

Mémoire de Master 2^{ème} année

Domaine	Ville, territoire et environnement
Mention	Géoenvironnement
Spécialité	Géorisques

ELABORATION D'UN SYSTEME D'ALERTE DES GLISSEMENTS DE TERRAINS

Année 2012-2013

Présenté par
Matouk AZIB

Responsable(s) de stage
Nicolas DESRAMAUT
Séverine BERNARDIE
Jean-Philippe MALET



Date de soutenance : 24 Septembre 2013

Remerciements :

Je tiens à remercier mes deux maitres de stage, Nicolas DESRAMAUT et Séverine BERNARDIE qui m'ont permis de travailler dans des très bonnes conditions. Je les remercie pour leurs gentillesse, leur sympatis, et pour leurs précieux conseils et explications.

Je remercie également tout les membres de l'unité RIG pour leur convivialité et la bonne humeur avec laquelle ils nous ont accueilli.

Je tiens aussi à remercier mon responsable académique, Mr Bedidi Ali pour sa disponibilité, sa compréhension et ses conseils.

Enfin je souhaiterai remercier ma famille, mes amis et toutes les personnes qui m'ont encouragé et soutenu.

Plan de travail :

Résumé.....	4
Abstract.....	4
I_ Introduction.....	5
II_ Présentation de l'organisme d'accueil.....	6
III_ Cadre du stage.....	8
IV_ Présentation des différents Modèles.....	8
1_ Modèle réponse impulsionnelle dit « boîte noire » (RI/IR).....	8
2_ Modèle viscoplastique « Herrera » (VP/MA).....	10
3_ Modèle couplé (RI-VP/IR-MA).....	12
V_ Présentation des différents glissements de terrains	12
1_ définition du glissement-coulée.....	12
2_ Glissements de Barcelonnette.....	13
A_ Glissement de terrain de Super Sauze.....	16
B_ Glissement de terrain de La Valette.....	16
3_ Glissement de terrain de La Clapière.....	17
VI_ Système de suivi des différents glissements de terrains.....	18
VII_ Présentation des différentes méthodes.....	23
VIII_ Résultats des modèles sur Super Sauze.....	24
IX_ Application sur les autres sites	26
X_ Conclusion.....	29
Bibliographie.....	30

Liste des figures :

Figure 1 : Organigrammes du BRGM (a) et de la DRP (b).....	7
Figure 2 : Schéma du modèle réponse impulsionnelle.....	10
Figure 3 : Schéma explicatif de l'application du modèle Herrera et al.....	10
Figure 4 : Schéma optimisé du modèle couplé.....	12

Figure 5 : Position des ‘glissements coulées’ dans les mouvements de versants.....	13
Figure 6: localisation du bassin de Barcelonnette et des glissements de La Valette et de Super-Sauze.....	14
Figure 7 : Photos des glissements de terrains de La Valette (à gauche) et de Super-Sauze(à droite).....	14
Figure 8 : Morpho-structure du bassin de Barcelonnette.....	15
Figure 9 : Localisation des différents instruments de surveillance du glissement de Super-Sauze.....	16
Figure 10 : a : coupe géologique du glissement de La Clapière (CETE Méditerranée), b : Schéma structural et hydrologique de La Clapière.....	18
figure 11 : Localisation des différents instruments de surveillance et de mesures du glissement de Super-Sauze.....	19
Figure 12 : Graphes représentant les déplacements Est en fonction des déplacements Nord au niveau des glissements de la Valette « lv12 » (a), La Clapière « CLAP2 » (b) et Super-Sauze « SAZ 1 » (c).....	21
Figure 13 : Localisation des différents instruments de surveillance des glissements de La Valette (b) et de La Clapière (a).....	22
Figure 14 : Schéma de prédiction.....	24
Figure 15: Prédiction des déplacements et calcul des RMSE sur la station GPS « SAZ2 » avec le modèle viscoplastique.....	24
Figure 16 : Prédiction des déplacements et calcul de RMSE sur la station GPS « SAZ1 » avec les trois modèles.....	25
Figure17 : Prédiction de déplacement et calcul de la RMSE au niveau de la station GPS « LVAL 1 » avec le modèle viscoplastique.....	27
Figure 18 : prédiction des déplacements et calcul de la RMSE au niveau de la station GPS « CLAP 1 » avec le modèle viscoplastique.....	28

Résumé :

Les glissements de terrains constituent un risque majeur qui se produit principalement dans les zones montagneuses, actionné naturellement par les séismes, l'érosion et les fortes précipitations ou par l'activité humaine (changement de morphologie de talus, excavation et changement de drainage).

Dans le souci de protéger la population et leurs biens, le projet SISCA a été développé afin de modéliser l'évolution et la surveillance des glissements de terrains et de prédire les périodes de crises (départ en coulées).

La modélisation des vitesses de déplacement des glissements de terrains peut se faire par la définition d'une relation entre phénomènes déclencheurs (la pluie, la neige et la source) et vitesse de déplacement, par le biais d'une relation fonctionnelle.

Trois modèles ont été développés, un modèle réponse impulsionnelle reproduisant la fluctuation du niveau de la nappe et/ou de la vitesse, un modèle viscoplastique (Herrera et al., 2009) constitué de deux parties, une partie hydrogéologique reliant les précipitations aux niveau piézométrique et une partie cinématique qui calcule les variations des vitesses à partir des pressions interstitielles, et modèle couplé combinant les deux précédents modèles.

Les bons résultats obtenus après l'application de ces modèles sur le glissement de terrain de Super-Sauze nous a amené à les appliquer sur d'autres sites afin de le valider dans différents contextes.

Le choix s'est porté sur les glissements de LaValette et de La Clapière ; le premier, plus ou moins similaire au glissement de Super-Sauze, se développe dans les terres noires avec une masse mobile plus importante, une surface de cisaillement plus profonde et présente un risque sur les habitations qui se trouve à l'aval ; le second est un glissement rocheux qui affecte les gneiss migmatitiques sur une surface de cisaillement se situant à 120 m de profondeur.

Abstract:

Landslides are a major risk occurs mainly in mountainous areas, naturally activated by earthquakes, erosion and heavy rainfall or human activated (change of slope morphology, excavation and drainage change).

In order to protect people and their property, SISCA project was developed to model the development and monitoring of landslides and predict crises periods (starting cast).

Modeling travel speeds landslides can be done by defining a relationship between triggers phenomena (rain, snow and the source) and speed through a functional relationship.

Three models have been developed. An impulse response model "IR" reproducing the fluctuation of the groundwater and / or speed, a mechanical model "MA" (Herrera et al., 2009) consists of two parts, one part hydro linking rainfall to groundwater level and a

kinematic part that calculates the velocity variations from the pore pressure, and coupled model combining the two previous models.

The good results obtained after the application of these models on the landslide Super-Sauze has led us to apply them to other sites in order to validate it in different contexts.

The choice fell on the slides and La Vallette on Clapière, the first more or less similar to slip Super-Sauze, grows in muck soils with higher moving mass, surface and deeper shear presents a risk to homes which is downstream, the second is a rock slide that affects migmatitic gneiss on a surface shear ranging to 120 m depth.

I_ Introduction :

Les glissements de terrains sont des mouvements de terrains qui se manifestent par un déplacement de masses de terrain déstabilisés par des facteurs naturels ou anthropiques. Il s'agit de l'un des plus importants risques majeurs qui menace l'Homme et ses infrastructures d'où la nécessité de l'étude et du suivi de ces derniers.

Les systèmes de confortement (ou de protection) des glissements de terrain sont généralement peu efficaces face à l'importance des masses de matériaux déplacées par le mouvement de terrain d'où l'intérêt de prévoir ces derniers.

Le projet est une continuité du projet SISCA, il est élaboré pour améliorer la compréhension des mécanismes déclencheurs des crises (coulées) dans le but de développer un système de surveillance, de prédiction et d'alerte qui permettra une meilleure gestion des crises et une meilleure gestion de la protection des personnes et des biens.

II_ Présentation de l'organisme d'accueil :

Ce projet de stage est une collaboration entre le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) (<http://www.brgm.fr/>) et l'IPGS (Institut de Physique du Globe de Strasbourg) (<http://eost.unistra.fr/recherche/ipgs/>)-CNRS. Il a été financé par l'OMIV (Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités de versants) (<http://omiv.osug.fr/>).

Dans le cadre de ce travail, le BRGM s'occupe de l'élaboration des différents modèles de prédiction et l'IPGS-CNRS et l'OMIV s'occupent de la gestion et la surveillance des différents glissements de terrains et la récupération des différentes données relatives à ces derniers.

J'ai effectué mon stage au sein de du BRGM à Orléans qui est un établissement de référence dans les domaines des sciences de la terre, de la gestion durable des ressources et la gestion des risques du sol et du sous-sol.

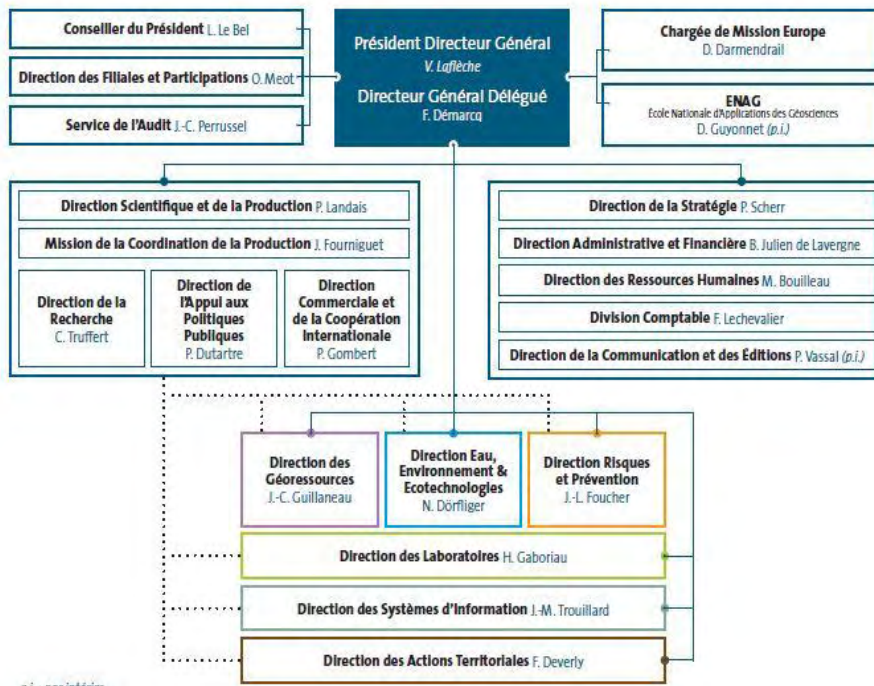
Le BRGM est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) créé en 1959. Il est placé sous la tutelle du ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, du ministre de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministre du Redressement productif.

