



**Université de Strasbourg**

*Master 2*

*Domaine « Sciences, Technologies, Santé »*

*Mention « Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement »*

*Spécialité « Ingénierie et Sciences pour l'Environnement »*

Mémoire de fin d'études

réalisé de février à juin 2010 par

**Alexandre MATHIEU**

---

---

**Modélisation numérique bidimensionnelle de l'aléa 'coulée de boue' sur substrat argileux : application au glissement-coulée de La Valette (Alpes de Haute-Provence).**

---

---

**Jean-Philippe MALET**  
**Caroline GREGOIRE**

Chargé de recherche CNRS, IPGS  
Enseignant – Chercheur, ENGEES

Maître de stage  
Responsable de spécialité

**Structure d'accueil :**

*Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre  
Institut de Physique du Globe de Strasbourg (UMR 7516 - CNRS)  
5 rue Descartes, 67084 Strasbourg Cedex*



**IPGS**

## AVANT-PROPOS

---

Ce mémoire est le résultat d'un travail de recherches de cinq mois effectué à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) et sur les terrains escarpés du bassin de Barcelonnette. Qu'il me soit permis ici de remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail de fin d'études.

Je pense tout d'abord à Jean-Philippe Malet, chargé de recherche à l'IPGS, qui m'a proposé ce sujet d'étude, proche de ce que je recherchais : je ne le regrette pas ! Merci aussi de m'avoir invité à participer, de manière informelle, à la réunion de lancement du Plan de Secours Spécialisé de Saint-Pons, ce fut une expérience intéressante.

Je tiens à remercier Nicolas Keller, collègue de promotion, dont le sujet d'étude similaire a permis une entraide efficace lors des débuts sur le logiciel PC-Raster. L'intérêt porté pour le travail de l'autre a par ailleurs été très motivant.

Un merci spécial à Julien Travalletti, doctorant à l'IPGS, pour :

- nos nombreuses discussions, en rapport ou non avec nos travaux respectifs, pendant les 'pauses café', et pendant lesquelles j'ai beaucoup appris ;
- ses précieux conseils et astuces sur la manipulation de certains logiciels, ce qui a permis d'optimiser mon temps, de faciliter et de rendre plus efficace mon travail au quotidien ;
- avoir accepté de m'aider à la mise en place des scénarios de modélisation, malgré une charge de travail déjà conséquente et des sollicitations de toute part ;
- m'avoir éclairé sur les possibilités de certains langages de programmation dans tout travail de recherche en géosciences, je vais m'y consacrer très prochainement.

Tout travail effectué dans le domaine des aléas naturels possède une composante terrain. Mes remerciements s'adressent donc également à toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide et leurs connaissances pendant cette étape du travail :

- Aline Deprez, qui m'a accompagné lors des levés de terrain et qui a facilité la récolte des données. Des bras supplémentaires ne sont jamais de refus !
- Georges Guiter, responsable du service 'Restauration des Terrains de Montagne', qui a partagé, toujours avec autant de plaisir, ses connaissances encyclopédiques sur le glissement de La Valette et la vallée de l'Ubaye.
- Maximilien Wehrle, qui m'a accompagné lors de la descente de trois heures dans les matériaux instables du glissement de La Valette.

Merci enfin à tous ceux dont le nom figure sur la carte qui m'a été offerte ce dernier jeudi d'avril...

## Résumé.

Cette étude propose une évaluation quantitative de l'aléa 'coulée de boue' en se basant sur des données d'observations multi-sources (historique, géophysique, rhéologique, etc.) et en utilisant un modèle numérique de propagation de coulées de boue et de laves torrentielles (MassMov2D). Le contexte géographique est celui du glissement de La Valette (Alpes de Haute Provence), dont les matériaux argileux en mouvement peuvent évoluer en coulée de boue rapide à la suite d'un forçage climatique (fonte des neiges, pluies intenses, etc.). Un tel évènement s'est produit en 1988 et les données obtenues ont permis de caler et de valider le modèle. À partir de zones sources au volume variable, plusieurs scénarios ont été proposés selon les critères suivants : le mode de rupture de la masse glissée, la rhéologie utilisée, la topographie avec et sans le piège à matériaux. Les résultats obtenus ont permis de quantifier le comportement des coulées (vitesses de déplacement, épaisseurs des sédiments, force d'impact, etc.) et de mesurer l'effet du piège à matériaux sur ce comportement. Ces résultats pourront être combinés avec des données sur la vulnérabilité (fragilité du bâti, etc.) afin de permettre une évaluation quantitative du risque. Une estimation des volumes potentiellement mobilisables par des instabilités de versants dans la partie aval du torrent de La Valette est également proposée.

**Mots-clés :** simulation numérique, MassMov, coulée de boue, La Valette, évaluation quantitative de l'aléa, vitesse de déplacement, épaisseur des dépôts, force d'impact, sols argileux.

## Abstract.

This study purpose a quantitative assessment of mudflow hazard by coupling multi-source observed data (historical, geophysical, rheological, etc.) and a numerical model for simulating the kinematics of mud and debris flows. Geographical context is the La Valette mudslide (Southern French Alps) whose clayey materials in movement could suddenly evolve in a rapid mudflow following a period of snow melt or prolonged rainfall. Such an event occurred in 1988, and available data allowed to calibrate and validate the model. From several triggering areas with a variable volume, many scenarios were proposed according to the following criteria : failure mode of sliding mass, used rheology, topography with or without sediments trap. The output results allowed to quantify the mudflow behavior (velocity displacements, deposits thickness, impact force, etc.) and to measure the effect of the sediments trap on this behavior. These results could be combined with data on vulnerability (brittleness of buildings, etc.) in order to allow a quantitative assessment of the risk. An estimation of potentials volumes coming from slope instabilities in the downstream part of the La Valette torrent is also proposed.

**Keywords :** numerical modelling, MassMov, mudflow, La Valette, quantitative hazard assessment, velocity displacement, deposits thickness, impact force, clayey soils.

# SOMMAIRE

---

<i>Avant-propos</i>	- 1 -
<i>Résumé</i>	- 2 -
<i>Sommaire</i>	- 3 -
<i>Introduction générale</i>	- 4 -
<b><i>I. Le point sur l'aléa 'coulée de boue' : identification, classification et description.</i></b>	<b>- 6 -</b>
<b>I.1. La situation des coulées de boue dans les 'mouvements de versants'.</b>	<b>- 6 -</b>
I.1.1. La typologie des 'mouvements de versants' : constat d'un manque de consensus.	- 6 -
I.1.2. Les 'glissements de type écoulement' : constat d'un problème sémantique.	- 6 -
<b>I.2. Présentation du site d'étude : le glissement-coulée de La Valette.</b>	<b>- 9 -</b>
I.2.1. Généralités.	- 9 -
I.2.2. Contexte hydrologique et activité du glissement.	- 9 -
I.2.3. Mesures de protections passives et actives.	- 10 -
<b><i>II. Outils de recherche utilisés et approche méthodologique envisagée.</i></b>	<b>- 13 -</b>
<b>II.1. Données d'observation à disposition.</b>	<b>- 13 -</b>
<b>II.2. MassMov2D : présentation et fonctionnement du modèle.</b>	<b>- 13 -</b>
II.2.1. Concepts de base.	- 13 -
II.2.2. Principe de fonctionnement.	- 14 -
II.2.3. PCRaster : un langage de programmation environnemental.	- 15 -
<b>II.3. Cartographie, validation du modèle et scénarios envisagés : choix méthodologiques.</b>	<b>- 16 -</b>
II.3.1. Estimation des zones de contribution sur le terrain.	- 17 -
II.3.2. Travail bibliographique sur les paramètres rhéologiques.	- 17 -
II.3.3. Analyse de sensibilité et calage du modèle.	- 18 -
II.3.4. Choix des scénarios de simulation.	- 23 -
<b><i>III. Résultats observés et discussion.</i></b>	<b>- 25 -</b>
<b>III.1. Estimation des zones de contribution.</b>	<b>- 25 -</b>
<b>III.2. Présentation et discussion des résultats de simulation.</b>	<b>- 26 -</b>
III.2.1. Estimation de l'aléa : observations des scénarios inférieurs à 200000m3.	- 26 -
III.2.2. Estimation de l'aléa : observations des scénarios supérieurs à 200000m3.	- 28 -
<b><i>Conclusion.</i></b>	<b>- 34 -</b>
<b><i>Liste des abréviations</i></b>	<b>- 35 -</b>
<b><i>Liste des figures</i></b>	<b>- 36 -</b>
<b><i>Liste des tableaux</i></b>	<b>- 36 -</b>
<b><i>Références bibliographiques</i></b>	<b>- 37 -</b>
<b><i>Annexes</i></b>	<b>- 40 -</b>

## INTRODUCTION GENERALE

---

### **Mise en évidence du problème.**

Les 'mouvements de versants', très répandus dans les régions montagneuses, représentent un risque important en raison de la concentration des éléments exposés (populations, biens matériels, réseaux, activités économiques, etc.) et de leur vulnérabilité. Plus précisément, les 'glissements de type écoulement', notamment les coulées de boue et les laves torrentielles, sont à l'origine d'un risque important de par leur vitesse de propagation (de 1 à 15 m.s) qui les place dans les 'mouvements rapides' selon la classification de Varnes (1978). Cette situation justifie des efforts de recherche concernant les phases d'initiation, de propagation et de dépôt de ces événements (Coussot & Meunier, 1996).

