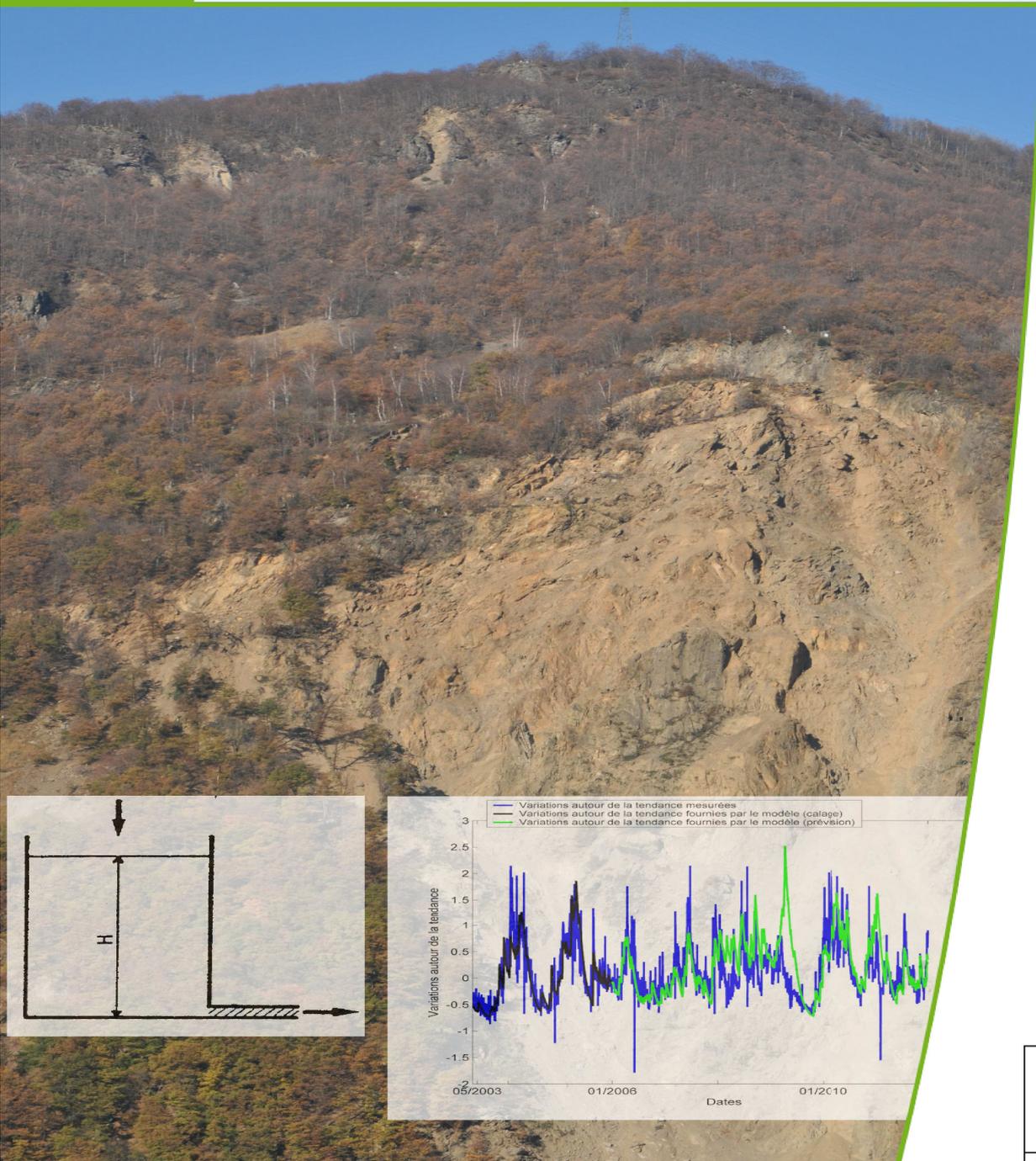
Décembre 2012

Agence Nationale de la Recherche

ANR

ANR SLAMS

Versant des Ruines de Séchilienne : relations entre apports hydriques et déplacements de surface - analyse statistique



Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie



ANR SLAMS

Versant des Ruines de
Séchilienne : relations entre
apports hydriques et
déplacements de surface -
analyse statistique

Rapport

Décembre 2012

Date	Version	Commentaires
Novembre 2012	Rev0	Version rédigée par M-A Chanut
Novembre 2012	Rev1	Relectures et compléments : L. Dubois, J-P Duranthon

CETE69_R2_DM_Rapport_Rev4



Département Laboratoire de Lyon

25, avenue François Mitterrand

CASE n°1

69674 BRON CEDEX

Tél.: +33 (0)4 72 14 33 00 - Fax.: +33 (0)4 72 14 33 11

Courriel : dll.cete-lyon@developpement-durable.gouv.fr

Récapitulatif de l'affaire

Client : Céline Bourdeau
IFSTTAR

Objet de l'étude : FAER 11R093 - Versant des Ruines de Séchilienne : relations entre apports hydriques et déplacements de surface - analyse statistique

Référence dossier : Affaire 42262-1

Offre : Proposition technique et financière 42262-1-

Diffusion/Archivage : Documentation CETE de Lyon

Chargé d'affaire : Marie-Aurélié CHANUT –Département Laboratoire de Lyon –
Tél. +33 (0)4 72 14 33 00 / Fax +33 (0)4 72 14 33 11
Courriel : dll.cete-lyon@developpement-durable.gouv.fr

Mots Clés : Versant de Séchilienne, apports hydriques de surface, déplacements de surface, corrélation, analyse statistique, modèle vidange réservoir

Liste des destinataires

Contact	Adresse	Nombre - Type
Céline Bourdeau	IFSTTAR Cité Descartes 14 - 20 boulevard Newton 77447 Champs-sur-Marne Marne-la-Vallée cedex 2	1ex papier 1ex numérique

Conclusion – Résumé

Le travail effectué concerne le mouvement de terrain du Versant des Ruines de Séchilienne.

Nous avons déterminé un modèle simple de vidange réservoir qui permet de mettre en relation les variations de déplacements autour de la tendance et les pluies efficaces.

Pour cela, le modèle a été construit en deux étapes :

- nous avons enlevé la composante « tendance » du signal des déplacements pour raisonner sur le signal « variations des déplacements autour de la tendance,
- nous avons calé un modèle vidange-réservoir à un seul réservoir à partir des deux séries : variations autour de la tendance et pluie efficace.

Le modèle obtenu est valable sur une période de 10 ans et nous avons ainsi évité la dérive obtenue pour tous les modèles mis en place jusqu'à présent.

Le modèle établi est de type « boîte noire » dans le sens où il relie les pluies efficaces aux déplacements de surface sans prendre en compte explicitement les mécanismes de déformation et de rupture du massif.

Bron, le 30 Novembre 2012



Gilles GAUTHIER
Directeur du Département Laboratoire de Lyon

Sommaire

Introduction.....	<u>5</u>
Contexte.....	<u>5</u>
Objectifs.....	<u>5</u>
Analyse qualitative des relations entre déplacements et apports d'eau.....	<u>6</u>
Choix de la grandeur pluie efficace.....	<u>6</u>
Mise en évidence de relations qualitatives.....	<u>7</u>
Conclusions.....	<u>12</u>
Test d'un modèle simple de vidange réservoir.....	<u>13</u>
Présentation du modèle.....	<u>13</u>
Modèle 1 (05/2003->12/2005).....	<u>14</u>
Modèle 2 (05/2003->12/2008).....	<u>16</u>
Conclusions.....	<u>17</u>
Décomposition statistique des séries chronologique des « déplacements ».....	<u>18</u>
Objectifs.....	<u>18</u>
Construction du modèle statistique.....	<u>18</u>
Analyse spatiale.....	<u>24</u>
Conclusions.....	<u>27</u>
Application du modèle vidange réservoir sur la grandeur variations des déplacements autour de la tendance.....	<u>28</u>
Modèle 1 (05/2003-> 12/2005).....	<u>28</u>
Modèle 2 (05/2003-> 12/2008).....	<u>30</u>
Évaluation de la qualité du modèle.....	<u>32</u>
Conclusions.....	<u>35</u>
Bibliographie.....	<u>36</u>
Conclusions.....	<u>37</u>
Mise en place d'un modèle reliant les variations de déplacements autour de la tendance et les pluies efficaces	<u>37</u>
Mouvement somme de deux composantes.....	<u>37</u>
Perspectives.....	<u>38</u>
Perspectives.....	<u>38</u>

Introduction

Contexte

Le mouvement de versant de Séchilienne concerne une surface totale d'environ 70 ha. Toutefois, la zone appelée zone frontale présente une plus forte activité que le reste du versant comme le montre la figure 1 où sont représentés les déplacements planimétriques de certains points de mesures.

Différentes études ont tenté de mettre en évidence des relations entre apports d'eau et déplacements [Béal, 2005, Bencivenga, 2008, Chanut, 2011] mais il ressort de toutes ces études qu'il est très difficile de mettre en évidence des relations systématiques. Dans ce rapport, une approche statistique est testée et développée.

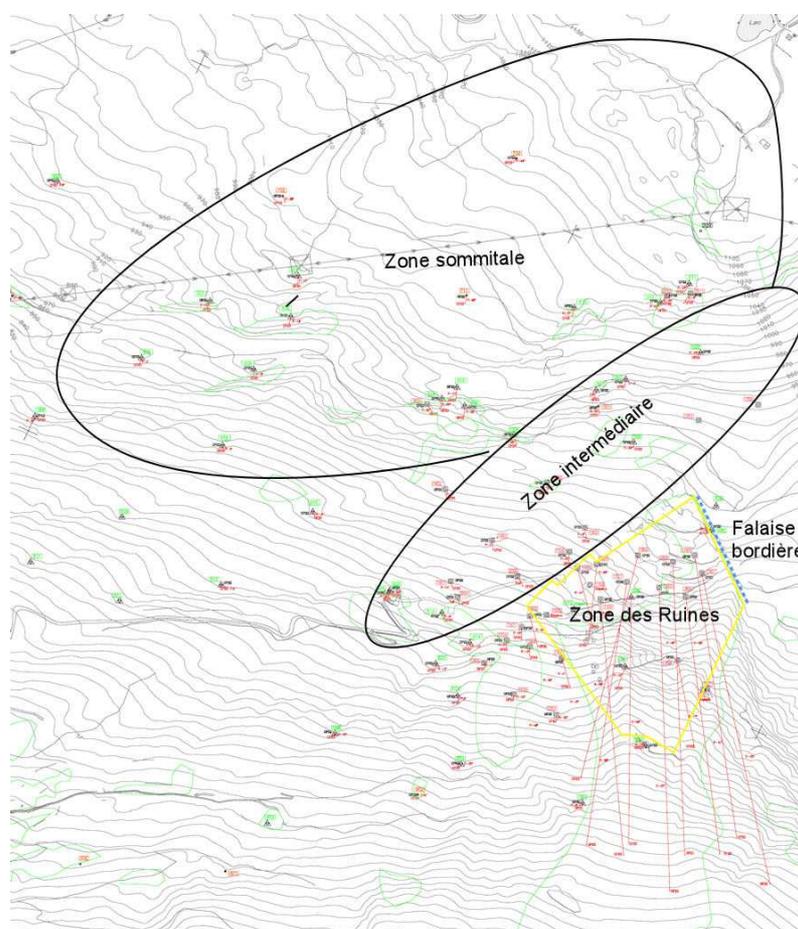


Figure 1: Versant des ruines de Séchilienne – Déplacements planimétriques (Nov 2010 – Nov 2011)

Objectifs

L'objectif du travail présenté dans ce rapport est de quantifier les relations entre apports d'eau et déplacements. Une relation existe : sur le terrain, on observe des augmentations de vitesses de déplacements quasi-immédiatement après la pluie mais cette appréciation qualitative reste difficile à chiffrer.