Ces missions principales sont :

- La recherche scientifique.
- L'appui aux politiques publiques.
- La coopération internationale.
- La sécurité minière.
- La formation/ENAG (Ecole nationale d'applications des géosciences).

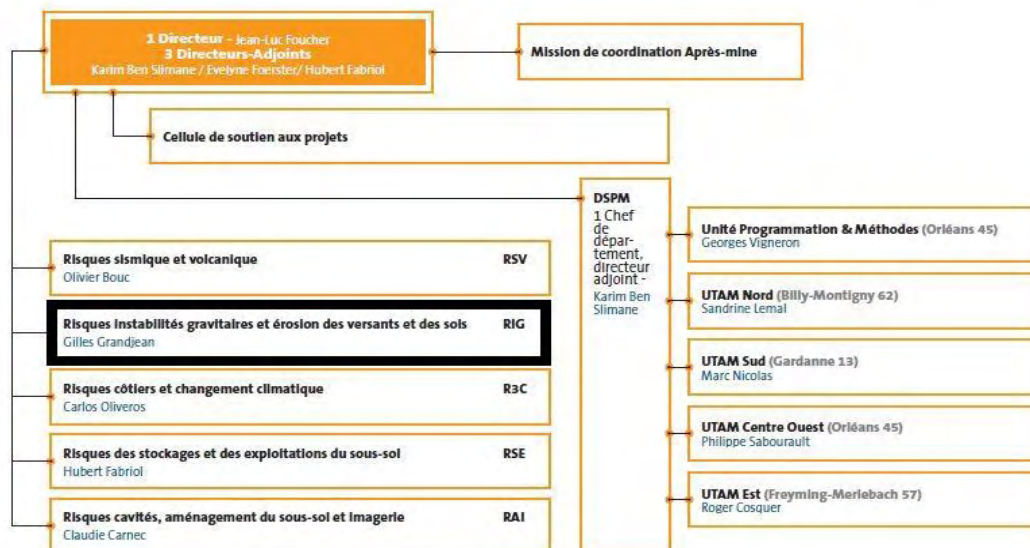
Mon stage s'est déroulé au sein de la Direction des Risques et prévention (DRP) au niveau de l'unité Risques des instabilités Gravitaires et érosion des versants et des sols (RIG) (Rectangle noir, figure 1.b).

Organigramme du BRGM



a)

Organigramme simplifié de la Direction des Risques et Prévention



b)

Figure 1: Organigrammes du BRGM (a) et de la DRP(b) (BRGM (<http://www.brgm.fr/>), 2013)

L'unité RIG a pour mission :

- L'évaluation des risques liés aux instabilités des versants et des sols :
 - Glissement de terrain (glissement coulées, coulées boueuses,...)
 - Chutes de blocs.
 - Mouvement de terrains liés aux cavités.
 - Le retrait-gonflement des argiles.
 - L'érosion

- L'analyse de l'exposition du territoire (vulnérabilité) impacté par ces phénomènes (aléas).

III_ Cadre du stage :

Les précipitations ont une grande influence sur les évolutions des glissements de terrains et leurs vitesses de déplacements.

Il est la continuité du projet SISCA qui a été initié en 2009. Il vise à améliorer la connaissance des facteurs déclencheurs et leurs mécanismes, à développer un système de surveillance et à développer un modèle numérique de de prédiction et d'alertes des crises des mouvements de terrains

Il est la continuité de trois stages réalisés par Jimmy ZURCHER (septembre 2010 – mars 2011), Gaëtan RUSSO (Mars 2011 – Septembre 2011) et Maxime GOURLAY (Mars 2012 – Septembre 2012) les deux premiers stages représentaient les premières approches de prédiction sur le glissement de terrain de Super-Sauze et enfin le dernier stage consisté à améliorer les premiers modèles déjà réalisés et l'automatisation de ces derniers.

Ma contribution consistera à améliorer les modèles mis en place par les précédents stages et l'application de ces derniers sur d'autres glissements de terrains (La Valette, La Clapière).

IV_ Présentation des différents modèles :

1_Modèle réponse impulsionnelle dit « boîte noire » (RI/IR) :

C'est la réadaptation du logiciel TEMPO sous un algorithme Matlab.

Le logiciel Tempo a été développé par le BRGM pour la réalisation des études hydrogéologiques et hydrogéochimiques, basé sur un approche globale de types boîte noire (Pinault, 2007).

En utilisant des méthodes de traitement de signal et d'optimisation, il permet de relier les facteurs déclencheurs aux phénomènes physiques associés sous la forme d'une fonction de transfert.

Une telle approche permet la modalisation et la création des chroniques de débit d'un exutoire ou de niveau nappe à partir de chroniques de précipitations affinées par des données relatives à la température ou l'évapotranspiration. L'approche globale du logiciel le rend relativement polyvalent d'où la possibilité de remplacer les données de sorties à condition qu'ils s'agissent de séries temporelles impulsionnelles et corrélées aux signaux d'entrées. Dans notre cas, on prendra les vitesses de déplacements qui représentent le déplacement relevé entre deux pas de temps consécutifs et qui peuvent être considérées comme une série d'impulsions contrairement au déplacement cumulé.

Le signal de sortie $S(t)$ est obtenu par le produit de convolution (noté*) du signal d'entrée $E(t)$ par la réponse impulsionnelle (la fonction de transfert calculée) $G(i)$.

Sachant que E et S sont des signaux temporels, on discrétise le temps en n (entier naturel) intervalles de temps de longueur dt . K étant l'ordre de la réponse impulsionnelle, on a le produit de convolution discret :

$$S(n.dt) = G * E(t) = \sum_{i=1}^k G(i.dt) E((n-i+1).dt)$$

Le calcul de la fonction de transfert peut se faire par deux méthodes : par un modèle non-paramétrique qui consiste en l'inversion du produit de convolution, ou par un modèle paramétrique qui consiste à prédéfinir la fonction de transfert et optimiser (gradient, minimisation quadratique et inversion de l'algorithme de Levinson) les différents paramètres.

Le modèle paramétrique, contrairement au modèle non-paramétrique, présente un moins bon ajustement entre les données observées et modalisées mais définit une fonction de transfert représentative de la réalité physique.

Le modèle paramétrique de référence est le produit de convolution d'une Gaussienne qui traduit la recharge du réservoir hydrogéologique et d'une Exponentielle qui traduit la vidange de ce dernier. La réponse impulsionnelle s'écrit :

$$G(i) = \exp(-\ln(2)(i-T/D)^2) * \exp(-i \ln(2)/L)$$

Les trois degrés de liberté sont alors:

- $T \geq 0$: la position de la Gaussienne (~ le retard de la recharge par rapport à la pluie)
- $D > 0$: la largeur à mi-hauteur de la Gaussienne (~la durée du phénomène)
- L : le $\frac{1}{2}$ tarissement

Chaque fonction de transfert est rendue d'aire unitaire et multipliée par un coefficient fixé par la loi de conservation reliant les entrées et les sorties.

$$c = \sum S(t) / \sum E(t).$$

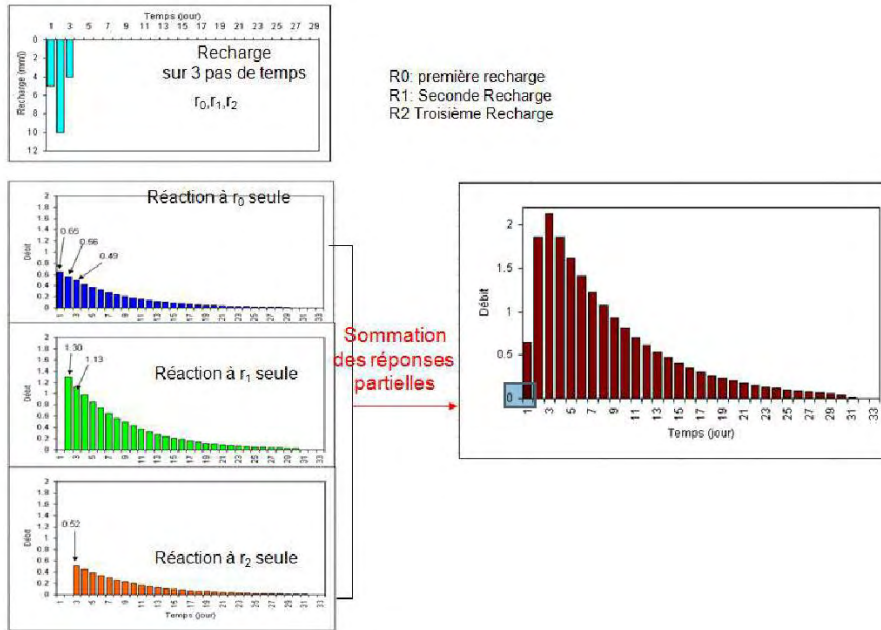


Figure 2: Schéma du modèle réponse impulsionnelle (Gourlay, 2012).

2_Modèle viscoplastique « Herrera » (VP/MA):

C'est un modèle à base physique fournie par Herrera et al (2009), un modèle 1D.

Ce modèle est composé de deux parties, une partie hydrogéologique qui relie les précipitations aux variations de pression de nappe et une partie cinématique qui calcule la variation des vitesses suivant l'évolution des pressions interstitielles.