Mais en raison de leur courte durée (souvent de quelques minutes), des difficultés sont rencontrées pour obtenir des informations *in situ* sur leurs caractéristiques (cinématique, épaisseur et extension des dépôts, etc.). **Les modèles numériques s'imposent donc comme une alternative intéressante à l'évaluation quantitative de l'aléa**, permettant de mesurer des données telles que l'épaisseur de la masse glissée, sa distance de parcours, sa vitesse, sa force d'impact (Begueria *et al*, 2009).

### **Contexte de la recherche.**

Cette étude a pour cadre géographique le **Bassin de Barcelonnette**, dans les Alpes de Haute-Provence. Sa géologie et son climat sont, respectivement, des facteurs de prédisposition et de déclenchement propices aux '**instabilités de versants**' qui affectent la région (Malet, 2003 ; Remaître, 2006 ; Thiery, 2007). Les terrains autochtones, qui affleurent largement, sont représentés par les marnes noires du Callovien-Oxfordien, également nommées 'Terres Noires'. Leur microstructure et leur changement rapide de consistance (passage d'un état solide à plastique puis liquide pour de faibles variations de teneur en eau) les rendent très susceptibles aux 'glissements de type écoulement' et à l'érosion en général (Malet, 2003 ; Mathieu, 2009). Erosion qui est due à l'aspect agressif du climat combinant des influences méditerranéennes (sécheresse estivale, précipitations intenses), montagnarde (précipitations hivernales et faibles températures) et continentales (forte amplitude thermique journalière).

**Cette étude s'intéressera plus particulièrement au glissement de La Valette qui s'est déclenché au printemps 1982.** Sa partie aval, évoluant sous la forme d'une coulée, peut se fluidifier et accélérer pour atteindre un lotissement de la commune de Saint-Pons, située sur le cône alluvial : plus de **700** personnes sont concernées. De tels événements se sont produits en 1988, ils ont été le fer de lance d'une gestion du risque 'coulée de boue' qui se poursuit encore à ce jour.

Ce travail s'inscrit dans le projet de recherche européen **Mountain Risks** (2007-2011) qui regroupe quatorze instituts et universités dans plusieurs pays. Le projet s'organise autour de quatre axes d'étude : l'analyse de l'aléa, l'évaluation quantitative du risque, la gestion du risque, la gouvernance du risque. Les thématiques de recherche qui y sont développées s'appliquent à cinq sites européens, dont le bassin de Barcelonnette.

## Objectifs de recherche.

La recherche menée dans le cadre de ce travail a pour objectif d'apporter des éléments de réponse sur **le comportement de l'aléa 'coulée de boue'** pour le glissement de La Valette en s'intéressant aux **phases de propagation et de dépôt** du phénomène. Elle se base sur une méthodologie combinant observations et utilisation d'un modèle numérique de propagation. Le cadre scientifique de cette recherche s'articule autour des objectifs suivants :

- (i). Estimer les distances de parcours, les vitesses et l'épaisseur des dépôts de coulées de boue pour plusieurs scénarios (volumes, rhéologies, mode de rupture) dans les parties aval et amont du glissement.
- (ii). Caractériser et quantifier l'effet du piège à matériaux sur la cinématique d'une coulée de boue (durée de remplissage, écrêtement des vitesses et des hauteurs, etc.).
- (iii). Estimer les volumes supplémentaires mobilisables, issus des versants, pouvant s'ajouter à celui d'une coulée.

Si la zone de déclenchement des coulées est bien délimitée, leur occurrence temporelle reste mal connue et n'est donc pas prise en compte dans cette étude. Les conditions de déclenchement des coulées de boue, ainsi que l'estimation des valeurs seuils pour la mise en mouvement des matériaux impliqués pourront faire l'objet d'une recherche complémentaire.

Après avoir calé puis validé le modèle, différents scénarios seront proposés (volumes, rhéologies, mode de rupture). Les scénarios dits '**principaux**' s'intéresseront à la partie aval du glissement de La Valette, qui menace directement la commune de Saint-Pons située en contrebas. Des scénarios dits '**secondaires**' s'intéresseront à la partie amont où une coulée a été observée récemment : il s'agira d'obtenir des informations sur la façon dont peut se propager une coulée sur le glissement lui-même. Enfin, **un état des lieux géomorphologique** de la partie aval du torrent de La Valette permettra de quantifier les volumes supplémentaires mobilisables par d'éventuelles instabilités de versant (zones de contribution).

**À court terme**, cette étude se veut un apport à l'évaluation de l'aléa 'coulée de boue' sur le cas précis de La Valette. Elle doit pouvoir proposer des cartes d'aléa réalistes et réutilisables, qu'il sera possible de comparer au zonage expert fait par le service RTM. Elle doit aussi permettre de quantifier le rôle 'tampon' du piège à matériaux et d'estimer les dommages potentiels sur les bâtiments.

**À moyen et long-termes**, cette étude se veut un support d'information et de communication sur le risque 'coulée de boue', notamment en diffusant des cartes d'aléa sur Google Earth®.

## Structure du mémoire.

Le mémoire s'organise autour de **trois parties**, reprenant les différentes étapes de travail qui ont permis de réaliser cette étude :

- (i). La première partie tente de clarifier la position des coulées de boue au sein des 'mouvements de versants' et présente le site d'étude de La Valette ;
- (ii). La deuxième partie fait l'inventaire des outils utilisés dans cette étude et décrit la méthodologie adoptée pour répondre aux objectifs fixés ;
- (iii). La troisième partie s'attache à présenter puis discuter les résultats des simulations.

# **I. Le point sur l'aléa 'coulée de boue' : identification, classification et description.**

## **I.1. La situation des coulées de boue dans les 'mouvements de versants'.**

Cette partie s'intéresse à la terminologie complexe utilisée pour définir et classer les aléas géomorphologiques et tente de cerner la position du phénomène 'coulée de boue' au sein de ces processus.

### ***I.1.1. La typologie des 'mouvements de versants' : constat d'un manque de consensus.***

Le terme '**mouvement de versant**' englobe un ensemble de processus, des affaissements et écroulements aux phénomènes de type 'écoulement' en passant par les glissements. Ils peuvent affecter aussi bien le substrat rocheux que les couches plus superficielles des sols. Leur grande variété engendre un besoin de les classer pour mieux les appréhender et les étudier. Depuis plusieurs décennies, des classifications ont ainsi été proposées. Les plus couramment utilisées sont brièvement présentées en annexe 1. De leur étude, il en ressort que les critères utilisés pour classer les phénomènes varient selon les auteurs : le type de processus (ou mode de propagation), le matériel affecté (substrat, sol), la vitesse, les caractéristiques morphologiques (proportion d'eau et de solide), etc. (Coussot & Meunier, 1996 ; Le Mignon 2004). De plus, pour un même critère, les valeurs peuvent varier d'un auteur à l'autre : c'est le cas de la vitesse pour laquelle les classes de vitesses considérées sont différentes. Enfin, un même processus peut, selon les auteurs, prendre des noms différents, ajoutant ainsi à la confusion. Si bien qu'une tentative d'harmonisation, présentée en annexe 1 et permettant de passer d'une classification à l'autre, a été proposée en 1996 (Le Mignon, 2004).

Ces typologies sont toutefois en accord sur le fait que les 'glissements de type écoulements' sont des processus bien distincts et que les coulées de boue en font partie. Cependant, **un manque d'harmonisation entre les terminologies usitées dans ce domaine est aussi observé**. Il apparaît alors nécessaire de clarifier la situation pour mieux identifier l'aléa 'coulée de boue', sujet de cette recherche.