Analyse qualitative des relations entre déplacements et apports d'eau

Choix de la grandeur pluie efficace

A partir des apports d'eau bruts, plusieurs grandeurs peuvent être considérées :

- les apports d'eau bruts, à proprement parler,
- la pluie efficace.

Apports bruts Les apports d'eau bruts correspondent à la somme de la pluie et de l'équivalent eau de la neige après fonte.

Pluie efficace La pluie efficace est calculée à partir des apports d'eau bruts [VAL12]. Deux notions sont introduites : l'évapotranspiration (ETR) et la réserve utile du sol (RU).

Vallet et al. ont mis en place plusieurs méthodes pour calculer l'évapotranspiration à partir des données disponibles de température.

La réserve utile est habituellement estimée à 100 mm mais des tests paramétriques sont en cours pour fournir la hauteur optimale sur le site de Séchilienne.

Le principe de calcul de la pluie efficace est le suivant : les apports bruts sont d'abord éliminés par évapotranspiration, le surplus est ensuite intégré dans la réserve utile. Enfin, le reste, si reste il y a, correspond à l'infiltration dans le sol et est appelé la pluie efficace. La figure 2 montre la différence entre apports d'eau bruts et pluie efficace. On constate que pendant les périodes d'été où l'évapotranspiration est la plus forte, la quantité de pluie efficace est faible voir nulle.

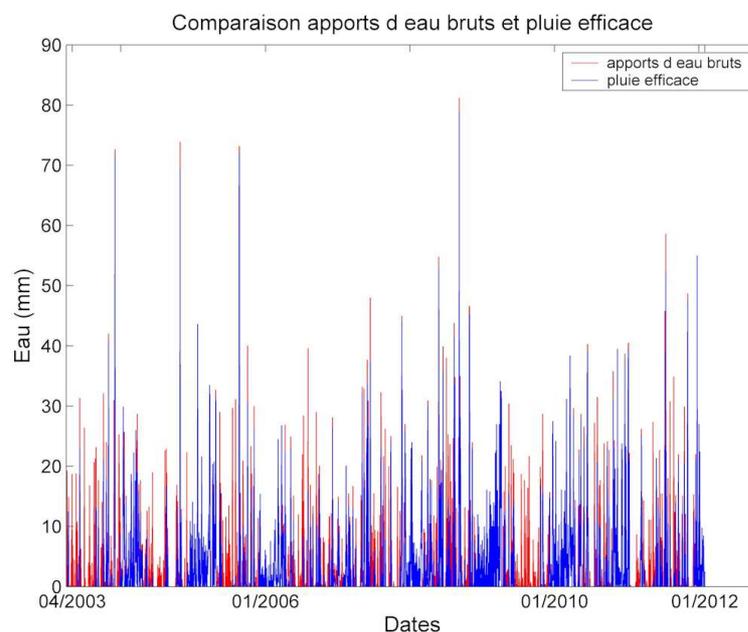


Figure 2: Mise en évidence des différences entre apports d'eau bruts et pluie efficace

Analyse qualitative des relations entre déplacements et apports d'eau (suite)

Mise en évidence de relations qualitatives Dans cette partie, on propose de mettre en évidence de façon qualitative les relations entre les déplacements bruts journaliers mesurés par l'extensomètre A13 et la pluie efficace présentée précédemment.

Extensomètre A13 L'extensomètre A13 se situe dans la zone active (figure 3). Une de ses extrémités est ancrée au niveau de la falaise bordière supposée fixe, l'autre est ancrée sur un gros rocher posé sur la masse mobile dans la partie haute de la zone frontale. Ce capteur apparaît comme le plus révélateur du comportement général de la zone frontale (figure 4) notamment via sa position centrale non affectée d'épiphénomènes (Duranthon et *al.*, 2011).

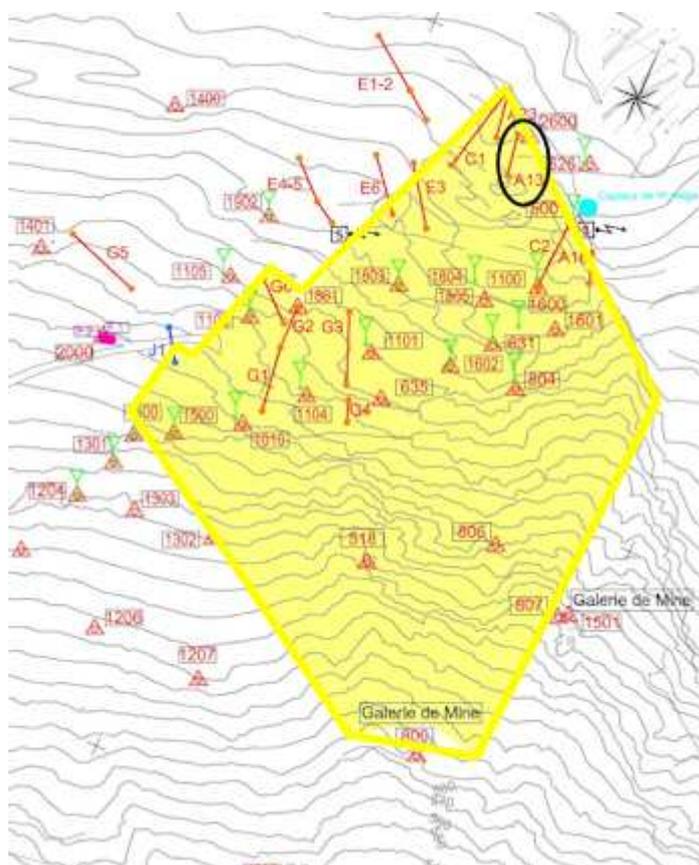


Figure 3: Localisation de l'extensomètre A13 au niveau de la zone active

Analyse qualitative des relations entre déplacements et apports d'eau (suite)

Mise en évidence de relations qualitatives (suite)



Figure 4: Localisation de l'extensomètre A13 vue de dessus – photographie prise par Jean-Paul Duranthon lors de l'acquisition Lidar de février 2012

La figure 5 montre que les déplacements mesurés au niveau des différents extensomètres de la zone active ont des valeurs différentes. Par contre, les variations sont similaires.

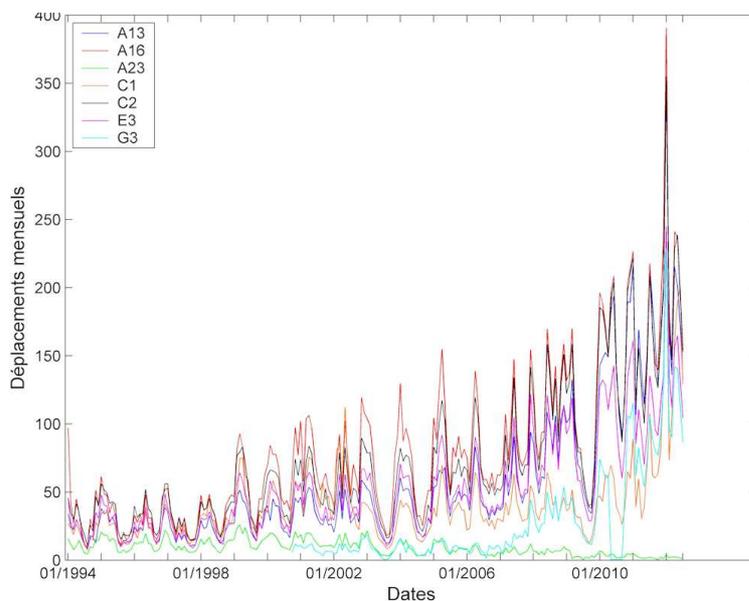


Figure 5: Superposition des courbes de déplacements mesurés au niveau des extensomètres dans la zone active

Analyse qualitative des relations entre déplacements et apports d'eau (suite)

Mise en évidence de relations qualitatives (suite)

Étude sur la période 2003-2012

Nous représentons (figure 6) le graphe des déplacements journaliers mesurés au niveau de l'extensomètre A13 ainsi que la pluie efficace journalière entre début 2003 et début 2012. A cette échelle de détails, on remarque effectivement des déplacements plus faibles pendant les périodes où il n'y a pas de pluie efficace.