Le modèle est caractérisé par une pente infinie d'angle α , une hauteur de nappe dépendant du temps $z(t)$, une épaisseur de masse mobile h et d'une bande cisaillement d'épaisseur d .

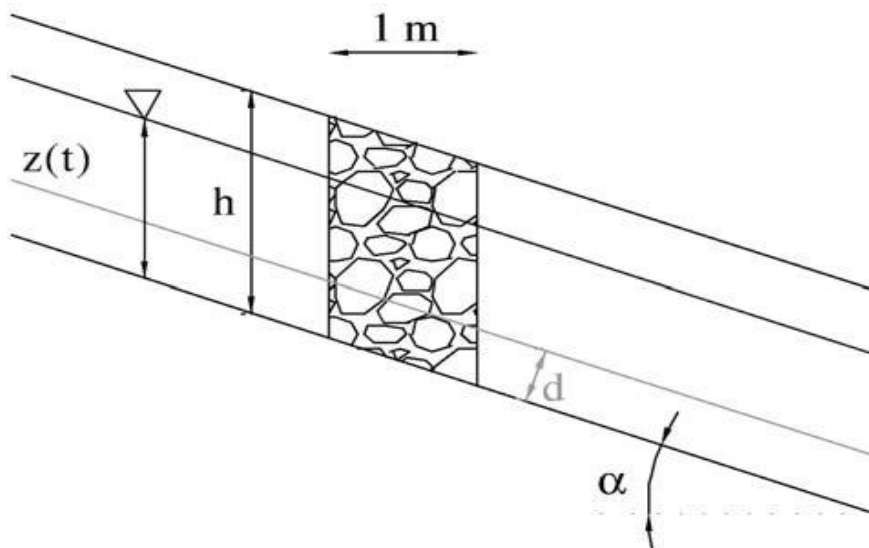


Figure 3 : schéma explicatif de l'application du modèle Herrera et al. (Herrera, 2009)

Dans la partie hydrogéologique, l'augmentation de la pression interstitielle due à la recharge de la nappe est obtenue par l'équation :

$$P_{\text{recharge}}(t) = \gamma \cos(\alpha)^2 z_{\text{recharge}}(t)$$

$$\text{Avec : } z_{\text{recharge}}(t) = (I_{\text{rainfall}}(t)/1000) * (1/n)$$

Et la dissipation du fait la consolidation est obtenue par l'équation :

$$P_{\text{dissipation}}(t) = e_{\text{pwo}} e^{-t/T_v}$$

$$e_{\text{pwo}} = Z_{\text{max}}(t_0) \gamma_w \cos(\alpha)^2 e^{t_0/T_v}$$

t_0 : jour de la dernière recharge de la nappe

$$P_w(t) = P_{\text{recharge}}(t) + P_{\text{dissipation}}(t)$$

Après discrétisation de la dérive de la pression interstitielle on obtient l'équation de la partie hydrogéologique du modèle viscoplastique (connexion pluie-niveau piézométrique) suivante :

$$P_w(t+1) - P_w(t) = \frac{\gamma_w \cos(\alpha)^2 I_{\text{rainfall}}}{1000} * \left(\frac{1}{n}\right) * \Delta t + \gamma_w \cos(\alpha)^2 Z_{\text{max}} \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_v}\right)\right) \exp\left(-\frac{k}{T_v}\right)$$

Avec :

Z_{max} , le plus haut niveau piézométrique atteint depuis la dernière phase de recharge (en m),

k , le nombre de jours écoulés depuis la dernière recharge (en jour) soit $t - t_0$,

P_w , la pression interstitielle dans la masse mobile (en Pa),

I_{rainfall} , l'intensité de pluie au jour t (en mm/jour),

n , la porosité,

T_v , le temps de consolidation celui-ci contrôlant alors le temps de dissipation des pressions interstitielles (équivalent au temps de tarissement du modèle Boite Noire) (en jour),

α , la pente du glissement (en °),

γ , le poids spécifique de l'eau (en N/m³).

Δt , pas d'échantillonnage (1 jour).

e_{pwo} , excess pore pressure.

Dans la partie cinétique, après le calcul des pressions interstitielles, on obtient les vitesses de façon itérative avec l'équation suivante :

$$V_{\text{it}_{\text{mod}}}(t+1) = \left[\frac{1}{(m/\Delta t)} + (\mu/d) \right] \left[\frac{m}{\Delta t} V_{\text{it}_{\text{mod}}}(t) + m g \sin(\alpha) \cos(\alpha) - (c + (m g \cos(\alpha))^2 - P_w(t+1)) \tan(\phi) \right]$$

Avec :

m , la masse surfacique (en kg/m²), définie par $m = \rho \cdot h$, avec h la hauteur de la masse mobile.

d , l'épaisseur de la zone de cisaillement (en m),

g , l'accélération de pesanteur (en m/s²),

P_w , la pression interstitielle (en Pa),

c , la cohésion (en Pa),
 μ , la viscosité apparente (en Pa.s),
 ϕ , l'angle de frottement interne (en °),
 Δt , pas d'échantillonnage.

3_Modèle couplé (RI-VP/IR-MA) :

C'est la combinaison des deux modèles précédents dans lequel le passage précipitation-niveau piézométrique est modélisé par la partie réponse impulsionnelle et le passage niveau piézométrique-vitesse est modélisé par la partie viscoplastique.

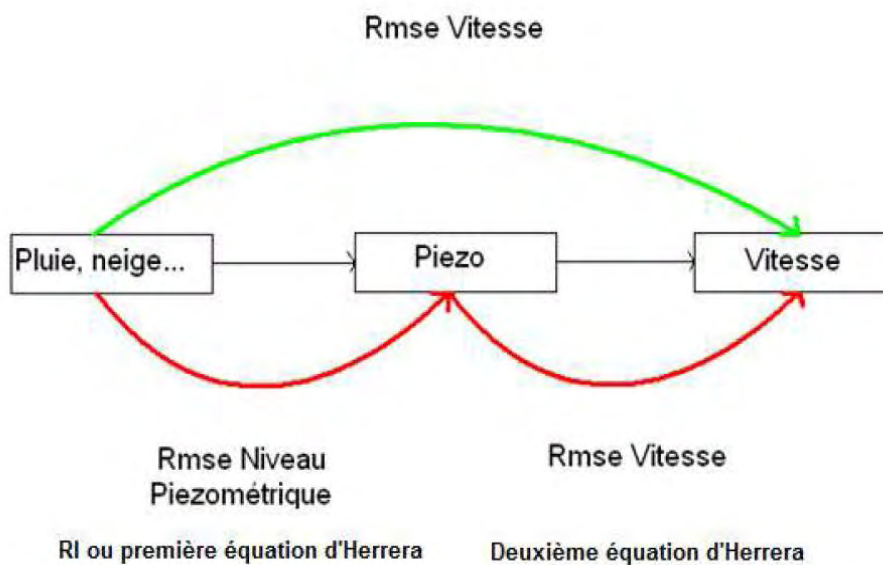


Figure 4 : Schéma optimisé du modèle couplé (Gourlay, 2012).

Il est caractérisé par deux approches qui diffèrent par la prise en compte ou non du niveau piézométrique, une approche globale (vert) qui minimise la RMSE entre les vitesses et la prédiction du niveau piézométrique, une approche en deux optimisations (rouge) qui minimise la RMSE entre les niveaux piézométriques observés et modélisés pour fournir des données d'entrées plus réalistes pour la partie niveau piézométrique-vitesse.

V_ Présentation des différents glissements de terrains :

1_Définition de glissement coulée :

Les formations géologiques d'argiles fissurées, d'argilites, de schistes, d'argiles sur-consolidées à plasticité moyenne, de marnes et d'ardoises sont généralement favorables au développement de glissements-coulées. Ils sont déclenchés par des mécanismes de déformations cisailantes, de ruptures locales et de phénomène de fluidification (Malet et al., 2005)

Le glissement coulée se développe dans les matériaux argileux ou marneux et représente souvent une menace importante sur l'environnement par l'importance des volumes de masses de terrains mobilisés, ce dernier peut rapidement évoluer en coulées boueuses dévastatrices.

Il est caractérisé par une fraction de solide supérieur à 80% et une teneur en eau faible proche de la limite de plasticité (Le Mignon et Cojean, 2002).

Les glissements-coulées sont situés entre les glissements proprement dit et les laves torrentielles (figure 5).

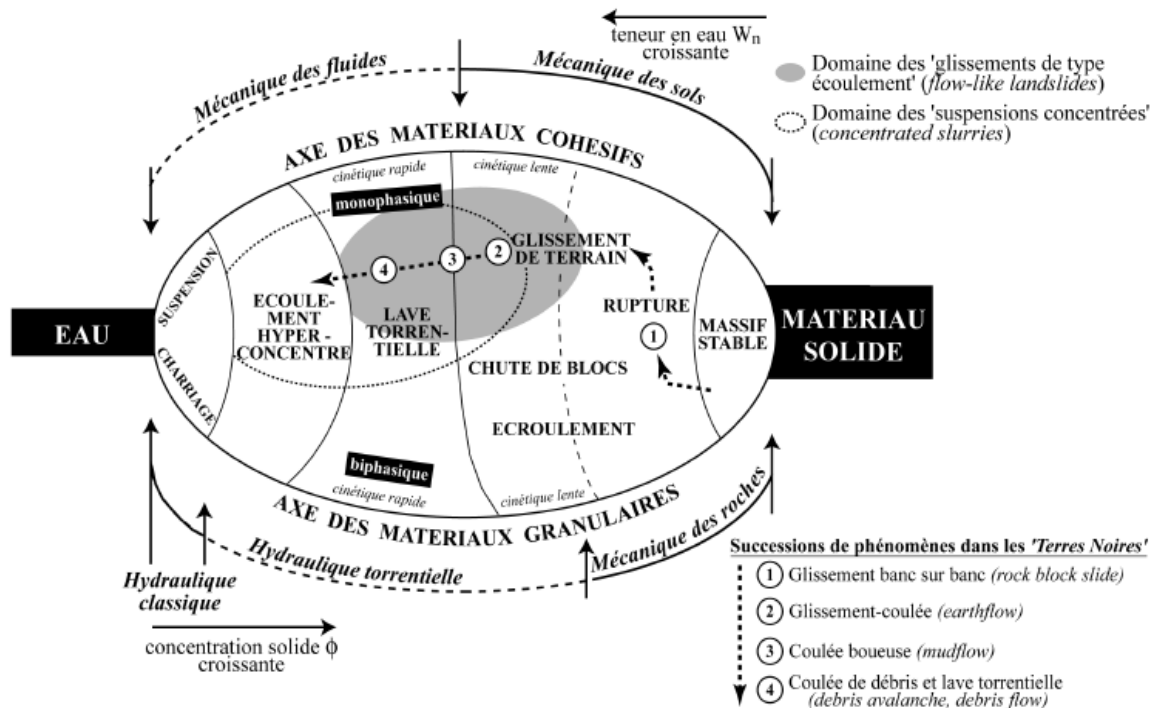


Figure 5 : Position des 'glissements coulées' dans les mouvements de versants (Malet, 2003).