### ***I.1.2 Les 'glissements de type écoulement' : constat d'un problème sémantique.***

Les phénomènes dits 'd'écoulement' englobent principalement les glissements-coulées, les coulées de boue et les laves torrentielles (Malet, 2003 ; Remaître, 2006). Une revue détaillée de la bibliographie sur le sujet révèle l'ambiguïté liée à la distinction de ces processus pour deux raisons :

- (i).** Les matériaux mobilisés sont très semblables, avec la présence d'une matrice fine à l'origine de l'adjectif 'boueux' utilisé pour décrire ces processus (Malet, 2003), seul le mode de propagation varie ;
- (ii).** Les termes utilisés d'une langue à l'autre, notamment entre le français et l'anglais, ne correspondent pas forcément, se contredisent parfois et ajoutent à la confusion (cf. tableau 1).

*Tableau 1. Terminologie des glissements de type écoulement (D'après Le Mignon, 2004).*

	<b>Varnes (1978)</b>	<b>Hutchinson (1988)</b>	<b>Hungr et al (2001)</b>
Glissement-coulée	Mudslide	Flow slide/slump earthflow	Flow slide
Coulée de boue	Earthflow (mudflow)	Mudslide	Earthflow
Lave torrentielle	Debris flow	Debris flow	Debris flow/Mudflow

Il s'agit ici de faire le point sur la situation et d'éclaircir l'information en proposant, pour chacun des trois processus (glissement-coulée, coulée de boue, lave torrentielle), une description succincte accompagnée d'un ou deux exemples concrets, un terme anglo-saxon équivalent et sa position par rapport aux deux autres phénomènes.

Le **'glissement-coulée'** se démarque assez bien des deux autres processus pour lesquels la distinction est moins évidente. **Il se caractérise par un glissement de terrain classique qui évolue vers l'aval sous la forme d'une coulée lente en raison du caractère argileux des principaux matériaux qui le compose.** C'est le cas du glissement de La Valette, sujet de cette étude (cf. partie I.2). De nombreux termes anglo-saxons sont utilisés pour décrire les glissements-coulées (Le Mignon, 2004) : 'earthflow', 'earthslide', 'flow slide', 'composite mudflow', 'mudslide', 'slump earth flow', 'mudflow', etc. (cf. tableau 1 et annexe 1). Certains d'entre eux sont aussi utilisés pour décrire d'autres phénomènes selon la classification de référence. Cette abondance traduit des incertitudes par manque de caractérisation objective de chaque processus sur le terrain et par une trop grande complexification des typologies proposées (Le Mignon, 2004). En 1996, une grille de lecture permettant de passer d'une langue à une autre a été proposée (cf. annexe 1). Il est alors possible de présenter, pour le phénomène 'glissement-coulée', une terminologie anglo-saxonne simple et robuste :

- (i). 'mudslide' est le terme majoritairement utilisé ;
- (ii). 'earthflow' est l'équivalent américain du précédent ;
- (iii). 'mudflow' est plus minoritaire, car c'est un terme redondant, mal employé et trop imprécis (Le Mignon, 2004).

Bien que sa traduction soit confuse, le terme 'glissement-coulée' correspond à un phénomène bien défini. Les **'laves torrentielles'** et **'coulées de boue'** en revanche, sont déjà difficiles à distinguer au départ. À cela s'ajoute aussi le problème de la traduction.

Le premier terme désigne un mélange très concentré d'eau, de particules solides (jusqu'à plusieurs mètres de diamètre) et de matière organique qui s'écoule dans un chenal torrentiel (Coussot & Meunier, 1996 ; Remaître, 2006). Il correspond à la traduction française du terme anglo-saxon 'debris flow' ou 'mudflow'. Selon la proportion de matériaux argilo-limoneux qui la compose (plus ou moins de 20%), elle peut être soit granulaire soit cohésive (Meunier, 1994 ; Coussot & Meunier, 1996 ; Remaître, 2006) et, dans ce dernier cas, elle est traduite par 'muddy debris flow'. En France, les laves torrentielles à matrice boueuse sont très majoritaires (Meunier, 1994). Deux processus d'initiation distincts peuvent générer une lave :

- (i). Les glissements lents qui, sous l'effet de certains facteurs et notamment de l'augmentation de la pression interstitielle, peuvent s'accélérer et engendrer, après rupture, une lave (Meunier, 1994 ; Coussot & Meunier, 1996) ;
- (ii). L'érosion usuelle des versants, l'affouillement des berges et l'incision du chenal torrentiel sont tous des phénomènes générateurs de lave qui conjuguent leurs efforts et agissent constamment (Meunier, 1994 ; Coussot

Le second terme désigne un mélange viscoplastique de matériaux déstructurés (marnes, argiles, flyschs argileux et moraines) provenant de la masse glissée (accumulée vers l'aval) d'un glissement-coulée (Le Mignon, 2004). Une coulée de boue est un processus rapide de déstabilisation de ces matériaux, provoquée par des apports d'eau importants et soudains (orages, pluies intenses, fontes des neiges, etc.). Cette situation est celle du site d'étude de La Valette et l'évènement de 1988 en est un exemple (cf. annexe 2).

**La distinction entre 'coulée de boue' et 'lave torrentielle' est floue** (Le Mignon, 2004) car une lave peut donc avoir le même processus d'initiation qu'une coulée, même si cela reste très rare en France. Cousot (1994) illustre d'ailleurs cette possibilité par le cas de La Valette. Pour ajouter à la confusion, la terminologie anglo-saxonne la plus usitée pour décrire une coulée de boue est 'mudflow', également considérée, mais dans une moindre mesure, comme l'équivalent anglais de 'lave torrentielle' (Cousot & Meunier, 1996 ; Remaître, 2006) et de 'glissement-coulée'. En 1988, Hutchinson suggère donc l'abandon du terme 'mudflow' qu'il considère comme trop imprécis. Par ailleurs, certains auteurs assimilent les coulées à des laves (Le Mignon, 2004). Ainsi, selon Malet (2003), le terme 'lave torrentielle' englobe les coulées de boue.

Cet état de l'art synthétique sur les 'mouvements de versants' a mis en évidence les incertitudes liées à la définition de l'aléa 'coulée de boue'. Si les glissements-coulées (mudslide) et laves torrentielles (debris-flow) sont des phénomènes bien déterminés, **les coulées de boues (mudflow) ne semblent pas considérées comme un processus strictement à part, et ce en raison de leur forte similitude avec les laves auxquelles elles sont souvent rattachées dans la littérature**. C'est ainsi que dans Malet (2003), l'évènement de 1988 à La Valette est considéré comme une lave torrentielle. Cela reste cependant un cas isolé puisque la majorité des auteurs ayant étudié ce glissement parlent bien de coulée de boue.

Puisque les deux termes existent, il apparaît nécessaire de les différencier sur des critères autres que les matériaux mobilisés qui sont très semblables (cf. annexe 3). La distinction sur les critères suivants est ainsi proposée :

- (i). Le processus d'initiation : une lave est presque toujours générée par l'érosion sur les versants, sur les berges et dans les chenaux torrentiels. Ce n'est pas le cas des coulées qui proviennent généralement de l'évolution d'un front de glissement (Remaître, 2006) dont la masse se fluidifie soudainement suite à un forçage climatique ;
- (ii). Le mode de propagation : une lave se propage exclusivement dans un chenal torrentiel, ce qui n'est pas forcément le cas d'une coulée. Même si l'évènement de 1988 a bien suivi le cours du torrent de La Valette, une récente coulée s'est produite sur le glissement même (cf. annexe 3) ;
- (iii). La viscosité : évoluant dans un chenal torrentiel, une lave possède un comportement proche de celui d'un fluide newtonien (Remaître, 2006) alors qu'une coulée se caractérise par une viscosité plus élevée.
- (iv). La morphologie et la cinématique des laves torrentielles sont détaillées dans Remaître (2006).

De manière générale, si il est difficile de classer les 'mouvements de versants', c'est parce que dans la réalité il existe un continuum de processus, allant des chutes et écroulements (à composante verticale) aux écoulements (à composante horizontale). C'est d'autant plus vrai pour les 'glissements de type écoulements' qui

peuvent se succéder dans l'espace et le temps : c'est le cas des glissements-coulées qui engendrent des coulées de boues (Malet, 2003). Cette situation est illustrée par la figure 1.