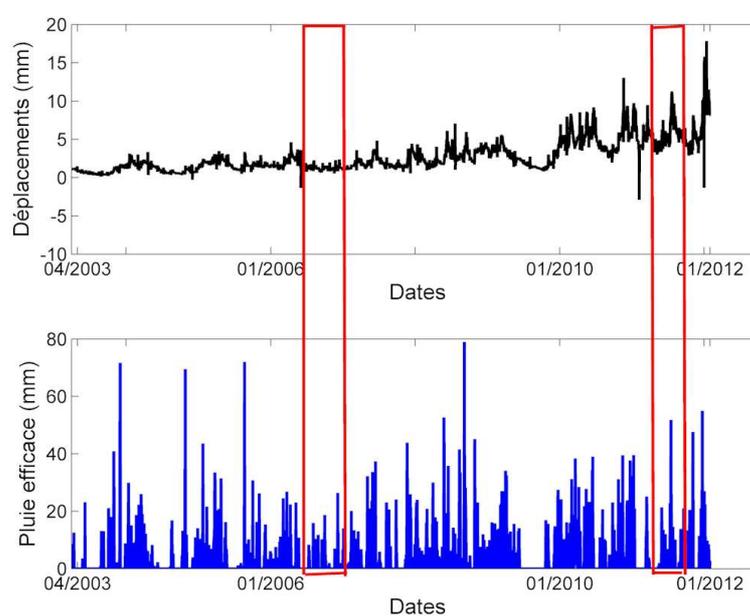


Figure 6: Mise en parallèle des déplacements journaliers et de la pluie efficace

Analyse qualitative des relations entre déplacements et apports d'eau (suite)

Mise en évidence de relations qualitatives (suite)

Zoom avril-juillet 2011

Pour étudier finement la réponse du massif aux apports d'eau, un premier zoom (figure 7) est proposé pour la période d'avril à juillet 2011. Nous avons choisi cette période puisqu'en juillet 2011, ce sont produits plusieurs petits éboulements.

Sur la figure 7, on note une réaction immédiate du massif : les valeurs des déplacements sont en hausse le jour même des précipitations ou le lendemain. Cette période montre un comportement idéal avec une réaction systématique après un apport d'eau. Par contre, l'augmentation observée n'est pas nécessairement proportionnelle à la quantité de pluie.

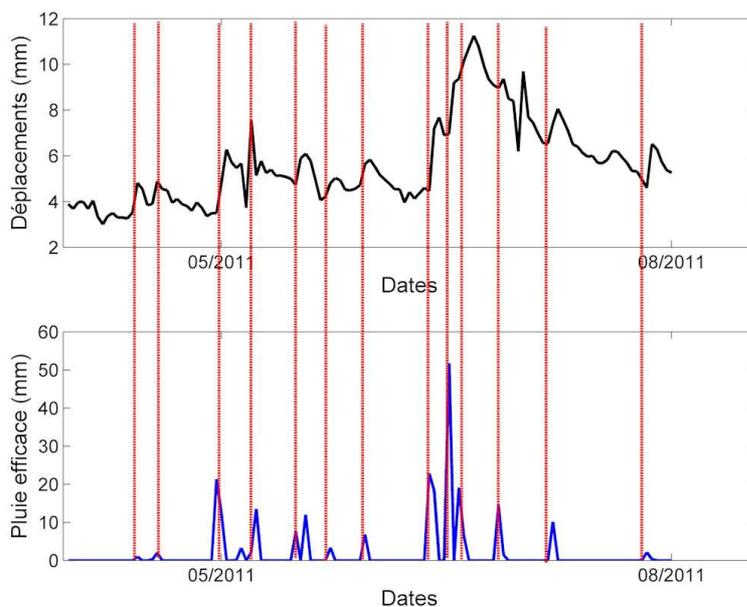


Figure 7: Zoom des courbes de déplacements et de pluie efficace entre avril 2011 et juillet 2011

Analyse qualitative des relations entre déplacements et apports d'eau (suite)

Mise en évidence de relations qualitatives (suite)

Zoom juillet-décembre 2006

Le deuxième zoom (figure 8) réalisé entre juillet et décembre 2006 est moins parfait. Certains apports d'eau ne sont pas suivis d'une hausse de la vitesse des déplacements. Par ailleurs, un délai plus long (de l'ordre de 3 j) semble exister entre l'apport en eau et l'augmentation du déplacement.

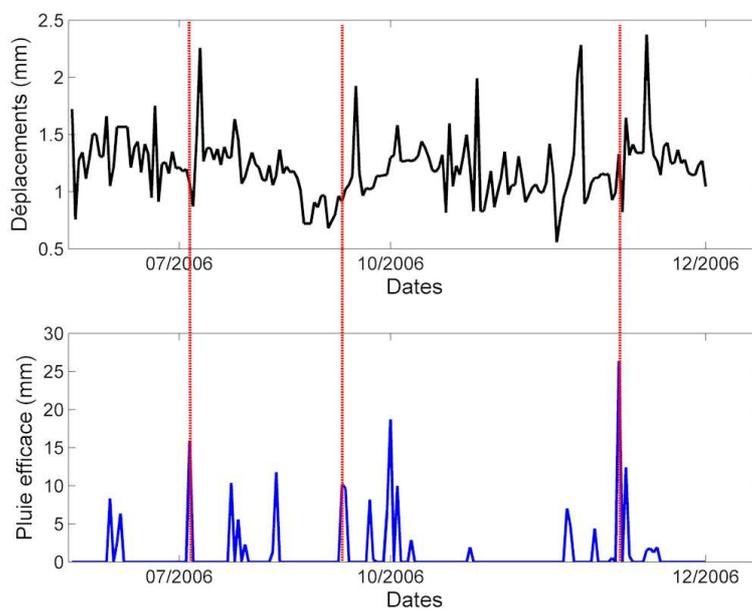


Figure 8: Zoom des courbes de déplacements et de pluie efficace entre juillet 2006 et décembre 2006

Analyse qualitative des relations entre déplacements et apports d'eau (suite)

Conclusions

Une étude fine (année par année par exemple) des courbes de déplacements journaliers et de pluie efficace montre effectivement une relation entre les deux grandeurs. Cette analyse grossière est qualitative : sur certaines périodes, les variations des deux grandeurs sont identiques, sur d'autres non. Toutefois, la détermination d'une relation systématique semble compliquée (cf différentes études et rapports sur le sujet). Nous cherchons toutefois à quantifier la relation.

La connaissance actuelle du contexte hydrogéologique du versant rocheux fracturé des Ruines de Séchilienne est très limitée. Les différents modes d'infiltration et de circulation de l'eau dans le massif sont peu connus. Des mesures piézométriques directes sont délicates dans ce contexte où, dans certaines zones en profondeur, les circulations fissurales peuvent être prépondérantes. Un grand nombre de paramètres seraient nécessaires. Le seul paramètre à notre disposition est la hauteur d'eau mesuré au sein d'un des forages réalisés en limite Ouest de la zone frontale (forage SP). Il est actuellement hors service : la crépine du tube dans lequel la sonde de mesure de pression interstitielle est installée est colmatée. Toutefois, compte-tenu de la complexité hydrogéologique du site, un seul piézomètre est insuffisant pour atteindre une connaissance satisfaisante de la nappe et des circulations d'eau préférentielles en profondeur.

Une solution pour contourner ce manque de connaissances quant à la piézométrie est l'analyse de corrélation à différentes échelles de temps entre les pluies efficaces et les déplacements en surface *via* un modèle de type « boîte noire » ne prenant pas en compte explicitement les mécanismes de déformation et de rupture du massif.

Test d'un modèle simple de vidange réservoir

Présentation du modèle

Le modèle « boîte noire » testé ici est volontairement simple : il s'agit d'un modèle vidange réservoir avec un seul réservoir. Le principe est résumé sur la figure 9 : en entrée, nous prenons les apports d'eau sous la forme de la pluie efficace et en sortie, un déplacement est fourni par le modèle.

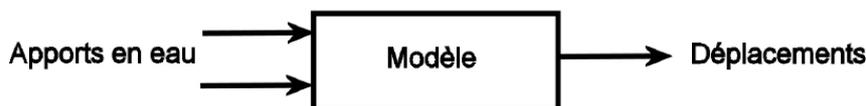


Figure 9: Entrée / Sortie du modèle

Équations du modèle

Le modèle, mis en place, vise à calculer la hauteur d'eau dans un réservoir avec une loi exponentielle de vidange à 2 paramètres :

$$H_j = k H_{j-1} + \alpha P_{j-1}$$

avec H_j la hauteur d'eau au jour j , P_j la pluie efficace au jour j , k le coefficient de vidange du réservoir (proche de 1) et α le coefficient d'infiltration.

Le déplacement est ensuite déduit de la hauteur d'eau par la loi affine suivante :

$$D_j^{\text{modèle}} = a H_j + b$$

$$a = \sigma(D) / \sigma(H) \text{ et } b = m(D) - \sigma(D) / \sigma(H) m(H)$$

où les fonctions m et σ font référence à la moyenne et à l'écart type de la série.

L'algorithme de construction du modèle est explicité dans le tableau suivant :

Étape	Action
1	Définition de l'intervalle de données de calage du modèle
2	Définition des intervalles de valeurs des coefficients k et α
3	Pour chaque valeur du couple (k, α) : <ul style="list-style-type: none"> calcul de la série chronologique de la hauteur d'eau dans le réservoir, calcul des moyennes et écarts types des séries déplacement mesuré et hauteur d'eau, déduction du déplacement estimé par le modèle, calcul de l'erreur moyenne quadratique entre déplacements mesuré et fourni par le modèle.
4	Sélection du couple (k, α) pour l'erreur moyenne quadratique minimale et explicitation du modèle

Test d'un modèle simple de vidange réservoir (suite)

Présentation du modèle (suite)

Erreur du modèle L'erreur moyenne quadratique entre les déplacements mesurés et les déplacements fournis par le modèle est calculée de la façon suivante :

$$EMQ = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (D_j^{mesure} - D_j^{modele})^2}$$

Modèle 1 (05/2003->12/2005)

Dans cette partie, on teste le modèle simple présenté précédemment sur les données de déplacements enregistrées avec l'extensomètre A13 et les apports d'eau sous la forme de la pluie efficace.

Calage du modèle

Le modèle est calé sur la période de mai 2003 à décembre 2005 ce qui correspond à environ 1000 valeurs (figure 10).

Le modèle optimum au sens du critère fixé à savoir minimisant l'erreur moyenne quadratique est obtenu pour les valeurs suivantes :

$$k = 0,982 \quad \text{et} \quad \alpha = 0,022$$

L'erreur moyenne quadratique est égale à 0,37 mm/jour et on calcule le coefficient de corrélation linéaire entre les deux signaux : il vaut 0,84. Cette valeur indique donc une très bonne corrélation des deux signaux sur la période de calage.