2_Glissements du bassin de Barcelonnette :

Le bassin de Barcelonnette est situé à 90 km au Nord-Ouest de Nice, délimité par les massifs cristallins de l'Argentera et du Mercantour au Sud, le massif des Ecrins au Nord-Ouest et le Queyras au Nord-Est (Malet, 2003).

Nous nous intéresserons à la vallée de l'Ubaye qui est caractérisée par un haut des versants façonné dans les formations très résistantes (calcaires, flysch) avec des altitudes allant de 1900 à 2100m et des pentes supérieures à 45°, et des versants intermédiaires constitués de marnes souvent recouvertes par des formations morainiques glacières et des colluvions avec des pentes de 20° sur la rive droite et de 25° sur la rive gauche.

L'érosion a permis l'ouverture d'une fenêtre tectonique dans les nappes de charriage (calcaire, flysch) laissant apparaître les terrains sédimentaires autochtones. Les versants ont subi un ravinement intense responsable d'un paysage de « badlands » (Roubines). La morphologie de la vallée a été fortement remodelée par le glacier de l'Ubaye lors de la dernière glaciation au Pléniwurm (15000 à 20000 ans).

Les formations sédimentaires autochtones sont affectées par plusieurs glissements-coulées parmi les plus importants, on trouve les glissements de La Valette et de Super-Sauze.

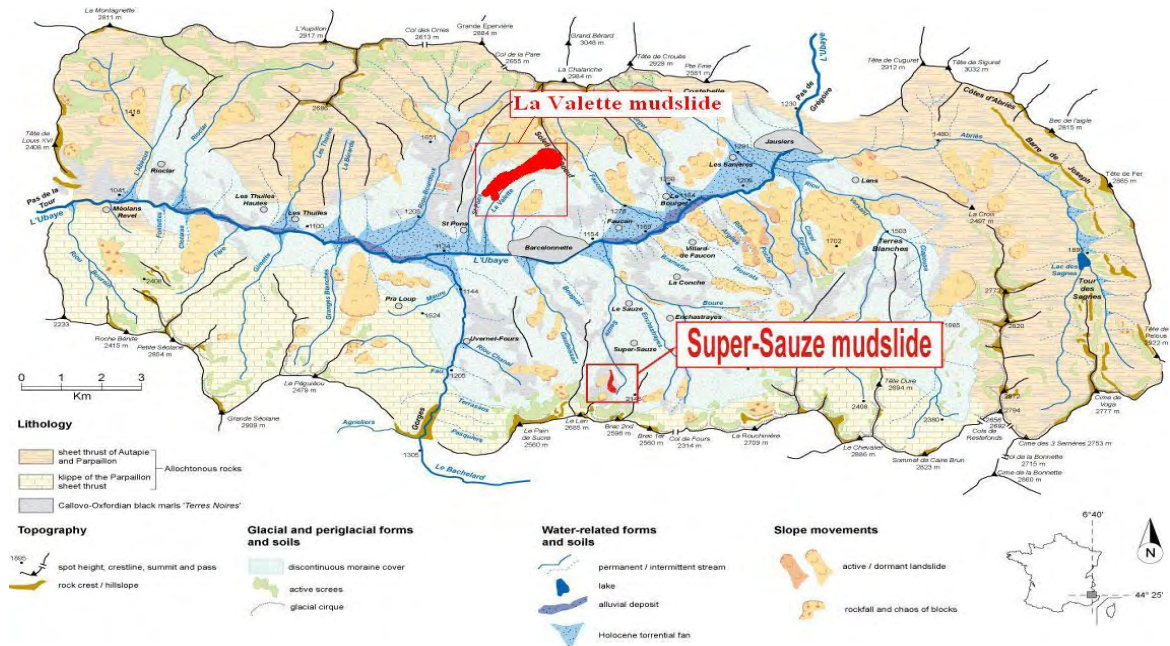


Figure 6 : localisation du bassin de Barcelonnnette et des glissements de La Valette et de Super-Sauze (OMIV (<http://omiv.osug.fr/>))



Figure 7 : Photos des glissements de terrains de La Valette (à gauche) et de Super-Sauze (à droite) (source : OMIV (<http://omiv.osug.fr/>)).

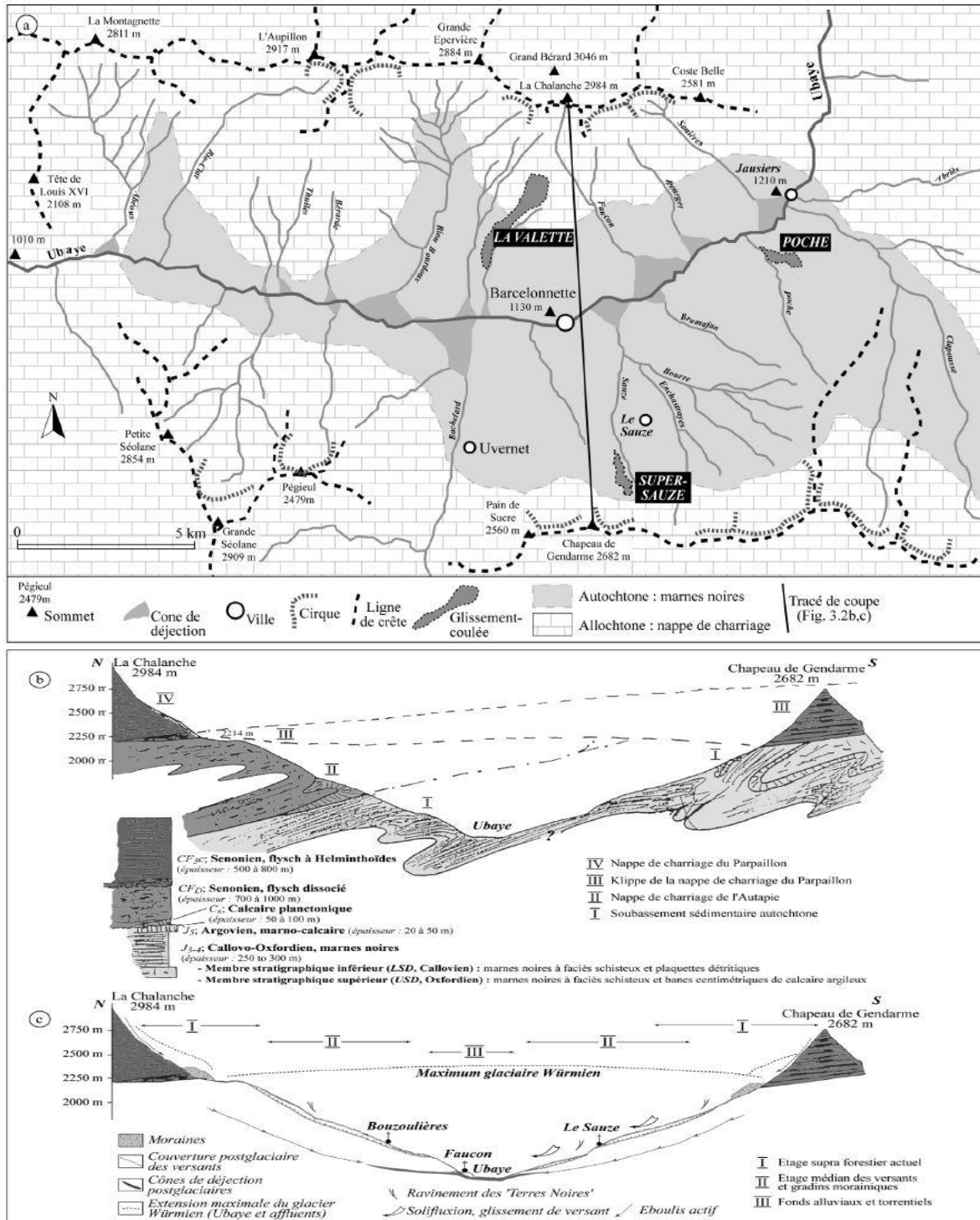


Figure 8 : Morpho-structure du bassin de Barcelonnette (Malet, 2003).

a)_ Glissement de terrain de Super-Sauze :

Il est localisé en rive gauche de la vallée de l'Ubaye, au sud de Barcelonnette, dans le bassin de réception du torrent Sauze, à la base du glacier rocheux de la Goutta (figure 6). Déclenché en 1960, il se développe dans les marnes noires du callovo oxfordien et s'étend sur une longueur de 820 m entre les altitudes 2105 m et 1740 m avec une pente moyenne de 25° et une superficie de 17 ha (Travelletti, 2011) (figure 9).