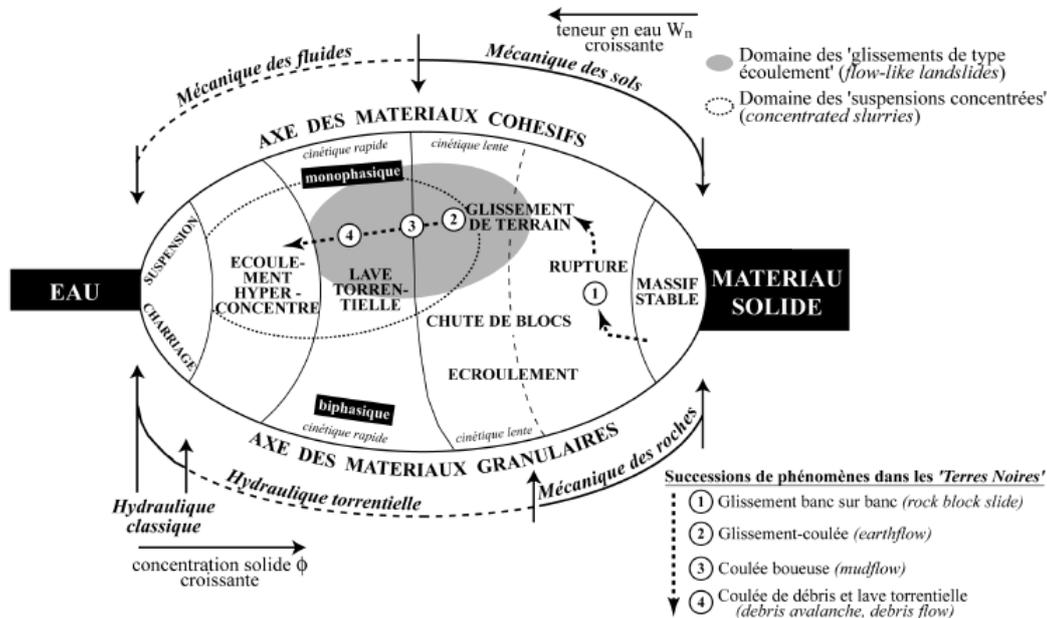


Figure 1. Position des 'coulées de boue' dans les mouvements de versants (Malet, 2003).

## I.2. Présentation du site d'étude : le glissement-coulée de La Valette.

### I.2.1. Généralités.

Avec un volume total estimé au moins à six millions de m<sup>3</sup> (Combes, 1990 ; Evin, 1990 ; Mahaut, 1996), le glissement de La Valette est l'un des plus importants de France. Il affecte un versant qui domine la commune de Saint-Pons et sur lequel s'écoule le torrent de La Valette et son affluent Le Serre. Le glissement s'est déclenché au printemps 1982 au niveau du contact anormal entre les flyschs de la nappe de charriage de l'Autapie et les Terres Noires autochtones sous-jacentes (cf. figure 2). La rupture, profonde et de forme circulaire, a mobilisé une masse rocheuse conséquente qui a engendré une surcharge sur les terrains situés en aval (marnes noires et couverture morainique) (Combes, 1990 ; Le Mignon & Cojean 2002). Destabilisés et désorganisés, ces terrains se sont mis à glisser, sous forme de coulée lente, en empruntant les talwegs des deux torrents adjacents (cf. figures 2a et 2b) qui se sont progressivement remplis (Combes, 1990 ; Travelletti *et al.*, 2009). **Le glissement atteint aujourd'hui la côte 1280m pour une longueur totale d'environ 1920m. Les argiles glaciaires ainsi accumulées en aval, parfois sur une épaisseur de 30m, sont à l'origine des coulées de boue qui menacent la commune en contrebas** (cf. figure 2a) : l'évènement de 1988 témoigne de la situation (cf. annexe 2).

### I.2.2. Contexte hydrologique et activité du glissement.

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

La géologie du site est simple : les marnes noires autochtones, imperméables quand elles sont en place, retiennent une nappe d'eau qui imprègne les flyschs

allochtones, très faillés, constituant alors un réservoir d'eau (Combes, 1990 ; Mahaut, 1996 ; Le Mignon, 2002). Le plan de contact entre les deux formations canalise les eaux vers des exutoires naturels (dont la source de La Valette) (Evin, 1990). Ce sont ces injections d'eau qui ont favorisés la rupture principale en 1982. Le contact géologique est visible, marqué par une ligne de sources donnant au site sa toponymie des 'Sagnes' (Combes, 1990). 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 déclenchement du glissement principal et de la coulée de boue lors de la fonte des neiges, respectivement en mars 1982 et mars 1988, suggère que l'eau est bien le facteur qui conditionne l'activité du glissement. La mise en place d'un profil de surveillance (section 'Charun') par le service RTM en 1988 a permis de quantifier les vitesses de déplacement (cf. figure 2d). En comparant ces données avec la pluviométrie, une corrélation a pu être établie. Ce constat a été le point de départ de plusieurs travaux scientifiques sur la caractérisation de la corrélation entre pluviométrie, circulation des eaux et vitesse de déplacement. De ces travaux, il ressort les observations suivantes :

- (i). Le glissement réagit différemment selon la structure de l'épisode pluvieux (intensité, durée, répartition dans le temps) ;
- (ii). La réponse à un épisode pluvieux dépend de la vitesse initiale du glissement et de son degré de saturation ;
- (iii). L'apport d'eau par la fonte des neiges crée un fond de vitesse pouvant faciliter la réaction à un épisode pluvieux qui aurait pu rester sans conséquences ;
- (iv). La variation du niveau piézométrique et de la pression interstitielle contrôlent la vitesse du glissement ;
- (v). La tolérance en la fluctuation de la piézométrie est très faible par endroit, environ 10% de la hauteur de la masse en mouvement ;
- (vi). Le comportement des matériaux se rapproche de celui d'un fluide de Bingham quand le niveau piézométrique augmente ;
- (vii). Les coulées rapides, comme celle de 1988 correspondent à une fluidification et une accélération brutales du front du glissement suite à un apport d'eau important (fonte des neiges, orage) et à une augmentation de la pression interstitielle ;
- (viii). Le fonctionnement d'une coulée de boue est saccadé, avec de fortes variations de vitesses (de 0,5 à 15m.s). Sa durée est variable, le plus souvent quelques minutes, parfois plusieurs heures.

La vitesse du glissement de La Valette, en relation avec la pluviométrie et les circulations d'eau, est détaillée dans van Asch & Nieuwenhuis (1994), van Beek (1996), Mahaut (1996), Squarzoni *et al* (2003), Le Mignon (2004) ; van Asch (2005), van Asch *et al* (2007).

### ***1.2.3. Mesures de protections passives et actives.***

Le rôle évident de l'eau dans l'évolution du glissement de La Valette, ainsi que la menace d'une coulée de boue sur la commune de Saint-Pons ont motivé la réalisation de plusieurs travaux, supervisés par le service RTM de Barcelonnette,

depuis 1988. Les premières mesures, dites '**passives**', ont pour but de diminuer la vulnérabilité des éléments exposés sur le cône torrentiel :

- (i). En 1988, un barrage écrêteur, servant de piège à matériaux, a été construit juste à l'amont du cône de déjection (cf. annexe 4d). Selon la pente des atterrissements, le piège peut contenir de 28000 m<sup>3</sup> (pente de 0%) à plus d'un million de m<sup>3</sup> de matériaux (pente de 15%). Pour une pente moyenne de 7,5%, qui est le scénario le plus probable, le volume de stockage est estimé à 100000 m<sup>3</sup> environ ;
- (ii). Peu après, un dispositif de surveillance et d'alerte (plan ORSEC) a été mis en place entre le pied du glissement et le barrage. Il se compose d'une caméra infrarouge qui contrôle quotidiennement la disposition de cibles placées sur le terrain (cf. annexe 4c), et de capteurs de pression qui déclenchent l'alerte quand une coulée les atteint (cf. annexe 4a). Ces systèmes sont consultables à distance par le CODIS de Digne.