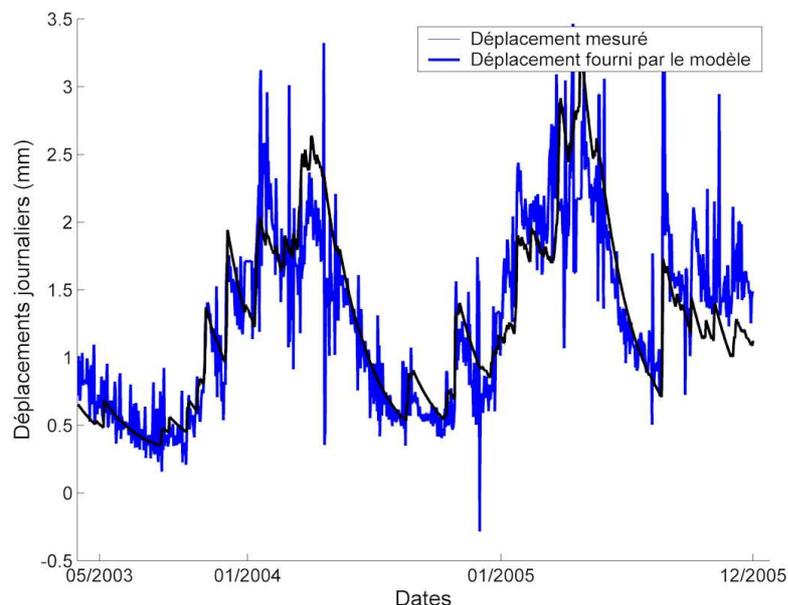


Figure 10: Déplacements mesurés et fournis par le modèle sur la période de calage (05/2003-> 12/2005)

Test d'un modèle simple de vidange réservoir (suite)

Modèle 1 (05/2003->12/2005) (suite)

Extrapolation On étudie à présent la qualité de l'extrapolation du modèle sur la période 2004 à fin 2011. La figure 11 montre le résultat : le comportement observé suit relativement le déplacement fourni par le modèle jusqu'à une certaine date (fin 2007 – début 2008). Ensuite, le comportement réel est très différent du comportement pronostiqué par le modèle.

Le coefficient de corrélation des deux signaux sur la période d'extrapolation est égale à 0,47 et objective la remarque effectuée précédemment. Par ailleurs, l'EMQ est égale à 2,4 mm/jour sur la période de prévision.

Période d'extrapolation	Valeur du coefficient de corrélation
2006->2011	0,47
2006->2008	0,80
2009->2011	0,38

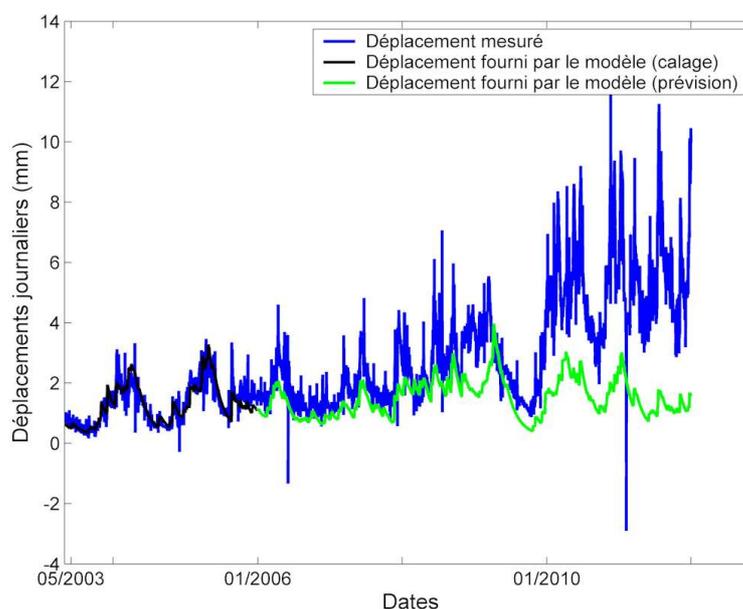


Figure 11: Extrapolation du modèle (2003->2005) sur toute la période d'étude et comparaison des résultats avec les mesures.

Test d'un modèle simple de vidange réservoir (suite)

Modèle 2 (05/2003->12/2008)

On décide maintenant de caler le modèle sur une période plus longue jusqu'en 2008 (figure 12).

Calage Le modèle est défini sur cet intervalle par les valeurs suivantes des paramètres :
 $k = 0,984$ et $\alpha = 0,042$

L'erreur moyenne quadratique est égale à 0,64 mm/jour et on calcule le coefficient de corrélation linéaire entre les deux signaux : il vaut 0,75. Cette valeur est obtenue sur un signal d'environ 2000 données et montre une corrélation significative entre les deux signaux.

On peut toutefois noter que la qualité de l'approximation du modèle, même si elle est bonne, est dégradée par rapport à celle obtenue avec une détermination sur un intervalle de temps plus court. Le coefficient de corrélation linéaire est plus faible et l'erreur moyenne quadratique plus élevée.

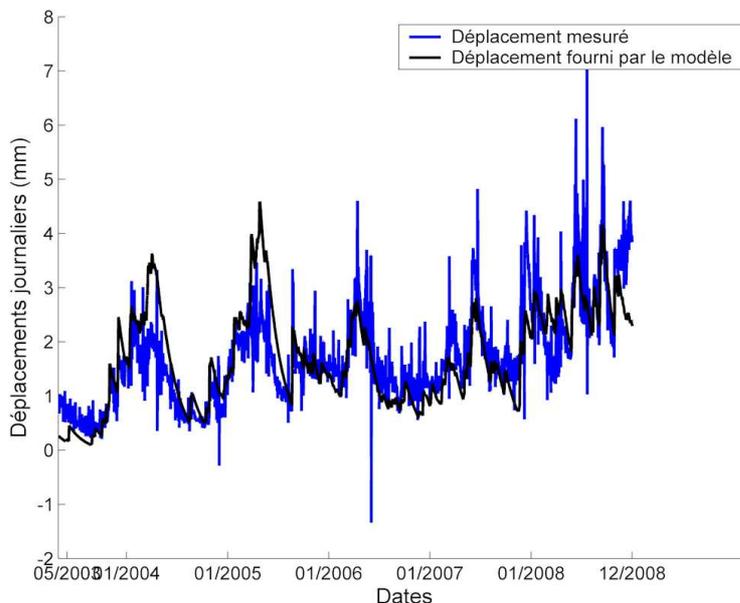


Figure 12: Déplacements mesurés et fournis par le modèle sur la période de calage (05/2003-> 12/2008)

Test d'un modèle simple de vidange réservoir (suite)

Modèle 2 (05/2003->12/2008) (suite)

Extrapolation On procède ensuite à une extrapolation du modèle sur la période 2009 à fin 2011 (figure 13). Le même phénomène est constaté : le modèle n'arrive pas à rendre compte des déplacements observés. La qualité de l'approximation est décrite par un coefficient de corrélation linéaire égal à 0,36 et une erreur moyenne quadratique égale à 2,92 mm/jour.

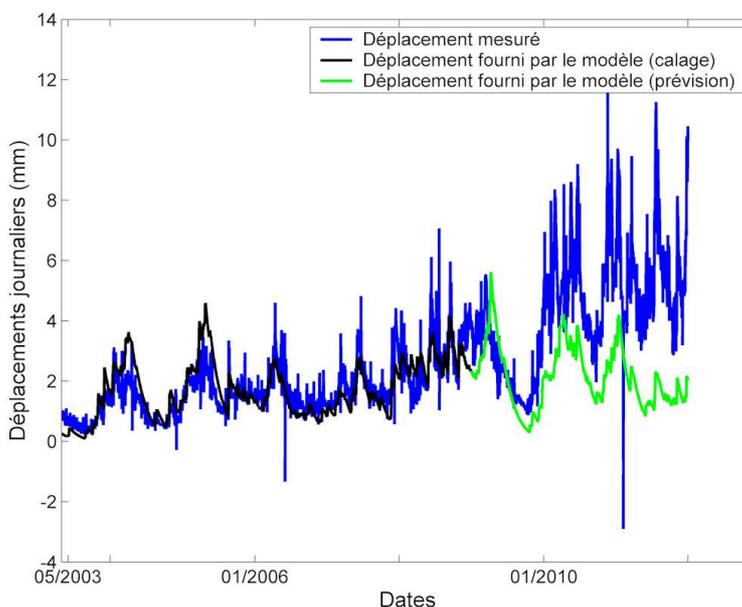


Figure 13: Extrapolation du modèle (2003->2005) sur toute la période d'étude et comparaison des résultats avec les mesures.

Conclusions

Le modèle simple proposé se cale facilement sur une plus ou moins longue période de données mais n'arrive pas à rendre compte de l'évolution des déplacements sur toute la période d'étude considérée c'est à dire jusqu'à fin 2011.

La relation entre déplacements et pluie efficace n'est pas stable dans le temps (à l'échelle de plusieurs années).

Décomposition statistique des séries chronologique des « déplacements »

Objectifs

L'analyse statistique de la série chronologique des déplacements mesurés par l'extensomètre A13 vise deux objectifs :

- obtenir un modèle de déplacements en fonction du temps (extrapolation des différentes composantes de la série),
- rechercher une grandeur à corrélérer avec la pluie efficace plus pertinente que le déplacement.

Construction du modèle statistique

Classiquement [Gervreau, 1991] et [Tenenhaus, 2007] décomposent une série y en trois composantes :

- la tendance T ,
- la saisonnalité S ,
- le résidu ϵ

Deux modèles sont principalement utilisés pour articuler ces trois composantes :

- le modèle additif $y_t = T_t + S_t + \epsilon_t$,
- le modèle multiplicatif $y_t = T_t(1 + S_t)(1 + \epsilon_t)$.

Dans notre cas (figure 14), une tendance nette se dessine et les variations autour de la tendance ne sont pas constantes : variations plus larges associées à une tendance de fond plus élevée. On opte donc pour le modèle multiplicatif qui est plus approprié à ce cas.