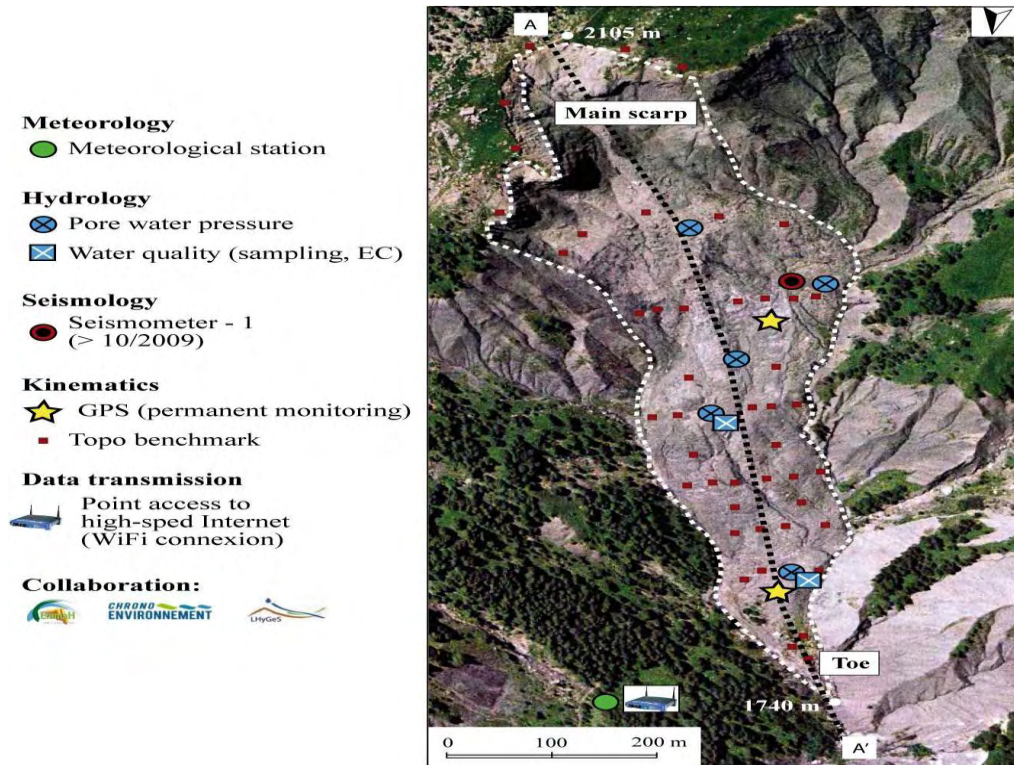


Figure 9 : Localisation des différents instruments de surveillance du glissement de Super-Sauze (source : OMIV).

b)_ Glissement de terrain de La Valette :

Le glissement de la Valette est situé sur la rive droite de l'Ubaye, dans le bassin du torrent de la Valette (figure 6). Il a été déclenché en mars 1982 par une rupture profonde au niveau du contact des nappes de charriage et les marnes autochtones ce qui a engendré la déstabilisation progressive des dépôts morainiques à l'aval. La surface concernée était de 26 ha en 1983, 32 en 84, 50 en 1985 et actuellement elle est d'environ 92 ha.

Le soubassement est constitué de marnes autochtones : les terres noires jurassiques (Callovo-oxfordien). Surmontant ces terres noires, se trouve la nappe de l'Autapie constituée de Flysch dissocié, un ensemble complexe de schiste calcaire et de grès très fracturés. Cette dernière formation, particulièrement perméable, forme un réservoir d'eau pour l'ensemble du versant.

La rupture s'est produite au niveau du contact anormal, contact marqué par une ligne de sources et quelques écailles de calcaire planctonique

Le déclenchement et l'évolution du glissement sont étroitement liés aux conditions hydrogéologiques du versant.

Les marnes noires autochtones et imperméables retiennent une nappe d'eau qui imprègne les flysch allochtones, très faillés, constituant un réservoir d'eau (Combes, 1990 ; Le Mignon, 2004). Le plan de contact entre les deux formations canalise les eaux vers des exutoires naturels (dont la source de La Valette). Ce sont ces injections d'eau qui ont favorisé la rupture principale en 1982. En contrebas, les argiles glaciaires, désorganisées par le poids des matériaux provenant de la rupture principale, sont devenues très perméables. Elles facilitent l'infiltration et la circulation des eaux à la base de la masse glissée, lubrifiant ainsi le plan de glissement, et subissent une imbibition facilitant leur mise en mouvement. Dans ces conditions, les circulations d'eau, de surface et souterraine, jouent un rôle déterminant dans l'évolution du glissement.

Le plan de glissement est situé à une profondeur de 20 m en moyenne et de 30 m au maximum, il est caractérisé par une cohésion entre 10 et 14 kPa et un angle de frottement d'environ 30°.

3_Glissement de terrain de La Clapière :

Il est situé à 800 m en aval de la vallée de St-Etienne-de-Tinée, à 90 km au nord-ouest de Nice, il a subi une déformation tectonique polyphasique durant l'orogénèse varisque et alpine.

Il est le plus grand glissement d'Europe avec 1100 m de long, 750 m de hauteur et près de 50 millions de mètres cube susceptibles de tomber (figure 13).

Le plan de glissement se situe entre 100 et 150 m de profondeur dans les gneiss migmatitiques hercyniens du massif de l'Argentera Mercantour.

Le glissement de la Clapière se compose d'une série de mouvements d'ensemble rocheux

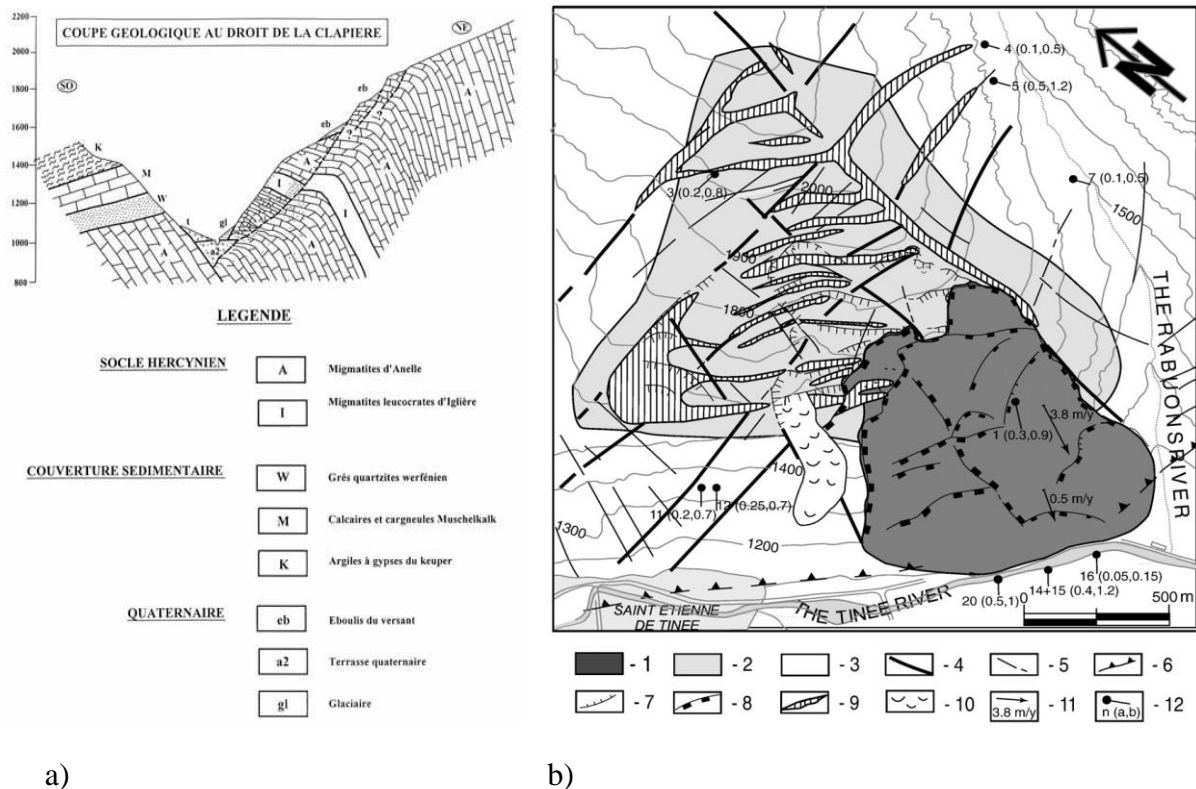


Figure 10 : a : coupe géologique du glissement de La Clapière (CETE Méditerranée), b :schéma structural et hydrologique de La Clapière (Chamenda, 2009)

VI_ Système de suivi des différents glissements de terrains:

Ces trois glissements de terrain sont parmi les plus étudiés et surveillés en France du fait de leur importance.

Données GPS :

Les différents glissements sont équipés par des stations GPS monofréquences et bifréquences.

- Super-Sauze est équipé de trois stations GPS monofréquences (SAZ1, SAZ2, SAZ3) disposées tout on long du glissement et de deux GPS bifréquences (BACT, LVAL) disposées en dehors du glissement comme repères sur les terrains stables (figure 9).
- La Valette est équipée de deux stations GPS monofréquences (Lv11, lv12) disposées le long du glissement et les stations GPS bifréquence repères (LVAL, BACT) sont disposées en dehors du glissement sur les terrains stables (figure 13).
- La Clapière est équipée de deux stations monofréquences (CPL1, CPL2) sur le glissement et de deux stations GPS bifréquences repères (CLAP, RABU) disposées sur les terrains stables (figure 13).

Données météorologiques :

1_Super-Sauze : Au niveau de ce dernier en dispose de deux stations météorologiques : «crest» située à l'aval du glissement de terrain et «LaRente» à l'extérieur du glissement. Pour notre modèle, on a utilisé les données de cette dernière présentant un jeu de données plus important, allant du 01/01/1998 au 04/04/2013 (figure 11).