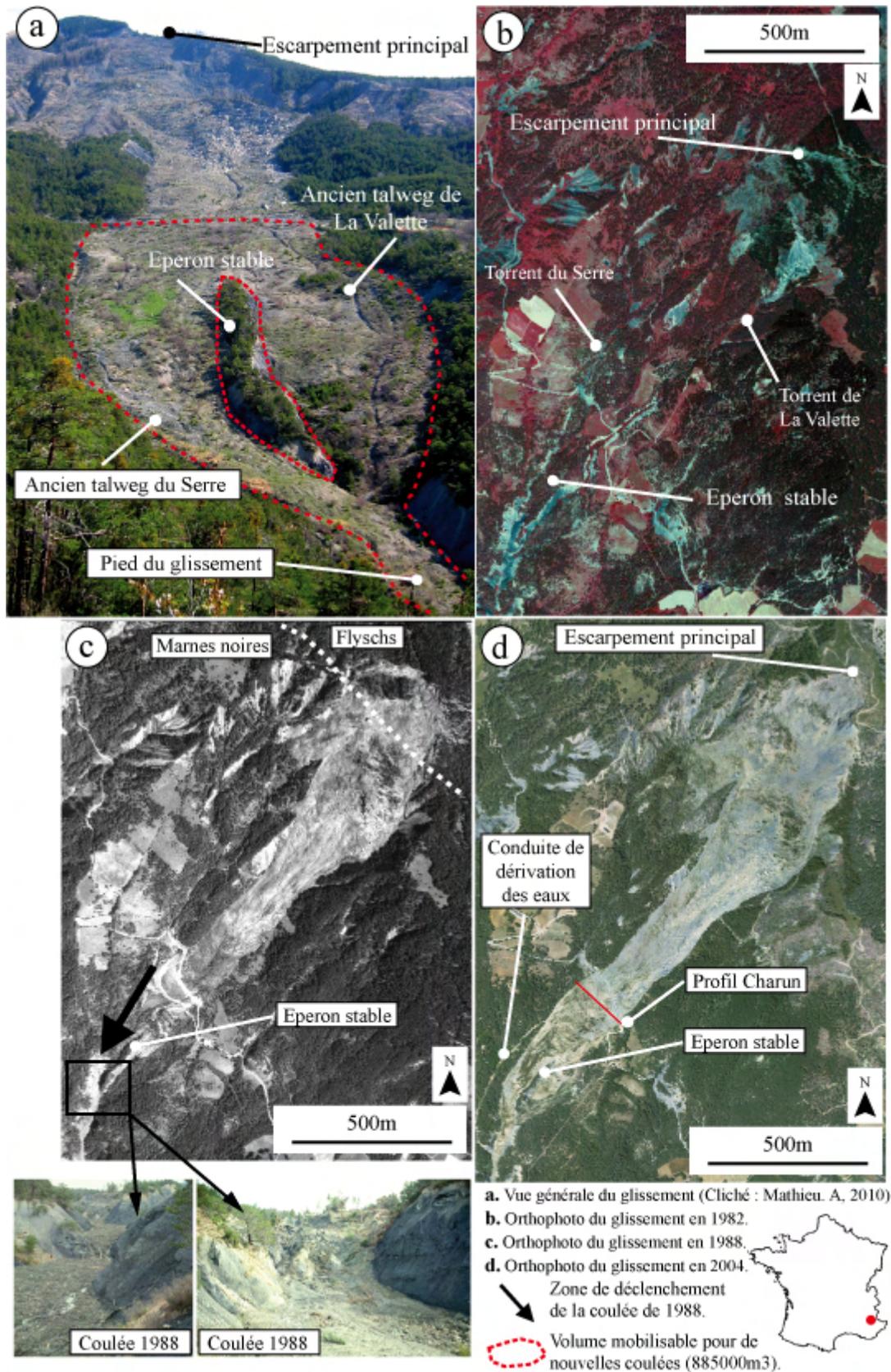
En raison de sa capacité d'absorption limitée au regard des volumes mobilisables (cf. figure 2a), le piège à matériaux ne pourra jouer qu'un rôle tampon dans le cas d'une coulée importante en durée et en volume. C'est pourquoi des mesures dites '**actives**' ont été menées sur le glissement lui-même. L'objectif est **de contrôler les apports en eau sur la surface et dans la masse en mouvement**. Ces eaux proviennent des précipitations, de la fonte des neiges et des sources de déversement au niveau du contact anormal, dont la source de La Valette qui se perd dans les matériaux déstabilisés et les imbibe. Les principaux travaux, effectués entre 1988 et 1991, sont :

- (i). La mise en place de drains siphons et de drains subhorizontaux afin de capter l'eau des sources au niveau du contact anormal, dans la partie haute du glissement, avant qu'elles n'imprègnent les argiles glaciaires situées en contrebas ;
- (ii). Le nivelage et le drainage de la partie médiane du glissement afin de récupérer les eaux de pluie via un réseau de fossés ;
- (iii). La mise en place de conduites étanches en PVC afin d'évacuer les eaux récupérées hors du glissement (cf. figure 2d) ;
- (iv). L'ensemencement de la partie centrale du glissement par du sainfoin, de la luzerne et de l'orge afin d'augmenter la capacité de pompage des eaux en excès par la végétation.

**Ces travaux ont permis de diminuer sensiblement la vitesse du glissement, de 40cm à 1cm par jour en moyenne au niveau du profil Charun** (Le Mignon & Cojean, 2002). La menace d'une coulée rapide, depuis le front du glissement, en cas de pluies intenses et soutenues est toutefois toujours d'actualité. Les travaux effectués et le fonctionnement du système d'alerte sont détaillés dans Evin (1990), Combes (1990), Mahaut (1996), Le Mignon & Cojean (2002), Le Mignon (2004).

Actuellement, un **Plan de Secours Spécialisé (PSS)** est à l'étude sur la commune de Saint-Pons. Il devrait s'organiser en plusieurs phases : **surveillance, vigilance, pré-alerte, alerte**. Le plan doit définir les conditions nécessaires pour passer d'une phase à l'autre, et pour chaque phase, décrire les actions à mener. En cas d'alerte, le plan doit avoir fait l'inventaire des moyens humains et techniques disponibles, et organiser la gestion de crise (qui fait quoi, et à quel moment, etc.).

Le risque 'coulée de boue' pour la commune de Saint-Pons est illustré en annexe 5.



*Figure 2. Présentation et évolution du glissement-coulée de La Valette.*

## II. Outils de recherche utilisés et approche méthodologique envisagée.

### II.1. Données d'observation à disposition.

Pour définir et mettre en place les scénarios de simulation de l'aléa 'coulée de boue', et plus largement pour répondre aux objectifs fixés, une méthodologie basée sur l'intégration de **données multi-source** a été développée. Les caractéristiques de ces données et leur utilisation pour cette étude sont détaillées dans le tableau 2.

*Tableau 2. Synthèse des données utilisées pendant l'étude.*

Type de données	Date des données	Provenance	Utilisation dans l'étude...	Description
Historique	De 1988 à 2009	Bibliographie	... pour obtenir des informations sur la coulée de 1988.	Données quantitatives sur l'extension de la coulée, son volume.
Topographique	2007, 2009	Missions LiDAR	... comme donnée d'entrée principale dans le modèle.	MNT et MNS avec une résolution de 50cm.
Photographique	1988 et 2010	Photos RTM et Mission de terrain	... pour obtenir des informations sur la coulée de 1988 et identifier les zones de contribution.	Données qualitatives
Ortho-photographique	1982, 1988, 1995, 2004, 2007, 2009	Missions aériennes IGN et missions LiDAR	... pour compléter les observations de terrain.	Ortho-photos du glissement de La Valette à différentes résolutions.
Géophysique, géotechnique	2009	Etude de la structure 3D du glissement	... pour définir les volumes initiaux utilisés dans les scénarios de simulations.	Mesures de résistivité et de sismicité.
Rhéologique	De 2002 à 2009	Bibliographie	... pour obtenir les paramètres rhéologiques utilisés dans le modèle.	Données quantitatives issues de tests en laboratoire (rhéomètre, plan incliné, etc.)

Les données historiques et photographiques (photos RTM) ont permis d'obtenir des informations sur la coulée de 1988 afin de caler le modèle à partir de cet évènement. Les photographies issues d'une mission de terrain (2010), et complétées par l'analyse des ortho-photos, ont permis, entre autre, d'identifier les zones de contribution qui sont susceptibles de fournir des volumes supplémentaires, et d'estimer ces volumes.

### II.2. MassMov2D : présentation et fonctionnement du modèle.

#### II.2.1. Concepts de base.

MassMov est un modèle numérique **bidimensionnel**, conçu pour simuler les phases de **propagation** et de **dépôt** de 'mouvements de type écoulements' (coulée de boue, lave torrentielle) guidés par la gravité sur une topographie complexe.

La masse glissée est considérée comme un **matériel monophasique** (l'eau et les particules solides forment un tout) dont le comportement est contrôlé par la **rhéologie** : c'est-à-dire la relation entre les efforts et les contraintes qui conditionnent la déformation et l'écoulement de la matière.

Plusieurs relations entre ces forces ont été implémentées dans MassMov, ce qui permet à l'utilisateur de simuler un évènement en utilisant différentes rhéologies. La flexibilité du modèle est aussi due à différentes conditions initiales et conditions aux limites pouvant être configurées. Son fonctionnement est guidé par un ensemble d'équations.

**Les équations de masse et de vitesse constituent les ‘fondations’ de MassMov** et définissent ses variables d’état (vitesse, épaisseur). Elles sont référencées dans un **espace euclidien bidimensionnel utilisant des coordonnées cartésiennes  $x, y$**  (cf. annexe 6.1). La longueur de la masse glissée est généralement beaucoup plus grande que son épaisseur, son gradient vertical de vitesse est donc faible et peut être négligé dans les calculs. L’équation de vitesse est donc intégrée à l’épaisseur de la masse glissée, autorisant une description 2D du phénomène se rapprochant d’une formulation 3D beaucoup plus complexe à implémenter (Begueria *et al*, 2009).