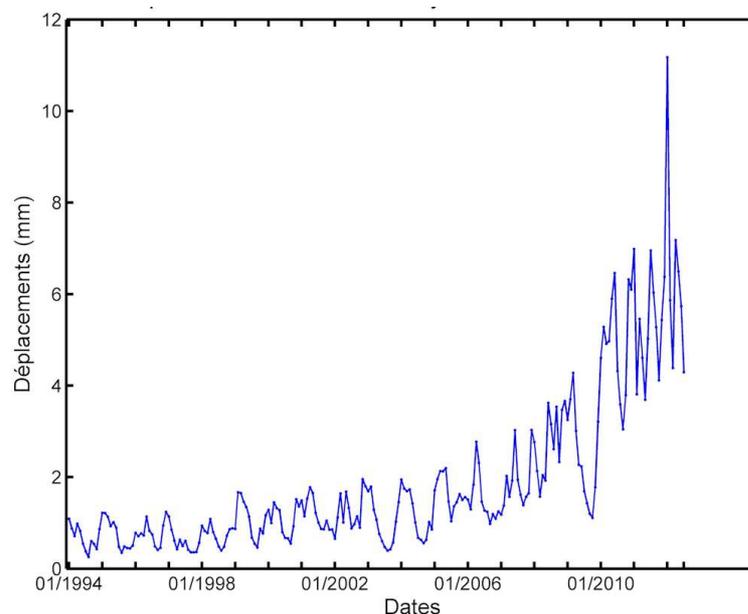


Figure 14: Courbes des déplacements mensuels moyens mesurés par l'extensomètre A13

Décomposition statistique des séries chronologique des « déplacements » (suite)

Construction du modèle statistique (suite)

Tendance La tendance correspond au comportement à long terme. Pour la déterminer, trois méthodes ont été testées :

- la méthode polynomiale de degré 4 $T(t) = \sum_0^4 \alpha_i t^i$ (figure 15),
- la méthode exponentielle de degré 2 $T(t) = A e^{\left(\sum_0^2 \alpha_i t^i\right)}$ (figure 16),
- la méthode par moyenne mobile centrée et de largeur 1 an (figure 17).

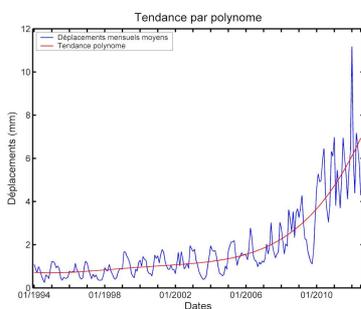


Figure 15: Tendance sous la forme d'un polynôme de degré 4 et obtenue au sens des moindres carrés

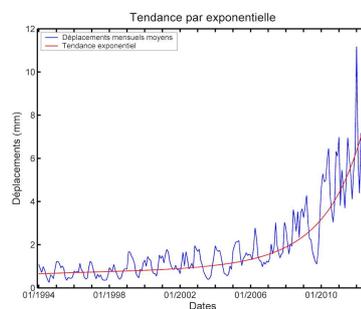


Figure 16: Tendance sous la forme d'une exponentielle de degré 2 et obtenue au sens des moindres carrés

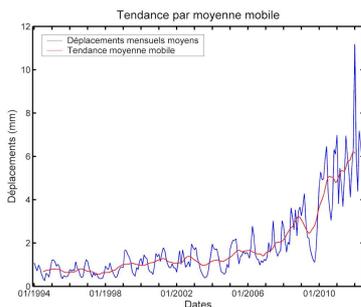


Figure 17: Tendance obtenue par moyenne mobile

Pour la suite, nous calculons la **tendance par la méthode de la moyenne mobile**. Les valeurs obtenues ne dépendent ainsi pas du support de calcul.

Décomposition statistique des séries chronologique des « déplacements » (suite)

Construction du modèle statistique (suite)

Saisonnalité La saisonnalité est liée aux variations de précipitations à l'échelle de l'année. Nous cherchons donc à déterminer s'il existe une saisonnalité de 12 mois dans notre série des déplacements.

Nous raisonnons à présent non plus sur la grandeur déplacement mais sur la grandeur déplacement à laquelle nous avons enlevé la tendance. Pour déterminer la saisonnalité, trois méthodes sont testées :

- superposition des courbes mois par mois (figures 18 et 19),
- analyse spectrale du signal (figure 20),
- autocorrélogramme (figure 21).

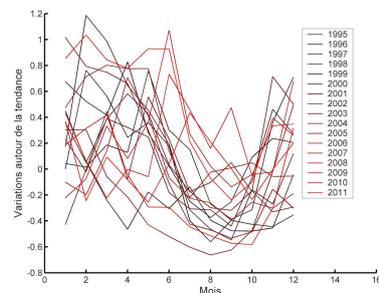


Figure 18: Superposition des variations de déplacements autour de la tendance chaque mois (1994-2011)

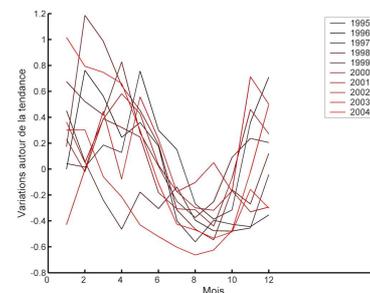


Figure 19: Superposition des variations de déplacements autour de la tendance chaque mois (1994-2004)

La superposition des déplacements mois par mois (figures 18 et 19) montre un creux assez systématique des courbes pendant les mois d'été (juillet à septembre). Par contre pour les six premiers mois de l'année, on n'observe pas vraiment de valeurs ou de formes systématiques.

Si on poursuit la recherche des coefficients de saisonnalité pour chaque mois, on obtient des valeurs. Par contre, les résidus, obtenus après avoir enlevé la tendance puis la saisonnalité, sont du même ordre de grandeur que la saisonnalité elle-même. Ceci n'est donc pas cohérent et au vu de ces courbes, on tend à indiquer qu'il n'existe pas de saisonnalité au sein de la série. Les tests effectués avec les deux autres méthodes vont nous permettre de conclure.

Décomposition statistique des séries chronologique des « déplacements » (suite)

Construction du modèle statistique (suite)

La deuxième méthode de recherche de la saisonnalité est l'analyse spectrale. Sur la figure 20, le spectre de la série des variations de déplacements autour de la tendance est représenté. Il n'existe pas de pic à 12 mois caractéristique d'une résonance et donc de l'existence d'une saisonnalité.

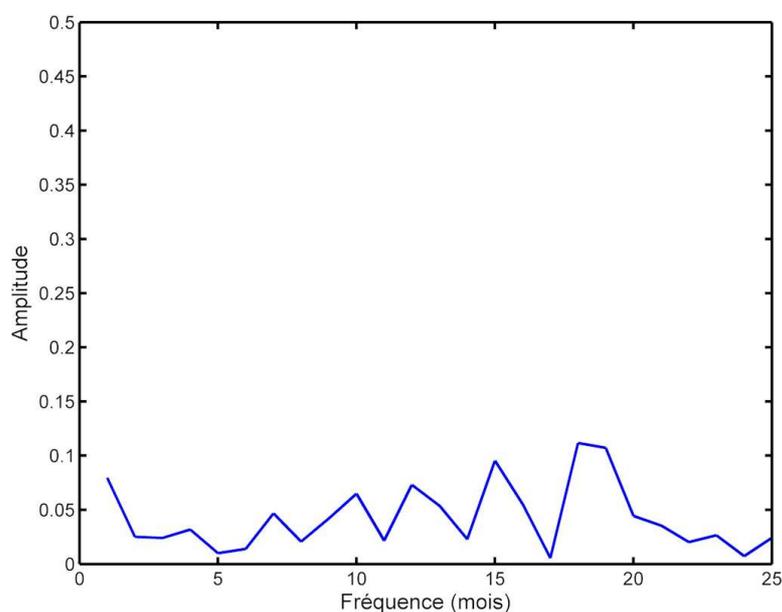


Figure 20: Analyse spectrale de la série des variations de déplacements autour de la tendance

Décomposition statistique des séries chronologique des « déplacements » (suite)

Construction du modèle statistique (suite) Il en est de même pour la méthode de calcul des coefficients d'autocorrélation (figure 21). Il n'existe pas de pic associé à un décalage de douze mois.

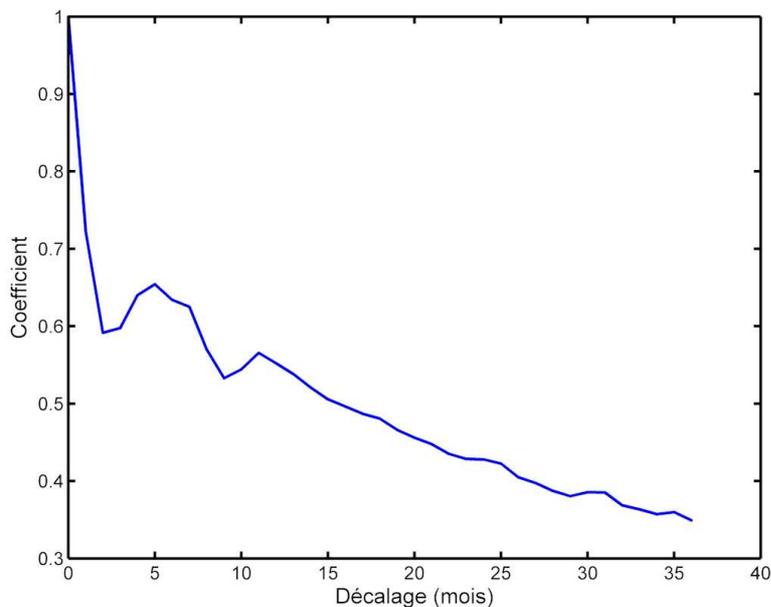


Figure 21: Coefficients d'autocorrélation de la série des variations de déplacements autour de la tendance

Toutes les méthodes convergent donc pour une absence de saisonnalité au sein de la série. Le comportement du versant ne semble pas varier en fonction des saisons.

Décomposition statistique des séries chronologique des « déplacements » (suite)

Construction du modèle statistique (suite)

Résidus D'après le paragraphe précédent, le comportement du versant ne varie pas en fonction des saisons. La saisonnalité est nulle : $S_t=0$ et le résidu se calcule de la façon suivante : $\epsilon_t = \frac{y_t}{T_t} - 1$.

Comme nous l'avons appelé précédemment, il représente les variations de déplacement autour de la tendance et est sans unité (c'est un ratio). La figure 22 montre que le signal obtenu est de moyenne nulle.

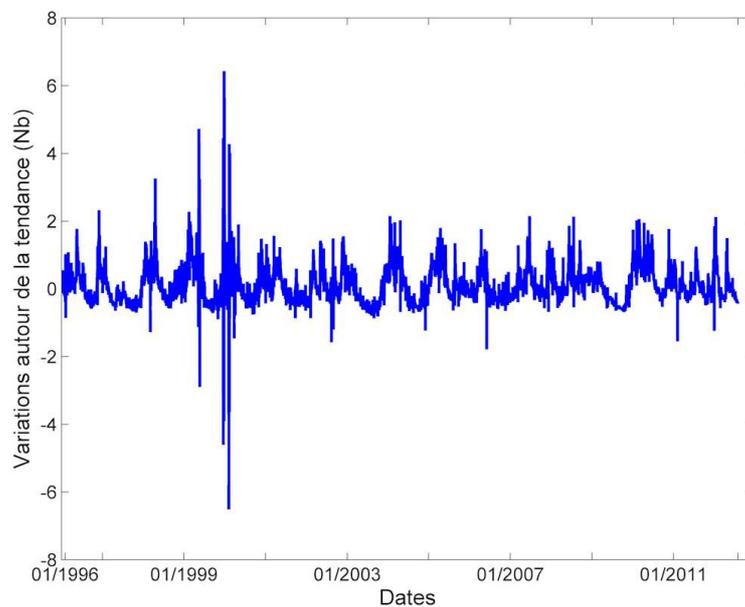


Figure 22: Variation des déplacements de l'extensomètre A13 autour de la tendance

Décomposition statistique des séries chronologique des « déplacements » (suite)

Analyse spatiale

Dans cette partie, nous calculons la grandeur que nous avons appelée « variations des déplacements autour de la tendance » pour plusieurs points de mesure situés dans la zone active (leur localisation est indiquée sur la figure 23).