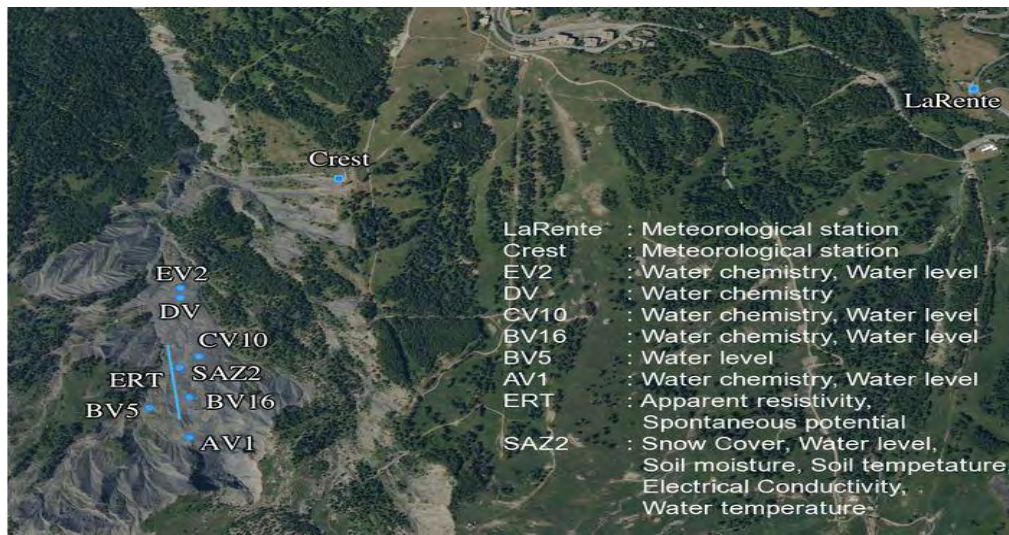


Figure 11 : localisation des différents instruments de surveillance et de mesures du glissement de Super-Sauze (source : OMIV).

2_ la Valette : dispose d'une seule station météorologique « Lval2 » qui ne fournit pas un jeu de données suffisant pour les traitements, on a donc utilisé les données de la station « laRente » (Figure 11).

3_ La Clapière : dispose de deux stations météorologiques « clap2 » disposée au cœur du glissement et « clap3 » disposée en aval du glissement.

Données hydrogéologique :

Super-Sauze dispose de cinq piézomètres placés tout le long du glissement (AV1, EV2, BV5, CV10, BV16) (figure 11).

La Clapière dispose de deux piézomètres (source5 et source15), le premier placé à l'aval du glissement et le deuxième à l'amont du glissement pour lesquels on ne dispose pas d'un jeu de données utilisable dans le modèle (donne des chiffres).

Le glissement de La Valette ne dispose pas de piézomètres.

Le glissement de terrain de Super-Sauze est alimenté par une source profonde qui a un apport journalier de 10 mm (Travelletti, 2011)

Le glissement de la Valette est parsemé de plusieurs sources profondes au niveau du contact anormal des flyschs avec les marnes noires (Le Mignon, 2004 et Combes, 1990).

Traitement des données :

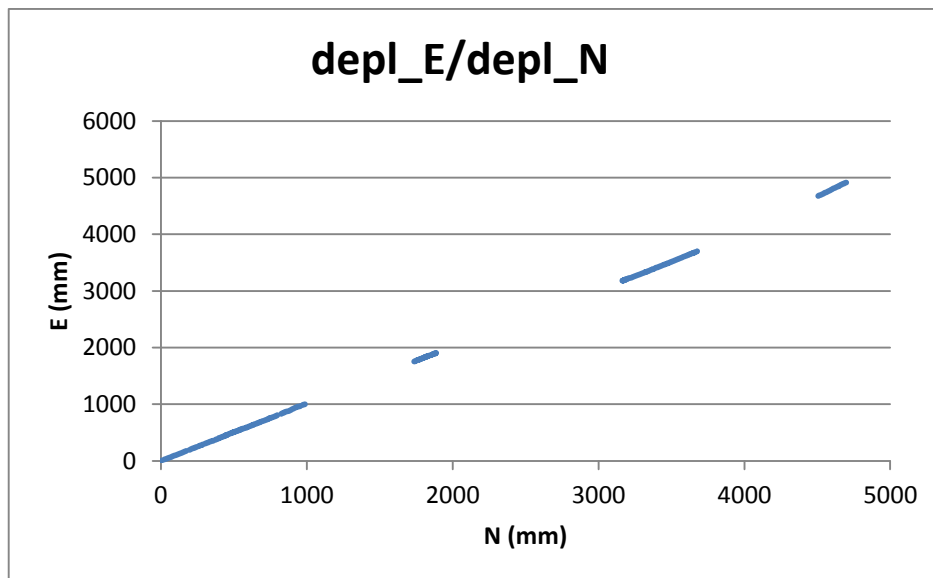
1_ Les données GPS :

Pour le traitement des données de déplacement, on a choisi de ne s'intéresser qu'à la composante Nord pour les trois glissements de terrains, un choix encouragé par le fait que ces derniers se développent plus en moins sur un axe Sud-Nord pour le glissement de Super-Sauze et Nord-Sud pour les glissements de La Clapière et de La Valette.

Les données sont caractérisées par des lacunes plus ou moins importantes dues à l'arrachement du matériel d'acquisition ou à des pannes longues durées.

Pour compenser ces absences de données, les données sont lissées et complétées par des interpolations linéaires et des moyennes mobiles lorsque les lacunes sont jugées suffisamment faibles.

Les modèles sont basés sur une hypothèse de positivité des vitesses de déplacement, le lissage des données permet aussi d'éliminer les vitesses négatives.



a)

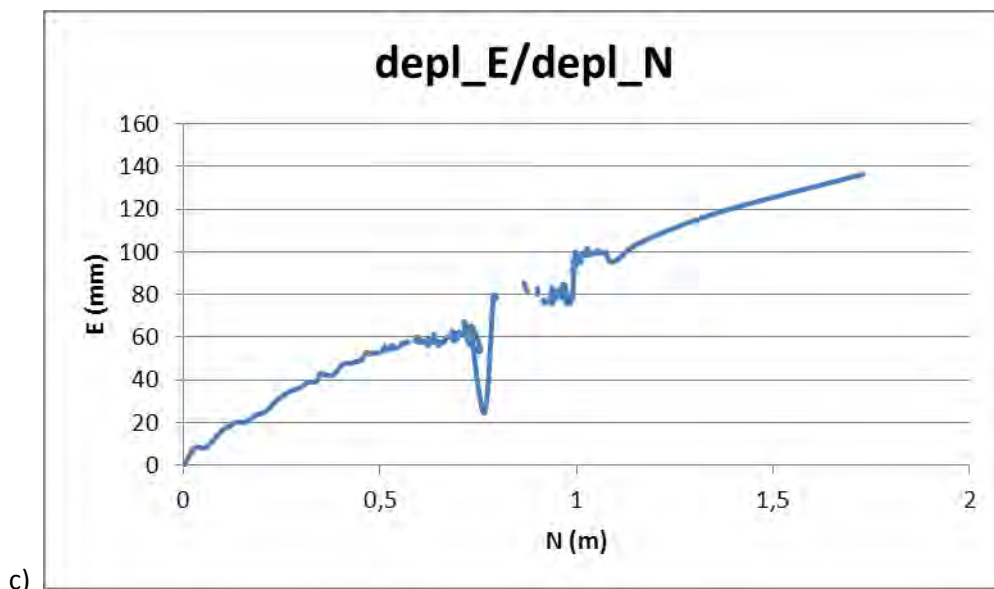
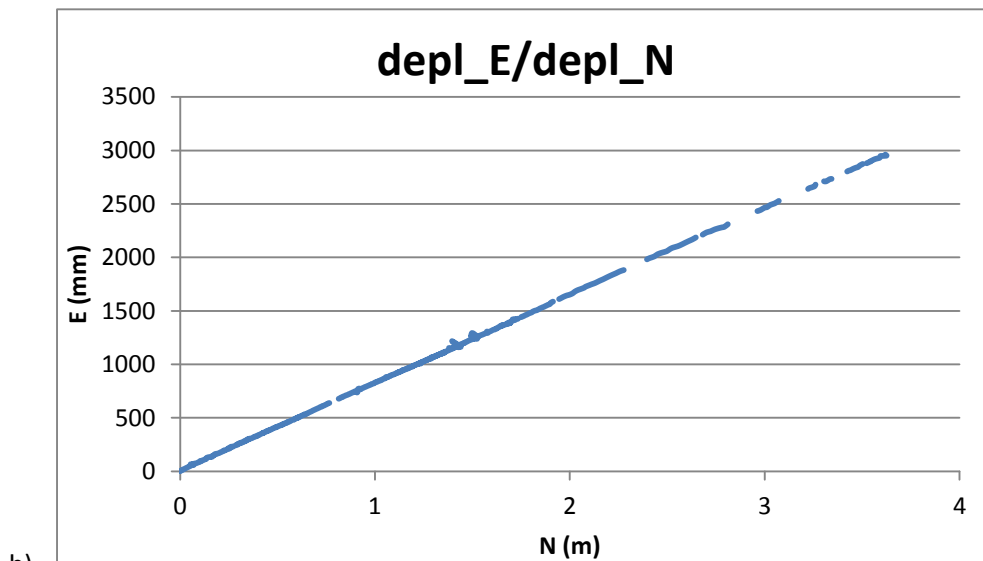


Figure 12: Graphes représentant les déplacements Est en fonction des déplacements Nord au niveau des glissements de la Valette « lvl2 » (a), La Clapière « CLAP2 » (b) et Super-Sauze « SAZ 1 » (c).

2_ Les données météorologiques :

Les données de précipitations et de températures sont mesurées chaque demi-heure ou heure. Or pour les modèles, on a besoin de mesures journalières d'où la nécessité de faire des moyennes pour les températures et des sommes pour les précipitations pour avoir les valeurs journalières.