Les équations rhéologiques définissent les lois d’écoulement et décrivent le comportement de la masse glissée.

La loi de **Bingham** est utilisée pour un matériel constitué d’au moins 20% de particules fines (argiles, limons) permettant de lubrifier le contact entre les grains (Remaître, 2006 ; Gröndahl, 2008 ; Begueria *et al*, 2009). Le fluide est considéré comme viscoplastique (non-newtonien) à seuil : l’écoulement n’a lieu qu’au-delà d’une certaine valeur de contrainte appliquée. Une fois ce seuil dépassé, la relation entre les efforts et les contraintes est linéaire.

De cette loi est dérivée celle de **Herschel-Bulkley** qui s’utilise dans les mêmes circonstances. Mais dans ce cas, la relation entre les efforts et les contraintes n’est pas linéaire. Par exemple, la viscosité diminue progressivement avec un cisaillement plus important (Begueria *et al*, 2009) : c’est le cas des fluides rhéofluidifiants.

La loi de **Coulomb-viscous** s’applique à une gamme de fluides plus grande. La notion de ‘seuil d’écoulement’ est remplacée dans l’équation par une composante frictionnelle liée au frottement du fluide contre la surface sur laquelle il s’écoule : c’est l’angle de friction basal.

Toutes les lois précitées considèrent le régime d’écoulement du fluide comme laminaire. La loi de **Vollmy**, quant à elle, est utilisée pour les matériaux granulaires avec un comportement plus turbulent. Ce modèle rhéologique n’est pas utilisé dans cette étude car les coulées de boue ont un comportement visqueux.

Les équations principales et rhéologiques utilisées dans MassMov, leur concept, leur syntaxe, ainsi que leur implémentation numérique, sont détaillés dans Gröndahl (2008) et Begueria *et al* (2009).

### **II.2.2. Principe de fonctionnement.**

Un certain nombre de paramètres et de cartes doivent être fournis à MassMov. Ils définissent les conditions initiales et les conditions aux limites du modèle. Les arguments à fournir en entrée sont :

- (i). La rhéologie utilisée : de valeur 1 pour une rhéologie frictionnelle (loi de Vollmy) ou 2 pour une rhéologie visqueuse (lois de Bingham, Herschel-Bulkley, Coulomb viscous) ;
- (ii). La densité de l’écoulement (kg.m<sup>3</sup>) ;
- (iii). Le seuil d’écoulement, mesuré en pascal (Pa) et utilisé uniquement pour les écoulements visqueux ;
- (iv). La viscosité dynamique, mesurée en pascal-seconde (Pa.s). Sa valeur dépend de l’existence d’un gradient de vitesse d’écoulement dans la matière ;
- (v). L’angle de friction basal (°), dont la valeur dépend de la nature pétrographique des surfaces en contact (terrain support et masse glissée). Le frottement est très faible dans le cas d’une couche argileuse ou marneuse (cas de cette étude) ;

- (vi). L'angle de friction interne (°) dont la valeur dépend de la nature pétrographique des grains qui composent le matériel. Par exemple, elle augmente avec des grains anguleux et diminue si ils sont polis ;
- (vii). Le taux de fluidification (m.s), qui définit la vitesse de transition de l'état solide à liquide de la masse glissée ;
- (viii). Le nombre d'itérations dans la simulation. Une itération correspond à 1 seconde dans la réalité.

Les cartes à fournir en entrée, au format raster, sont :

- (i). La topographie, issue d'un MNT. Données scalaires (m) ;
- (ii). L'épaisseur initiale de la masse glissée. Données scalaires (m) ;
- (iii). Les frontières spatiales, ouvertes ou fermées, du domaine de simulation. Données booléennes ;
- (iv). La distance depuis le pied de la masse glissée. Données scalaires (m) ;
- (v). Une carte de points où seront mesurées, tout au long de la simulation, certaines variables (hauteur, vitesse, force d'impact).

**MassMov est un modèle dynamique** qui est exécuté autant de fois qu'il y a d'itérations indiquées dans le paramètre d'entrée correspondant. Les résultats issus d'une itération sont réutilisés comme variables initiales dans l'itération suivante, et ainsi de suite jusqu'à la fin de la simulation. Les données calculées sont la vitesse et la hauteur de la masse glissée, ainsi que des données dérivées (hauteur et vitesse maximum et minimum, force d'impact, etc.). Trois types de résultats sont obtenus :

- (i). Les cartes finales (hauteur et vitesse) issues de la dernière itération;
- (ii). Les cartes (hauteur et vitesse) issues de chaque itération. Regroupées en une 'série', elles permettent de visualiser la simulation sous la forme d'une vidéo ;
- (iii). Des graphiques donnant les hauteurs, vitesses et forces d'impact pour tous les points issus de la carte correspondante.

Par défaut, seules les séries de cartes sont proposées en sortie, les autres résultats sont obtenus en activant des lignes de code dans le script et en ajoutant la carte des points, qui est optionnelle. Le script de MassMov est organisé en différentes sections qui ont chacune un rôle précis, et qui structurent le fonctionnement du modèle (cf. annexe 6.2).

Les cartes raster utilisées dans MassMov sont réalisées sous SIG (ArcGis), puis exportées au format 'ascii' avant d'être converties au format 'PCRaster' (.map). Seule la carte définissant les frontières du domaine de calcul est faite directement sous PCRaster en convertissant la carte de la topographie au format booléen. Un exemple de cartes utilisées dans MassMov est proposé en annexe 7.

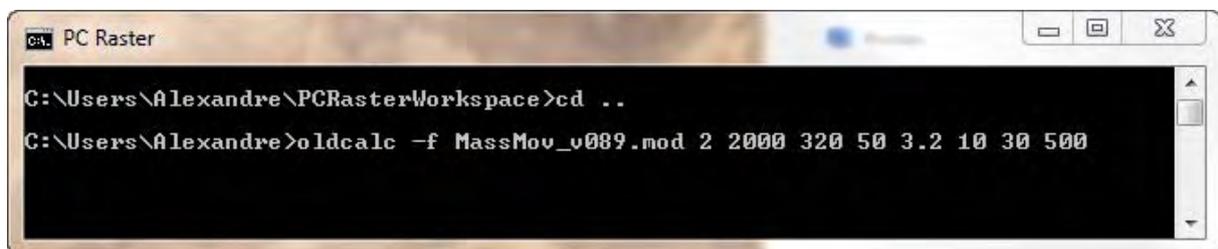
### ***II.2.3. PCRaster : un langage de programmation environnemental.***

MassMov a été implémenté sous la forme d'un script PCRaster. Le langage de programmation PCRaster est dit '**environnemental**' car sa syntaxe est conçue pour être facilement compréhensible par un chercheur ou un scientifique, qui réfléchit d'abord en terme de processus environnemental (Gröndahl, 2008 ; <http://pcraster.geo.uu.nl/>). Il n'est donc pas nécessaire de posséder des connaissances en programmation pour utiliser le script. L'utilisateur peut alors construire un modèle dans un temps très court ou modifier un code existant en y

intégrant de nouveaux concepts : par exemple, dans le cas de MassMov, une nouvelle rhéologie. PCRaster est donc un outil de modélisation basé sur les connaissances des spécialistes de l'environnement.

C'est aussi un logiciel intégrant les fonctions élémentaires d'un SIG (Begueria *et al*, 2009 ; <http://pcraster.geo.uu.nl/>). Il propose un ensemble d'outils permettant de faire diverses opérations sur le modèle : lancer les simulations, éditer les cartes d'entrée, visualiser les résultats à travers des cartes, des graphiques, des animations, etc. PCRaster dispose également de fonctions permettant de convertir les cartes d'entrée provenant de ArcGis (format ascii) vers son propre format (.map), et vice-versa. Les résultats de simulations peuvent, par exemple, être superposés à des ortho-photos afin de visualiser l'extension du phénomène modélisé.

Pour lancer une simulation avec MassMov, la commande PCRaster présentée en figure 3 est utilisée. Le fichier avec l'extension .mod est le script lui-même et les chiffres qui suivent correspondent aux paramètres d'entrée du modèle. Ils sont donnés ici en guise d'exemple et doivent être adaptés en fonction du cas d'étude. La commande PCRaster est 'oldcalc'.



```
C:\Users\Alexandre\PCRaster\workspace>cd ..
C:\Users\Alexandre>oldcalc -f MassMov_v089.mod 2 2000 320 50 3.2 10 30 500
```

*Figure 3. Commande PCRaster utilisée pour lancer MassMov.*

Plusieurs modèles pour la simulation de coulées de boue ou de laves torrentielles existent : une synthèse est présentée dans Gröndahl (2008). La plupart d'entre eux ont des inconvénients : impossibilité de simuler plusieurs rhéologies, le temps de calcul est très long, la prise en main difficile pour un non programmeur, etc.