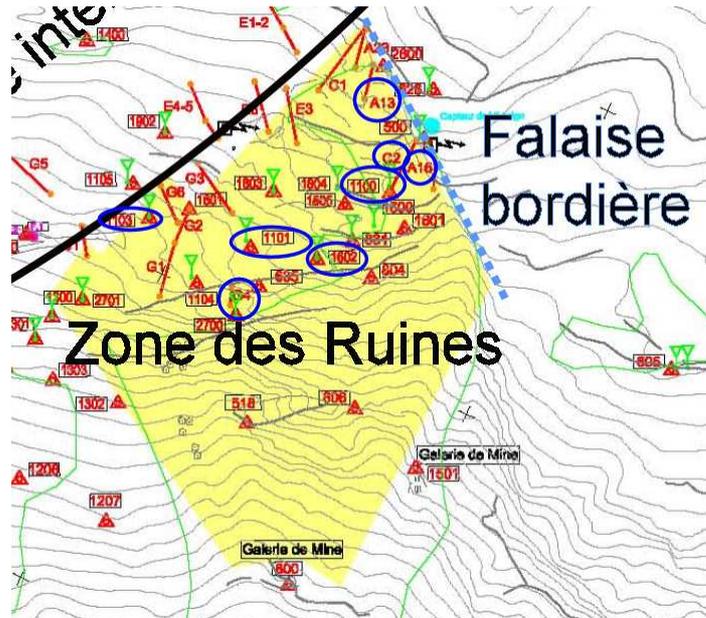


Figure 23: Localisation des capteurs de la zone active dont les valeurs de déplacements sont représentés sur la figure 24

Décomposition statistique des séries chronologique des « déplacements » (suite)

Analyse spatiale (suite)

Grphe des déplacements La figure des courbes de déplacements (figure 24) montrent des similitudes de variations et de formes de courbes mais les courbes restent distinctes.

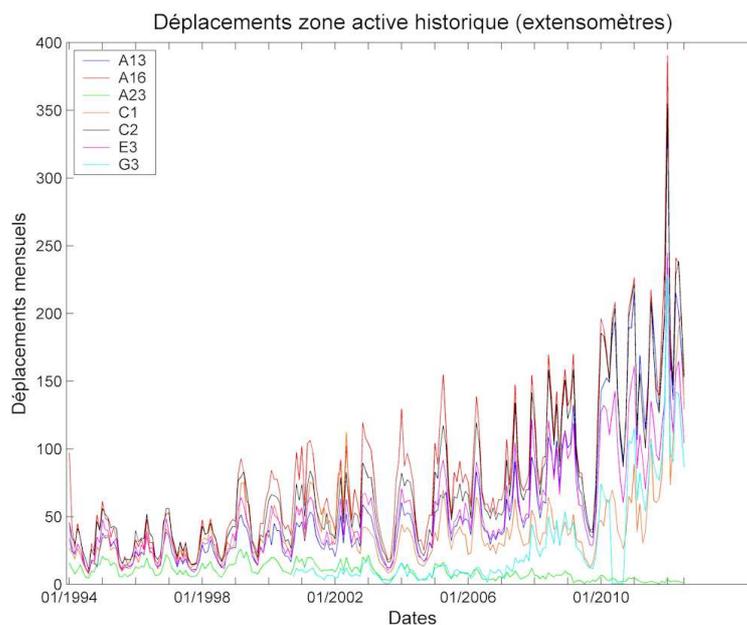


Figure 24: Superposition des courbes de déplacements en plusieurs points de mesure de la zone active

Décomposition statistique des séries chronologique des « déplacements » (suite)

Analyse spatiale (suite)

Graphe des variations autour de la tendance

Le graphe des variations de déplacements autour de la tendance montre une bonne superposition de toutes les courbes (figure 25). Cette grandeur semble indépendante du point de mesure et serait donc un invariant spatial. Ceci semble indiquer que suivant la localisation du point de mesure, la tendance est différente et influencée par la position locale (sur une lanrière, en retrait ...). Par contre, les variations autour de ces tendances sembleraient être identiques .

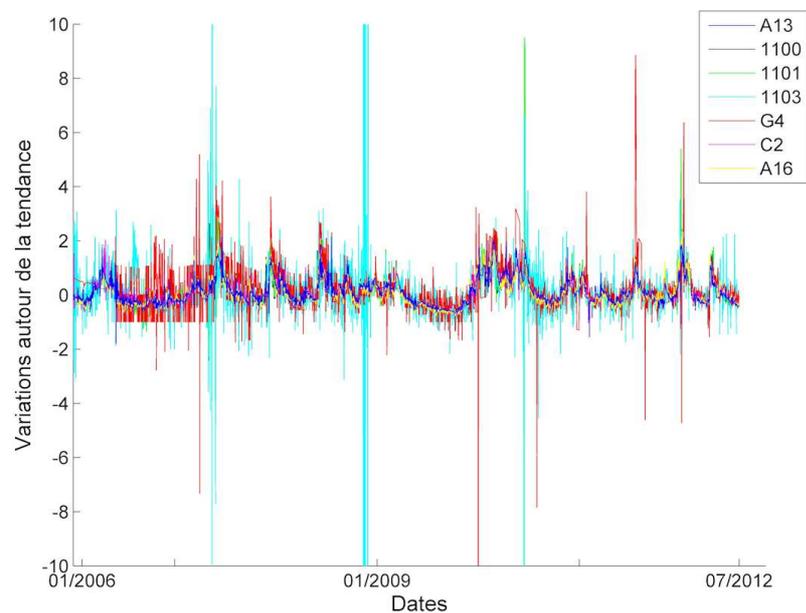


Figure 25: Superposition de la grandeur « variation des déplacements autour de la tendance » aux mêmes points de mesure de la zone active que précédemment

Décomposition statistique des séries chronologique des « déplacements » (suite)

Conclusions

Nous faisons le point sur les objectifs fixés en début de chapitre.

Modèle prédictif fonction du temps

Le modèle statistique déterminé est le produit de deux séries : une tendance et des résidus. La tendance peut être extrapolée alors que les résidus ne suivent pas un modèle particulier. Étant donné qu'une saisonnalité ne semble pas exister au sein de la série, la mise en place d'un modèle prédictif des déplacements en fonction du temps n'est pas possible.

Grandeur pertinente à corrélérer

A l'inverse, le calcul de la grandeur « variations des déplacements autour de la tendance » dans le cadre d'un modèle multiplicatif semble présenter des propriétés intéressantes :

- elle a une moyenne nulle ce qui autorise l'emploi ultérieur d'outils statistiques,
- elle est similaire en plusieurs points de mesure de la zone active (sorte d'invariant spatial).

Cette grandeur semble donc être pertinente pour rechercher une relation avec la pluie efficace.

Application du modèle vidange réservoir sur la grandeur variations des déplacements autour de la tendance

Modèle 1 (05/2003->12/2005)

Dans ce chapitre, nous reprenons donc le modèle simple de vidange réservoir testé précédemment et nous l'appliquons à la grandeur de déplacements construite suite à l'analyse statistique à savoir les variations autour de la tendance.

Calage Le modèle est calé sur la période de mai 2003 à décembre 2005 (figure 26). Le meilleur modèle (au sens de la minimisation de l'erreur moyenne quadratique) est obtenu pour les valeurs des paramètres $k=0,978$ et $\alpha=0,032$. Dans ce cas, l'erreur moyenne quadratique est égale à 0,3 et le coefficient de corrélation linéaire vaut 0,85 pour 1000 données ; la valeur est donc très significative.

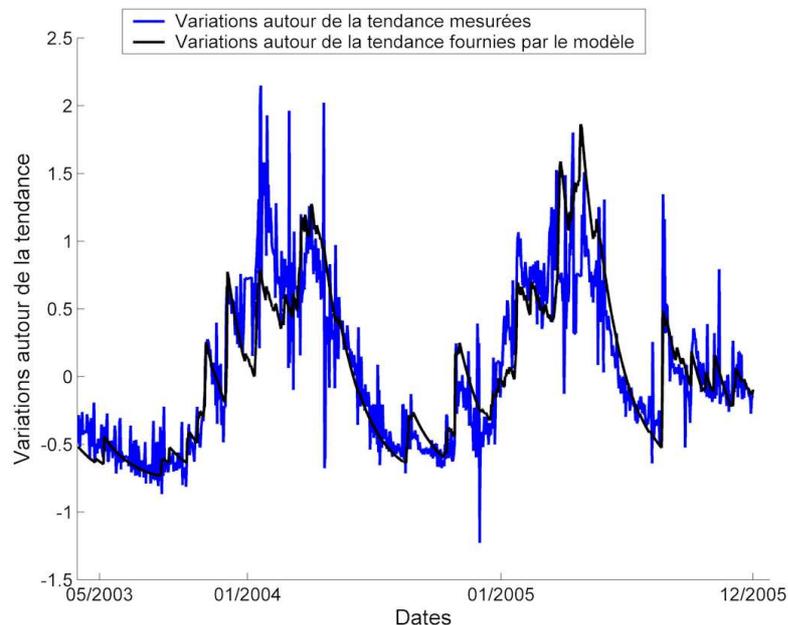


Figure 26: Variations des déplacements autour de la tendance mesurées et fournies par le modèle sur la période de calage (05/2003->12/2005)

Le modèle est ici appliqué pour décrire des variations de déplacements autour de la tendance en ratio ou pourcentage. L'erreur moyenne quadratique a été utilisée pour évaluer la qualité du modèle. Ce critère ne nous semblait pas forcément le plus approprié : c'est une moyenne arithmétique alors que l'on raisonne sur des pourcentages. Toutefois, la superposition des courbes montre une bonne concordance des mesures et du modèle. Nous avons donc conservé ce critère.