Dans l'absence de données précises sur le manteau neigeux et la chute de neige sur ces glissements de terrains, un modèle numérique a été développé et calibré sur Super-Sauze afin de distinguer les précipitations pluvieuses de celles neigeuses. Cela se fait par la

détermination des températures critiques (T_{c1} , T_{c2}) qui permettent la distinction entre les précipitations pluvieuses et neigeuses, il calcule aussi la quantité de neige fondue (en mm d'eau liquide) et la capacité de rétention d'eau par le manteau neigeux grâce à un coefficient « degré-jour » a exprimé en $\text{mm}/^{\circ}\text{C}/\text{jour}$, la température moyenne $T(t)$ et d'une température critique de fonte T_c de sorte que :

$$\text{Neige fondue}(t) = a \cdot (T(t) - T_c) \quad \text{si } T(t) > T_c$$

$$\text{Neige fondue}(t) = 0 \quad \text{sinon}$$

Il permet de mettre en évidence la contribution du manteau neigeux dans le ralentissement de l'apport en eau du sol et son prolongement dans le temps.



Figure 13 : Localisation des différents instruments de surveillance des glissements de La Valette(b) et de La Clapière(a)(OMIV).

VIII_ Présentation des différentes méthodes (les scripts):

La calibration :

Elle consiste à vérifier la capacité du modèle à reproduire les données observées on cherchant les meilleurs paramètres caractérisant les zones d'études, et cela à l'aide d'un algorithme d'optimisation basé sur le calcul de la RMSE (Root Mean Square Error) entre les données de sortie observées S et les données modélisées M sur le nombre de valeurs N de l'intervalle de calibration :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (S(n) - M(n))^2}$$

Afin de calibrer la totalité du jeu de données, on commence par la calibration d'une période de longueur delta sur les vitesses de déplacement, puis on effectue une nouvelle calibration en se décalant de delta jours.

La calibration du jeu de données sur des périodes delta permet de prendre en compte le changement hydrique pouvant engendrer une évolution physique dans les différents paramètres en fonction de la succession des cycles humides et secs.

Afin d'optimiser la calibration du modèle la fenêtre de calibration a été varié entre 60 et 180 jours qui a révélé une calibration optimale (RMSE minimale) pour une fenêtre de 100jours.

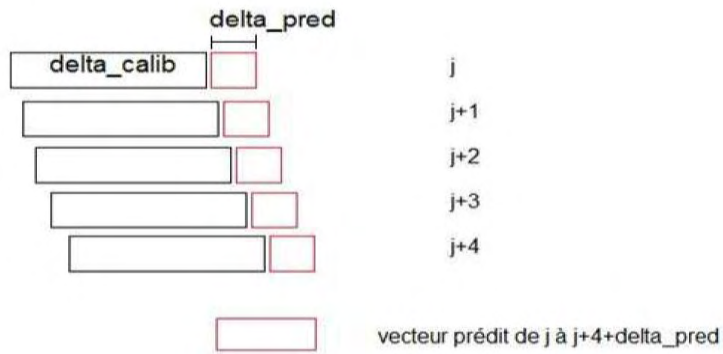
La prédiction :

Cette partie permet de prédire les phénomènes de crises (coulées) en fonction des prévisions météorologiques. Le processus dans lequel sont défini des intervalles de calibration, de prédiction et de calcul, est appliqué chaque jour avec une fenêtre de calibration de 100 jours et une fenêtre de prédiction de 10 jours.

La fenêtre de calibration de 100 jours dite « optimale » a été choisie après avoir tester des fenêtres allant de 60 jours à 180 jours. Elle permet de trouver les paramètres du modèle qui permettent de minimiser la RMSE

Les données de vitesses sont calibrées sur l'intervalle de calibration et les précipitations sont calibrées sur le même intervalle de calibration plus dix jours de prévision.

Pour un jour j, on effectue une calibration de « delta » jours avant qui permet la minimisation de la RMSE entre les vitesses observées et les vitesses modélisées sur l'intervalle de calibration, puis une modélisation sur une fenêtre « delta_pred » jours qui suit la fenêtre de calibration (Figure 14).



(Gourlay, 2012)

Figure 14 : Schéma de prédiction.

VIII_ Résultats des modèles sur Super Sauze :

La prédiction se fait sur une fenêtre de calibration de 100 jours, une itération journalière et une prédiction de 3 jours, les résultats obtenus sont représentés dans les figures 15 et 16.

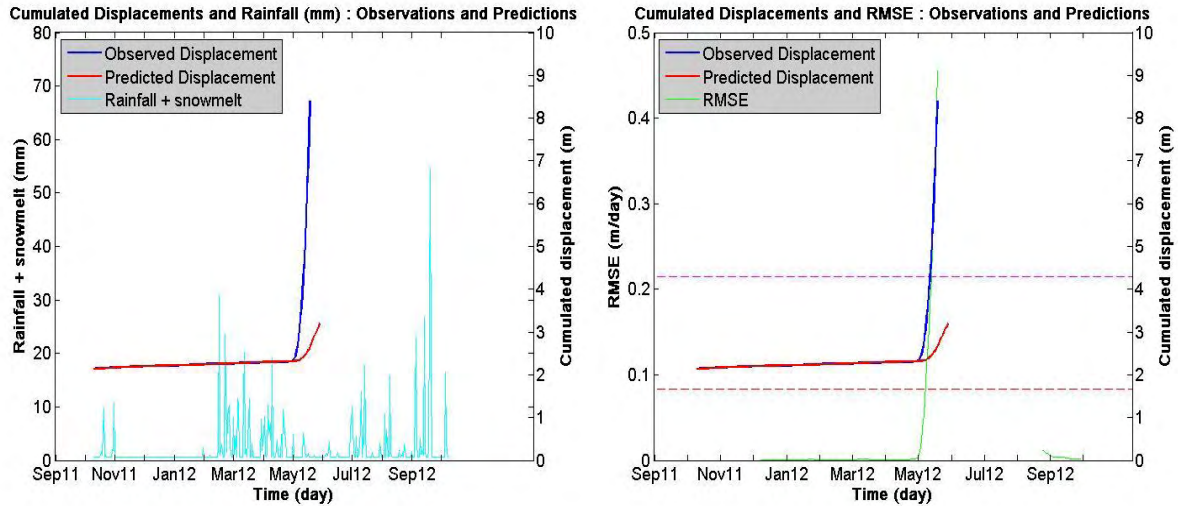


Figure 15: prédiction des déplacements et calcul des RMSE sur la station GPS « SAZ2 » avec le modèle viscoplastique.

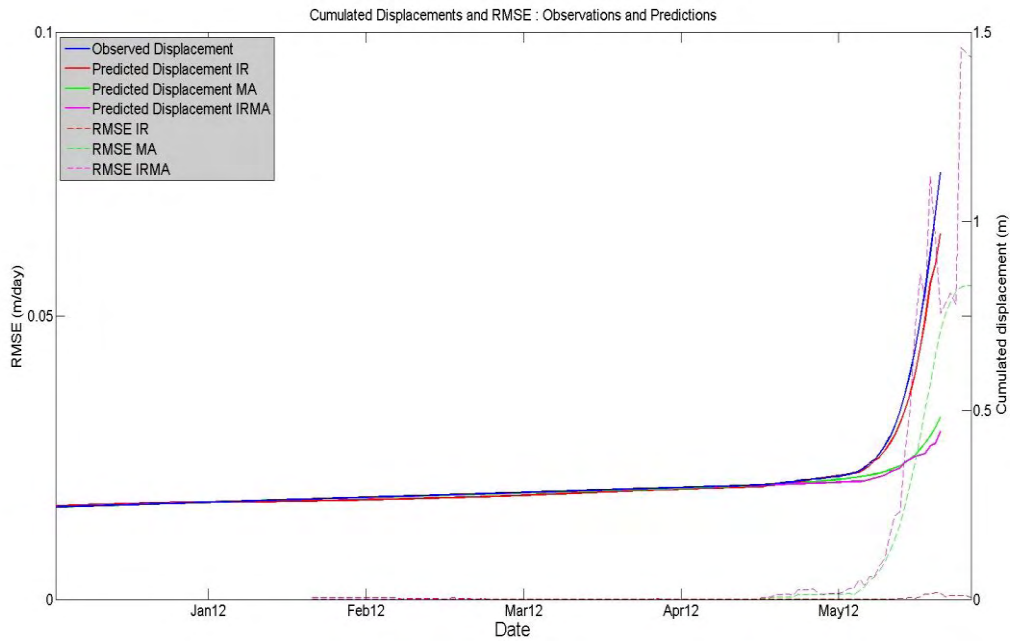


Figure 16 : prédiction des déplacements et calcul de RMSE sur la station GPS « SAZI » avec les trois modèles.

On observe une augmentation rapide et brutale des valeurs de RMSE qui coïncide avec l'accélération du glissement de terrain suite un départ en coulée en mois de mai 2012.

L'analyse statistique des RMSE durant les trois dernier départ en coulée (2000, 2006 et 2012) a permis de déterminer des seuils de déclenchement de l'alerte (en jours) pour les départs en coulées comme suit :

Seuil 1 = moy + 3σ .

Seuil 2 = moy + σ .

Avec :

moy : moyenne des RMSE.

σ : l'écart type.

Les valeurs de seuils de déclenchement pour les trois derniers départs en coulée du glissement de Super-Sauze sont calculées avec les différents modèles et représentés dans le tableau suivant :

Délai en jour	Coulée 2000		Coulée 2006		Coulée 2012 « SAZ 1 »		Coulée 2012 « SAZ 2 »	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
Vitesse observée	11	11	7	19	4	8	9	14
Modèle Réponse impulsionnelle	11	11	3	11	-	2	6	12
Modèle Viscoplastique	11	11	2	11	2	8	5	11
Modèle couplé RI-VP	8	9	10	19	-	5	4	9

(Bernardie et al, 2013)

Tableau : Représentation des différents seuils de déclenchement pour les coulées de 2000, 2006 et 2012

IX_ Application sur les autres sites :

Après les résultats satisfaisants obtenus au niveau du glissement de terrain de Super-Sauze on teste les modèles sur les glissements de terrains de La Valette et de La Clapière.

La Valette se trouvant dans la même vallée et le même contexte géologique, morphologique et climatique on a utilisé les mêmes données météorologiques que Super-Sauze et le même modèle de neige.

L'intégration de l'apport des sources profondes au niveau du glissement de la Valette nous permet d'avoir un meilleur résultat de calibration et de prédiction.