MassMov est utilisé dans cette étude car sa **prise en main et sa compréhension sont aisées** et son implémentation dans PCRaster fournit une interface 'conviviale' rendant la manipulation du modèle et des données plus **intuitive**. Une documentation et une description détaillées de PCRaster sont disponibles à l'adresse suivante : <http://pcraster.geo.uu.nl/>.

### **II.3. Cartographie, validation du modèle et scénarios envisagés : choix méthodologiques.**

L'approche générale mise en place pour répondre aux objectifs de cette étude s'articule autour des principaux points suivants :

- (i). Une mission de terrain sur le glissement de La Valette afin de dresser **une carte morphologique** de sa partie aval et d'estimer les volumes potentiellement mobilisables pouvant s'ajouter à celui d'une coulée (**zones de contribution**) ;
- (ii). Un travail bibliographique préalable afin de cerner les principaux concepts de la **rhéologie** et d'obtenir une fourchette de valeurs raisonnables, pour certains paramètres d'entrée, qui serviront lors de la calibration du modèle ;
- (iii). Une **analyse de sensibilité** sur les principaux paramètres contrôlant le comportement rhéologique d'une coulée de boue, suivie du **calage** du modèle à partir des données de l'évènement de 1988 ;

(iv). Le **choix des scénarios de simulation** en termes de volume, de mode de rupture, de rhéologie et de localisation de la zone source.

### II.3.1. Estimation des zones de contribution sur le terrain.

L'approche utilisée pour effectuer un état des lieux géomorphologique de la partie aval de La Valette a été reprise de Thiery (2007) et Mathieu (2009). Elle se base sur des observations et des mesures de terrain, couplées à des analyses d'ortho-photos pour identifier et quantifier les zones de contribution susceptibles de fournir des volumes de matériaux supplémentaires à celui d'une coulée de boue. Ces observations ont été menées depuis le pied du glissement et jusqu'au piège à matériaux.

La cartographie du secteur a été effectuée selon le principe de la **légende morphodynamique** développée par Thiery (2007). Les différents domaines morphodynamiques sont représentés dans un aplat de couleur (cf. figure 4) dont la saturation définit le degré d'activité des processus associés, représentés par des figurés noirs.

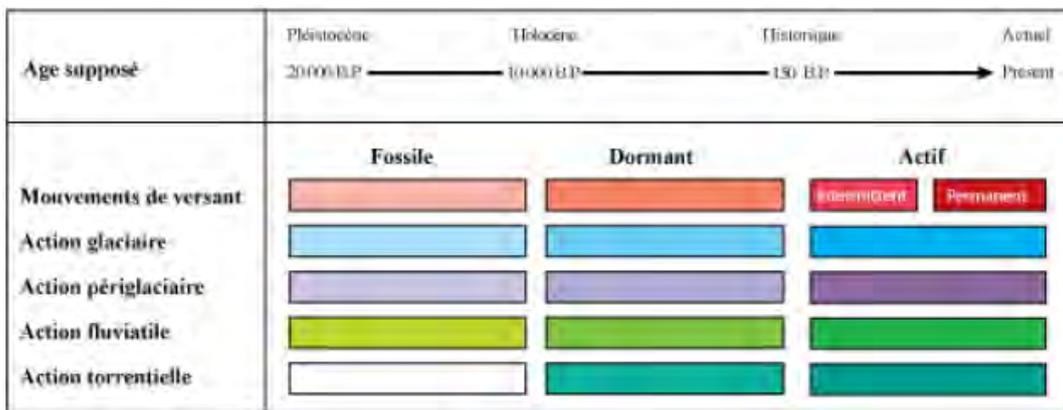


Figure 4. Principe de fonctionnement de la légende morphodynamique (Thiery, 2007).

Le principe de fonctionnement de la carte morphodynamique est détaillé dans Thiery (2007) et Mathieu (2009).

### II.3.2. Travail bibliographique sur les paramètres rhéologiques.

Pour simuler des coulées de boue, le modèle rhéologique le plus adapté est celui de **Bingham/Herschel-Bulkley** (Remaître, 2006), il a donc été utilisé pour cette étude. Selon Begueria *et al* (2009), pour ce type de modèle, les paramètres qui contrôlent le comportement d'une coulée sont **la densité du matériel, le seuil d'écoulement et la viscosité dynamique**. Il s'avère donc nécessaire d'obtenir, pour chacun de ces paramètres et d'autres si possible, une fourchette de valeurs raisonnables qui sera ensuite utilisée pour caler le modèle.

Les coulées de boue sont des événements soudains et souvent de courte durée. Les observations et les mesures in situ de leur comportement sont difficiles à obtenir. **L'estimation des paramètres rhéologiques se fait donc à postériori lors d'analyses en laboratoire** sur des matériaux issus du phénomène observé sur le terrain ou reconstitués artificiellement. Le Bassin de Barcelonnette, où se situe le glissement de La Valette, a été le sujet de nombreuses études sur la rhéologie des matériaux, fournissant une bibliographie conséquente sur le sujet. Les valeurs rhéologiques qui y sont présentées sont aisément transposables au cas de La

Valette car la géologie et les matériaux concernés sont identiques. Suite à ce travail bibliographique, des fourchettes de valeurs ont été obtenues pour :

- (i). La densité du matériel, de 1600 à 1850 (kg.m3) ;
- (ii). Le seuil d'écoulement, de 125 à 600 (Pa) ;
- (iii). La viscosité dynamique, de 75 à 230 (Pa.s).

Concernant les autres paramètres d'entrée de MassMov :

- (i). La rhéologie vaut **2** puisque la loi de Bingham/Herschel-Bulkley est utilisée dans cette étude ;
- (ii). L'angle de friction basal vaut **0** pour la loi de Bingham/Herschel-Bulkley ;
- (iii). Pour l'angle de friction interne, la lecture bibliographique a permis d'obtenir une fourchette de valeur de **29 à 32°** ;
- (iv). Aucune information sur la valeur que peut prendre le taux de fluidification (m.s) n'a été trouvée dans la bibliographie ;
- (v). Le nombre d'itérations ne dépend pas de la rhéologie et doit être défini de façon indépendante pour chaque simulation.

La rhéologie des matériaux présents dans le Bassin de Barcelonnette est détaillée dans Colas & Locat (1993), Malet *et al* (2002), Malet (2003), Malet *et al* (2003), Malet *et al* (2004), Malet *et al* (2005), Remaître *et al* (2003), Remaître *et al* (2005), Remaître (2006), Blinjenberg (2007).

### **II.3.3. Analyse de sensibilité et calage du modèle.**

L'analyse de sensibilité a pour but d'identifier **le rôle de chaque paramètre sur le comportement d'une coulée de boue** en termes de hauteur, de vitesse et d'extension des dépôts. Les paramètres qui ont été testés sont ceux qui contrôlent la rhéologie de l'écoulement (cf. partie II.3.2), ainsi que le taux de fluidification pour lequel aucune information n'a été obtenue dans la bibliographie.