Application du modèle vidange réservoir sur la grandeur variations des déplacements autour de la tendance (suite)

Modèle 1 (05/2003->12/2005) (suite)

Extrapolation Le modèle déterminé est ensuite extrapolé jusqu'à la fin de l'année 2011. La courbe obtenue (figure 27) montre une approximation satisfaisante des mesures par le modèle. Le modèle semble être valable sur toute la période à l'exception d'une ou deux périodes localisées (2009). L'erreur moyenne quadratique évaluée sur la période de prévision est égale à 0,46 et le coefficient de corrélation linéaire est égal à 0,6. Cette valeur est très significative car elle est calculée sur un ensemble de 2000 données.

On dispose donc d'un modèle capable de décrire les variations de déplacements autour de la tendance en fonction de la pluie efficace sur toute la période d'étude de 2003 à 2011. Une relation constante dans le temps a donc été mise en évidence !

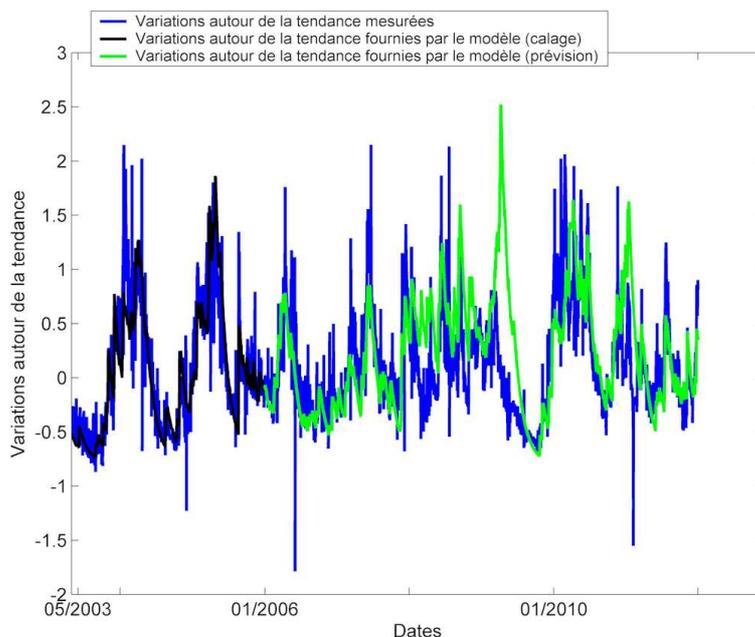


Figure 27: Extrapolation du modèle (2003->2005) sur toute la période d'étude et comparaison des résultats avec les mesures.

Application du modèle vidange réservoir sur la grandeur variations des déplacements autour de la tendance (suite)

Modèle 2 (05/2003->12/2008)

Pour faire le pendant symétrique à ce qui avait été effectué pour les déplacements, nous recherchons un modèle sur la période 2003 et 2008 avant de l'extrapoler.

Calage La figure 28 montre les résultats de calage du modèle sur la période 2003-2008. On remarque qu'il est possible de caler un modèle et que le modèle est pertinent : l'erreur moyenne quadratique est égale à 0,3 et le coefficient de corrélation linéaire vaut 0,78 (2000 données). Le modèle est défini sur cette période par les valeurs suivantes de paramètres : $k=0,972$ et $\alpha=0,092$

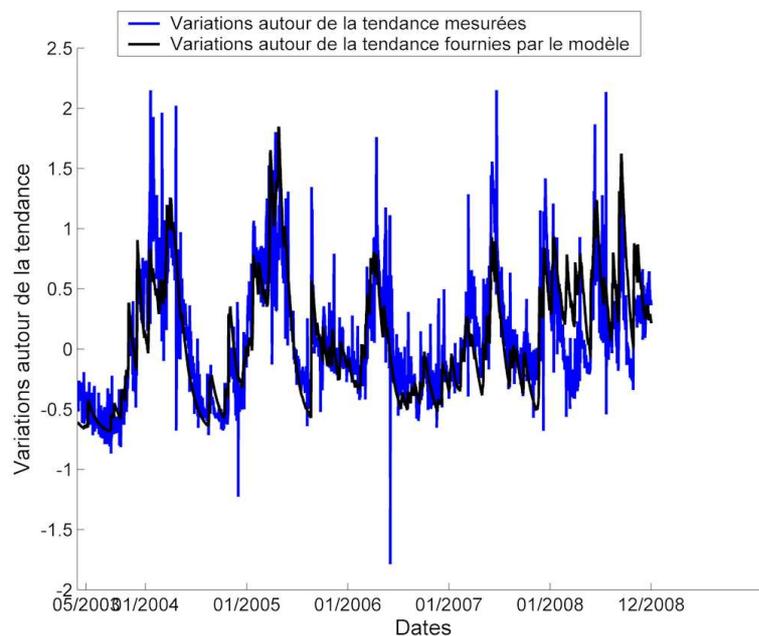


Figure 28: Variations des déplacements autour de la tendance mesurées et fournies par le modèle sur la période de calage (05/2003-> 12/2008)

Application du modèle vidange réservoir sur la grandeur variations des déplacements autour de la tendance (suite)

Modèle 2 (05/2003->12/2008) (suite)

Extrapolation L'extrapolation du modèle précédent jusqu'en 2011 est présentée sur la figure 29. On constate ici encore une bonne approximation (erreur moyenne quadratique égale à 0,5 et coefficient de corrélation égal à 0,6).

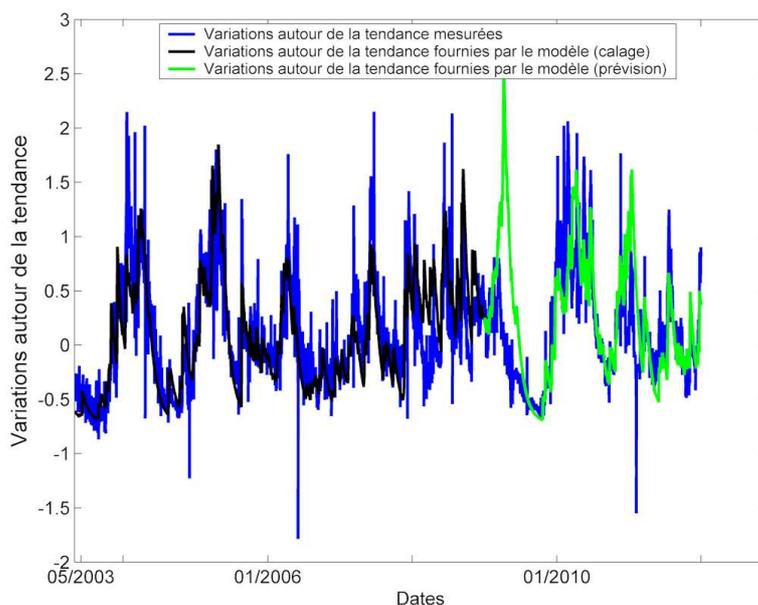


Figure 29: Extrapolation du modèle (2003->2008) sur toute la période d'étude et comparaison des résultats avec les mesures.

Application du modèle vidange réservoir sur la grandeur variations des déplacements autour de la tendance (suite)

Évaluation de la qualité du modèle

Les courbes d'extrapolation présentées ci-avant concernent une période de temps de 10 ans. Dans cette partie, des zooms sont réalisés de façon à mettre en évidence la qualité du modèle sur la période de calage, sur la période d'extrapolation et de montrer une zone où les grandeurs ne varient pas dans le même sens.

Calage – année 2004

Un zoom sur l'année 2004 montre plus finement la qualité de l'approximation du modèle sur la période de calage (figure 30). Le modèle rend bien compte des variations de déplacements autour de la tendance.

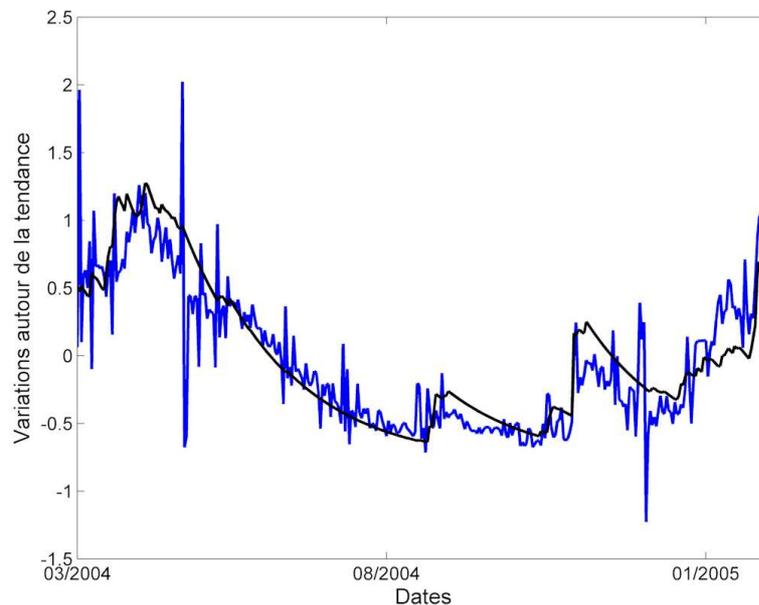


Figure 30: Approximation du modèle sur la période de calage (2004)

Application du modèle vidange réservoir sur la grandeur variations des déplacements autour de la tendance (suite)

Évaluation de la qualité du modèle (suite)

Extrapolation – année 2011 Un deuxième zoom sur l'année 2011 est présenté sur la figure 31, soit six ans après la fin de calage du modèle. Le modèle déterminé est persistant : il traduit encore bien les évolutions en fonction du temps des variations de déplacements autour de la tendance.