L'absence de données piézométriques au niveau de ce dernier nous a cependant contraints à supprimer la connexion précipitations-niveau piézométrique et à n'utiliser que la connexion pression interstitielles-vitesses de déplacements dans le modèle viscoplastique, les résultats sont représentés dans la figure 17.

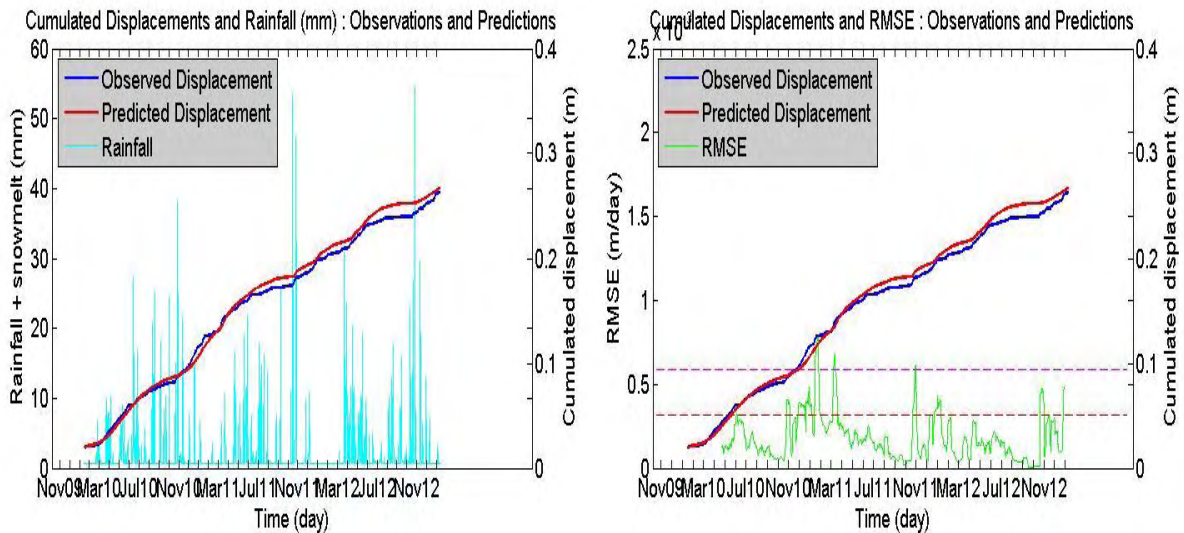


Figure 17 : Prédiction de déplacement et calcul de la RMSE au niveau de la station GPS « LVAL 1 » avec le modèle viscoplastique.

Le modèle viscoplastique reproduit les déplacements plus efficacement que le modèle réponse impulsionnelle avec une légère tendance de surestimation de ces derniers.

Le dépassement du seuil RMSE peut s'expliquer par :

- L'application du modèle neige de Super-Sauze sur La Valette peut induire à quelques erreurs dans le calcul des différents apports en eau. Les deux glissements présentent une exposition opposée et une épaisseur du manteau neigeux non identique.
- L'attribution d'un apport en eau de 10mm/jour (valeur de Super-Sauze) du à l'absence des valeurs réelles de l'apport des sources de de la Valette.
- L'absence de données piézométrique engendre des erreurs dans le calcul des pressions interstitielles.

L'application des différents modèles sur la structure massive du glissement de la Clapière va évaluer la possibilité d'étendre leur application sur des différentes lithologies.

Le site de La Clapière dispose d'une station piézométrique qui malheureusement fournit un jeu de données peu complet qui ne permet pas de tourner les modèles, d'où l'application du même modèle que sur la Valette, ce qui revient à supprimer la connexion précipitations-niveaux piézométriques. Les résultats obtenus sont représentés dans la figure 18 pour la station GPS « CLAP 1 ».

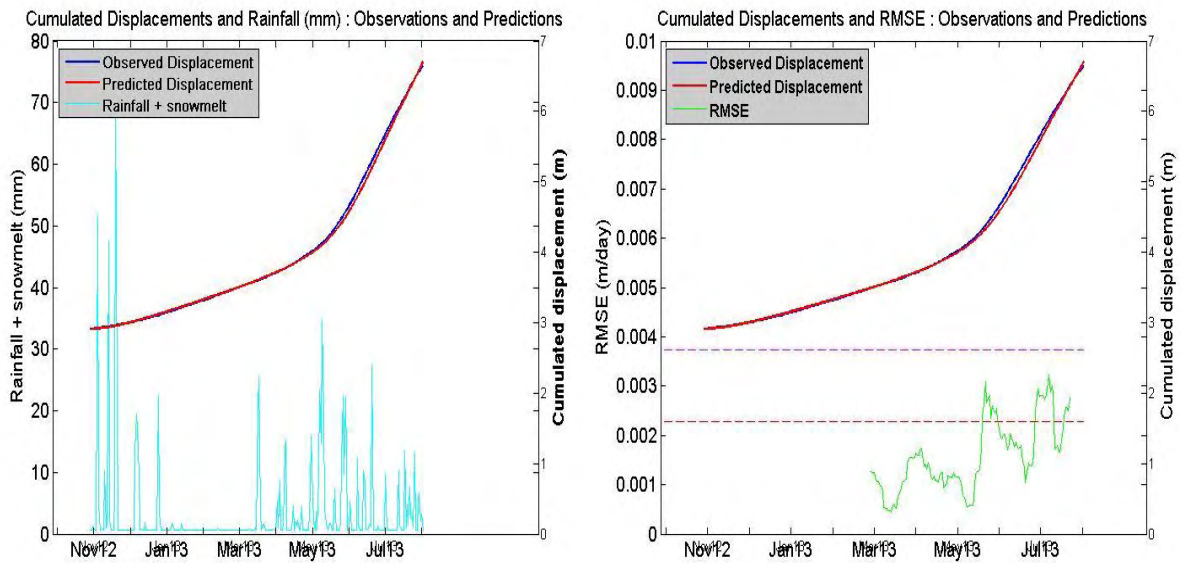


Figure 18 : *prédiction des déplacements et calcul de la RMSE au niveau de la station GPS « CLAP 1 » avec le modèle viscoplastique.*

Le modèle viscoplastique reproduit efficacement les déplacements du glissement de terrain de La Clapière mais présente des dépassements du premier seuil de déclenchement d’alerte qui peut être expliqué par le fait qu’on a appliqué le modèle de neige calibré sur Super-Sauze à la Clapière et que ces deux derniers se trouvent dans conditions climatiques différentes qui donnent des précipitations pluvieuses et neigeuses spécifique à chacun des deux sites.

X_ Conclusions :

Les résultats satisfaisant obtenus au niveau du glissement de terrain de Super-Sauze nous a poussé appliquer ces modèles sur d'autres glissements de terrains (La Valette, La Clapière).

La prédiction du glissement de Super-Sauze a permis de calculer des délais de quelques jours pour le lancement de l'alerte, allant de 4 à 6 jours pour le premier seuil et de 9 à 12 jours pour le deuxième seuil.

L'absence de données de déplacement durant des coulées au niveau des glissements de La Valette et La Clapière ne permet pas de voir l'efficacité des modèles et l'estimation des seuils RMSE, néanmoins ces derniers reproduisent très efficacement les déplacements.

L'élaboration d'un modèle neige spécifique aux glissements de La Valette et de La Clapière permettra d'avoir une meilleure appréciation des apports de la pluie, de la neige et de la source, et une meilleure précision dans la prédiction de ces derniers.

Les modèles d'automatisation mis en point sur le glissement de Super-Sauze permettent de lancer des alertes par des messages électroniques pour les organismes gérant ces glissements de terrain et d'annoncer quelques jours avant un éventuel départ en coulée du glissement.

La prochaine étape d'évolution des modèles est l'automatisation de l'acquisition des données de déplacements et des données météorologiques qui sont en cours de réalisation.

Bibliographies :

Bernardie S., Desramaut N., Azib M. & Grandjean G., Malet J-P. 2013. Prediction of changes in landslide rates induced by rainfall

Combes, F. 1990. Le glissement de terrain de la Valette, Alpes-de-Haute-Provence - France, Surveillance - système d'alarme. *Géologie Alpine*, H.S. 15: 65-70.

Chemenda, T. Bois, S. Bouissou and E. Tric (2009) Numerical modeling of the gravity-induced destabilization of a slope: example of the Clapière landslide, southern France. *Geomorphology*, 10.1016/j.geomorph.2009.02.025

Herrera, G., Fernandez-Merodo J.A., Mulas J., Pastor M. Luzi G., Monserrat O. 2009. A landslide forecasting model using ground based SAR data: The Portalet case study. *Engineering Geology*, 105, 220-230.

Le Mignon, G. 2004. Analyse de scénarios de mouvements de versants de type glissements-coulées. Application à la région de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France). Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 261 p.

Le Mignon, G., Cojean, R. 2002. Rôle de l'eau dans la mobilisation de glissements-coulées (Barcelonnette - France). In: Rybár, J., Stemberk, J., Wagner, P. (Eds.): *Proceedings of the 1st European Conference on Landslides*, Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 239-245.

Malet, J.-P., 2003. Les "glissements de type écoulement" dans les marnes noires des Alpes du Sud. Morphologie, fonctionnement et modélisation hydro-mécanique. Thèse, École et Observatoire des Sciences de la Terre, Université Louis Pasteur, Strasbourg

Malet J.-P., van Asch Th.W.J., van Beek L.P.H., Maquaire O. 2005. Forecasting the behavior of complex landslides with a 2-5D spatially distributed hydrological model. *Natural Hazards and Earth System Science*, 5, 71-85.

Pouya A., Léonard C., Alfonsi P. 2007. Modelling a viscous rock joint activated by rainfall: Application to the La Clapière landslide. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 44, 120–129.

Travelletti Julien. 2011. Imagerie multi-paramètres et multi-résolutions pour l'observation et la caractérisation des mécanismes de glissements-coulées. Thèse. Université de Caen Basse-Normandie