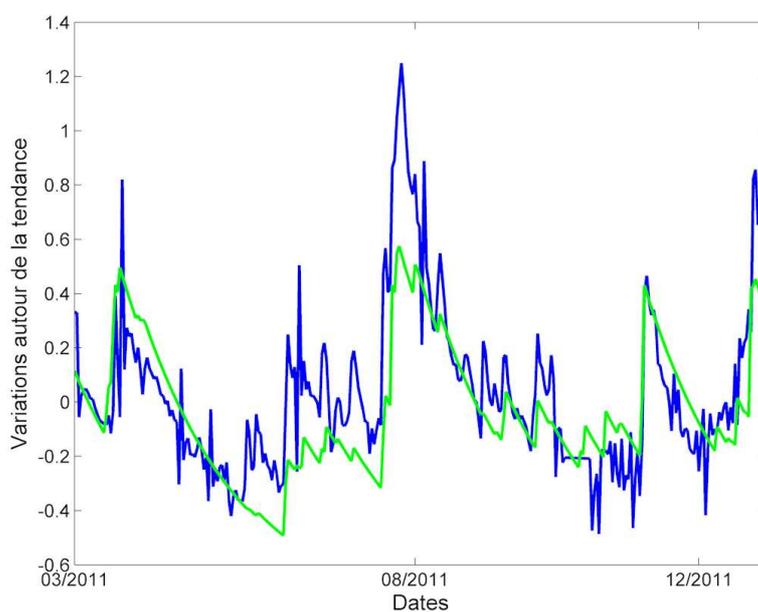


Figure 31: Extrapolation du modèle – Zoom sur l'année 2011

Application du modèle vidange réservoir sur la grandeur variations des déplacements autour de la tendance (suite)

Évaluation de la qualité du modèle (suite)

Extrapolation - 2009

L'année 2009 est par contre, une période où les courbes diffèrent (figure 32). On note en particulier, vers avril 2009, une baisse des déplacements alors que les déplacements fournis par le modèle continuent d'augmenter. En effet, les apports bruts d'eau élevés (218 mm en mars 2009 et 234 mm sur les 7 premiers jours d'avril 2009) s'accompagnent logiquement d'une hauteur d'eau croissante. Par contre, à partir de fin 2009, les courbes recommencent à se superposer.

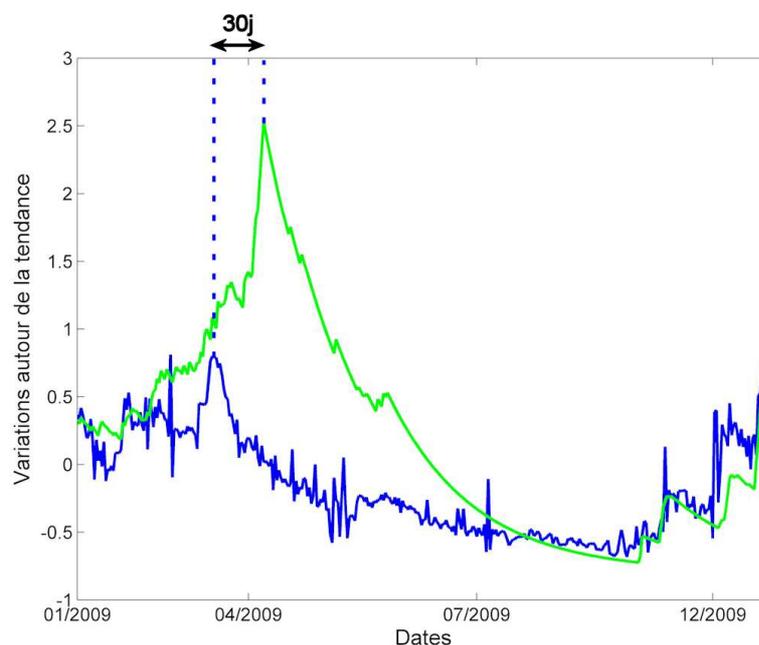


Figure 32: Extrapolation du modèle – Zoom sur l'année 2009

Propositions d'explication quant aux ralentissements des vitesses malgré les forts apports d'eau

Dans le versant des Ruines, les fractures s'ouvrent constamment, d'où une tendance globale à la dilatance. Dans certaines zones en profondeur, les fractures ont tendance à se refermer avec les déplacements. La perméabilité d'ensemble est donc irrégulièrement distribuée et peut fortement varier dans le temps. Les fortes précipitations concentrées fin mars et début avril 2009 auraient dû entraîner une élévation notable des gradients hydrauliques des circulations d'eau dans les principales fractures et des pressions interstitielles et donc une accélération brutale des déplacements de surface. Or à cette période, un ralentissement est observé. Une première explication peut être formulée : une grande partie des précipitations a ruisselé et ne s'est pas infiltré. Or, la partie supérieure de la zone frontale et du versant est absolument drainante sur une grande épaisseur. Il est donc plus probable que la perméabilité du massif était très élevée à cette période et que les forts débits dans les principales fractures ont été évacués très rapidement.

Application du modèle vidange réservoir sur la grandeur variations des déplacements autour de la tendance (suite)

Conclusions

Nous avons réussi à déterminer une relation entre les variations des déplacements autour de la tendance et les apports sous la forme de pluie efficace. Le modèle nécessite de calculer la hauteur d'eau dans un simple réservoir et lie de façon simple et affine les variations de déplacements autour de la tendance et la hauteur d'eau.

La relation mise en évidence est durable et est encore valable après 6 années d'extrapolation.

Bibliographie

P. Alfonsi, 1997, *Relation entre les paramètres hydrologiques et la vitesse dans les glissements de terrains, Exemples de La Clapière et de Séchilienne (France)*, Revue Française de Géotechnique

O. Béal, 2005, *Étude des corrélations entre le mouvement de versant de Séchilienne et les infiltrations – Prise en compte de l'évapotranspiration pour l'évaluation de la lame d'eau infiltrée*, Rapport de Travail de Fin d'Etudes

M. Bencivaga, 2008, *Influence des eaux d'infiltration sur les vitesses du mouvement des Ruines de Séchilienne*, Isère, Rapport de Travail de Fin d'Etudes

M-A. Chanut, 2011, *Ruines de Séchilienne : mise en évidence de relations entre déplacements de surface et apports hydriques*, Rapport de recherche

J-P. Duranthon , G. Bievre, M-A. Chanut, P. Potherat, 2011, *Ruines de Séchilienne – Rapport annuel de suivi du site Avril 2010 – Mars 2011* - CETE de Lyon

E. Gervreau, 1991, *Étude et prévision de l'évolution des versants naturels en mouvements*, Études et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées

F. Nicot, 1994, *Relations entre les données météorologiques et l'instabilité de versant*, TFE

M. Tenenhaus, 2007, *Statistique : méthode pour décrire, expliquer et prévoir 2ème édition*, Dunod

A. Vallet, C. Bertrand, J. Mudry, 2012, *Effective rainfall : a significant parameter to improve understanding of deep-seated rainfall triggering landslide*, Natural hazards and earth systems science, en cours de soumission

Conclusions

Mise en place d'un modèle reliant les variations de déplacements autour de la tendance et les pluies efficaces

Nous avons déterminé un modèle simple de vidange réservoir qui permet de mettre en relation les variations de déplacements autour de la tendance et les pluies efficaces.

Pour cela, le modèle a été construit en deux étapes :

- nous avons enlevé la composante « tendance » du signal des déplacements pour raisonner sur le signal « variations des déplacements autour de la tendance,
- nous avons calé un modèle vidange-réservoir à un seul réservoir à partir des deux séries : variations autour de la tendance et pluie efficace.

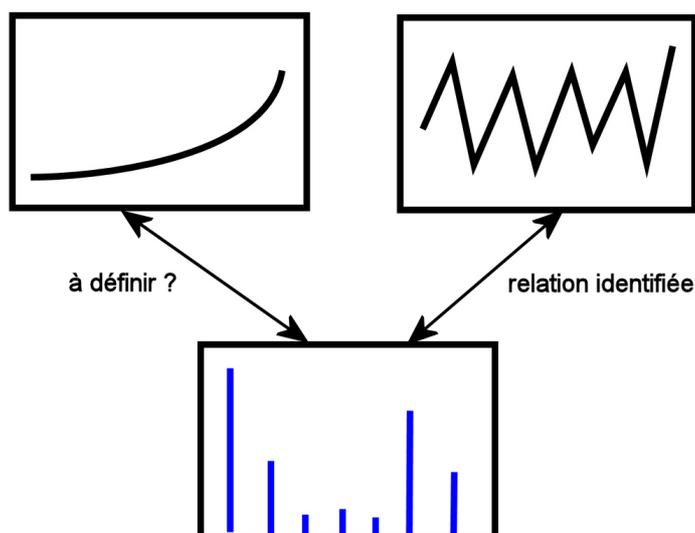
Nous avons ainsi évité la dérive obtenue pour tous les modèles mis en place jusqu'à présent. Le modèle obtenu est valable sur une période de 10 ans.

Ce modèle est de type « boîte noire » dans le sens où il relie les pluies efficaces aux déplacements de surface sans prendre en compte explicitement les mécanismes de déformation et de rupture du massif.

Mouvement somme de deux composantes

Au vu des développements précédents, le mouvement semble se décomposer en deux parties :

- une tendance de fond dont la relation avec les précipitations est à définir. Il semblerait que l'eau est un facteur déclenchant dans le sens où s'il n'y a pas d'eau, il n'y a pas de mouvement. Sa présence est donc indispensable mais bien que les apports d'eau soient comparables d'une année sur l'autre [Duranthon et al, 2011], le mouvement de tendance est sans cesse croissant (déstructuration progressive du massif rocheux en profondeur).
- des variations autour de cette tendance qui sont bien corrélées avec les hauteurs d'eau simulées par un modèle simple vidange réservoir. La relation mise en évidence est valable sur une longue plage de temps (10 ans).



Perspectives

Perspectives

L'objectif des développements effectués était de mettre en évidence une relation durable dans le temps entre déplacements et apports d'eau. Il peut être maintenant envisagé de traduire le modèle mis en place vers un outil de suivi voire de prévision. Par prévision, on entend une estimation d'un comportement et une étude de la déviation par rapport au comportement fourni par le modèle qui indiquerait un comportement anormal. Il faudra d'abord étudier la faisabilité de cette mise en place puis passer à la phase de réalisation en extrapolant la tendance et en intégrant les prévisions météorologiques.

D'autres analyses sont aussi à l'étude avec notamment l'emploi de la corrélation fenêtrée ou l'analyse par ondelettes .

Rédigé, le

La chargée d'Affaire



Marie-Aurélié CHANUT

Vu et approuvé, le

 La responsable du groupe
Risques Rocheux et Mouvements de Sols



Geneviève RUL



CETE de Lyon
25 avenue François Mitterrand
Case n°1
69674 BRON Cedex
Tél. : 04 72 14 30 30
Fax : 04 72 14 30 35
CETE-Lyon@developpement-durable.gouv.fr

Département Laboratoire de Lyon
25, avenue François Mitterrand
CASE n°1
69674 BRON CEDEX
Tél. : +33 (0)4 72 14 33 00
Fax : +33 (0)4 72 14 33 11
dll.cete-lyon@developpement-durable.gouv.fr