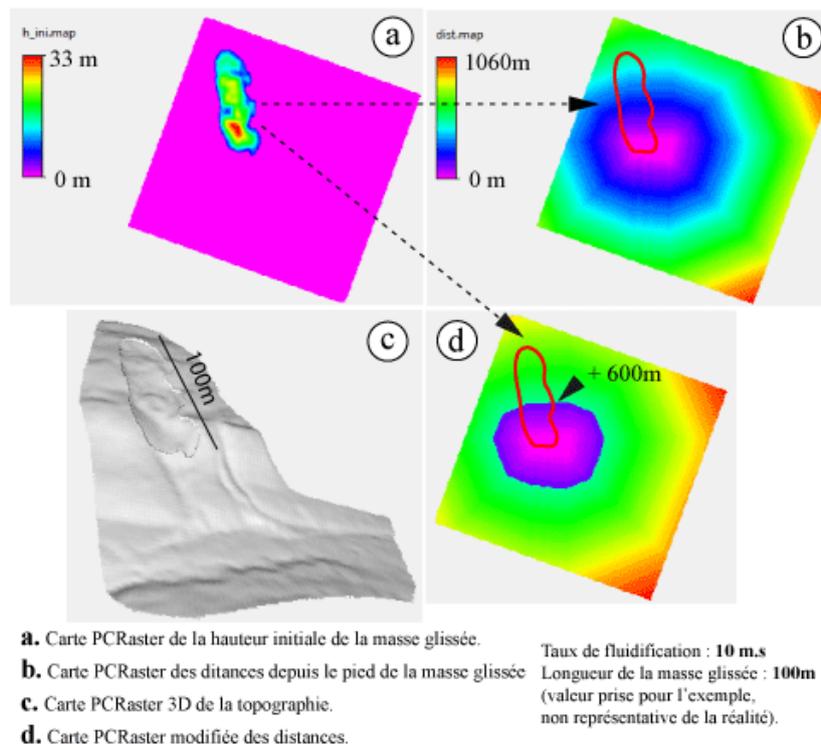
Cette analyse a été effectuée en utilisant les paramètres fournis à titre d'exemple avec la documentation de MassMov pour une rhéologie de Bingham. À partir de ces valeurs et pour chaque paramètre cité précédemment, une augmentation et une diminution de 25%, 50%, 75% et 100% a été appliquée. La topographie utilisée est celle de la partie avale de La Valette, issue des missions LiDAR (précision de 50cm). Elle a été interpolée pour obtenir des cartes raster utilisées en entrée avec une résolution de 5m (1 pixel = 25m<sup>2</sup>), suffisante pour effectuer cette analyse. Le volume initial a été creusé artificiellement sur la rive droite de l'éperon stable. Les résultats sont observés sur les cartes en sortie de simulation et au niveau de points de mesures disposés sur le trajet de l'écoulement (graphiques). De cette analyse de sensibilité, il ressort les principales observations suivantes :

- (i). La variation de la densité du matériel doit être d'au moins 25 à 50% pour avoir un effet sur l'extension des dépôts. Une valeur plus grande aura tendance à augmenter la distance parcourue par l'écoulement, et vice-versa. Les hauteurs et les vitesses ne sont pas influencées. Ce paramètre est peu sensible ;
- (ii). Une faible variation du seuil d'écoulement (25%) a des effets prononcés sur les vitesses et l'extension des dépôts. Si le seuil est élevé, la contrainte de cisaillement nécessaire pour mettre en mouvement les matériaux devra être d'autant plus grande et leur mobilisation sera difficile : l'écoulement n'ira pas très loin et les vitesses seront peu élevées. Si le seuil est bas, l'inverse

- (iii). Une variation de la viscosité dynamique de l'ordre de 25 à 50% a des effets surtout visibles sur les vitesses de parcours, un peu moins concernant l'extension des dépôts. Les hauteurs ne sont pas influencées. Plus la viscosité sera faible, plus l'écoulement sera fluide et les vitesses augmenteront. L'écoulement n'ira pas forcément plus loin, mais l'extension maximale sera atteinte un peu plus rapidement. Ce paramètre est sensible ;
- (iv). Une variation du taux de fluidification (m.s) de l'ordre de 25% a des effets prononcés sur l'extension des dépôts, et dans une moindre mesure sur les vitesses. Plus il est élevé plus la fluidification sera instantanée, ce qui donnera une plus grande impulsion lors de la mobilisation des matériaux : l'extension maximale des dépôts sera non seulement plus grande, mais sera atteinte aussi plus rapidement. Si le taux est faible, les matériaux n'auront pas assez d'impulsion et ne s'écouleront pas ou peu. Ce paramètre est très sensible.

L'analyse de sensibilité a donc permis de mettre en avant **l'influence du seuil d'écoulement dans le comportement rhéologique d'une coulée de boue**. Ainsi, même une coulée très fluide (faible viscosité) ne se propagera pas très loin si le seuil d'écoulement est élevé. C'est bien ce paramètre qui contrôle en priorité la dynamique de l'écoulement : cette observation est confirmée dans Coussot (1996).

**Le paramètre 'taux de fluidification', également très sensible**, est plus difficile à cerner. Son fonctionnement dans le modèle est étroitement lié à la carte des distances : ils conditionnent à eux deux le mode de rupture de la masse glissée (cf. figure 5).



*Figure 5. Relation entre le taux de fluidification et la carte 'distances' de PCRaster.*

Cette figure reprend l'exemple du glissement de **Turnoff Creek** présenté en annexe 7. Si la masse glissée fait 100m de long (longueur non réelle, prise pour

exemple) et que le taux de fluidification est de 10 m.s, alors il faudra 10 secondes pour mettre en mouvement l'ensemble des matériaux depuis l'aval jusqu'à l'amont. Si la valeur du taux est augmentée à 100 m.s, alors la masse se fluidifiera en 1 seconde. MassMov utilise la carte des distances (cf. figure 5b) pour effectuer ce calcul. Or, il est peu réaliste qu'une telle masse se fluidifie instantanément. Ceci montre qu'une valeur trop élevée du taux de fluidification n'est pas pertinent. À l'inverse, si le taux est faible (1 m.s), il faudra 100 secondes pour mettre en mouvement l'ensemble des matériaux : l'impulsion ne sera pas assez importante et l'écoulement ne se fera pas ou peu, ce qui n'est pas intéressant pour une simulation. Il apparaît donc que choisir des valeurs trop extrêmes pour le taux de fluidification n'est pas pertinent.

**L'analyse de sensibilité s'est donc aussi intéressée à la carte des distances.** Elle a bien été faite sur les données de Le Valette mais l'approche utilisée est illustrée ici avec les données de Turnoff Creek.

Par défaut les distances depuis le pied de la masse glissée sont progressives (cf. figure 5b). Mais la carte a été modifiée afin d'observer les conséquences sur les phases de propagation et de dépôt. Ainsi, à environ la moitié de la masse glissée, les distances ont été augmentées d'une certaine valeur (cf. figure 5d). Puisque le taux de fluidification est de 10 m.s, une première vague s'écoulera et il faudra attendre 60 secondes ( $60 \times 10 = 600$ ) pour que le reste des matériaux s'écoule, c'est la deuxième vague.

Les résultats de cette analyse ont démontré que **l'extension des dépôts varie de plusieurs mètres ou dizaines de mètres selon le mode de rupture (constant ou par vague)**. Cela peut s'expliquer par le fait que la première vague modifie la topographie sur laquelle va s'écouler la vague suivante.

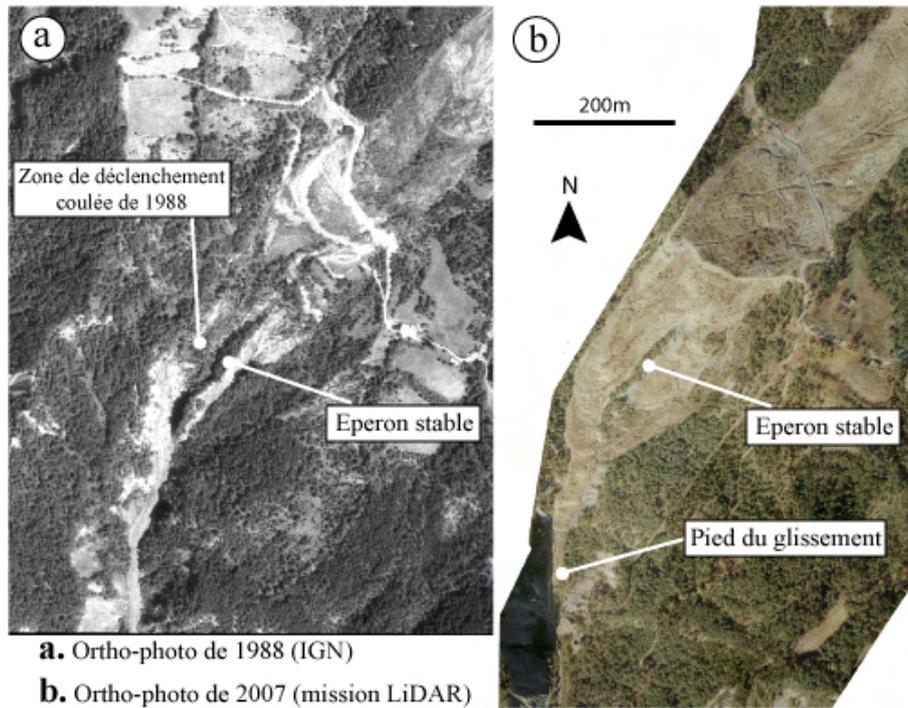
Pour caler le modèle sur le cas de La Valette, des données historiques sur la coulée de boue de 1988 ont été utilisées. Cet événement a été choisi car, d'une part il est relativement bien documenté et, d'autre part, c'est le plus important qui soit survenu à La Valette depuis le déclenchement du glissement en 1982.

La coulée de 1988 a mobilisé un volume d'environ 50000m<sup>3</sup>. Elle s'est déclenchée en rive droite de l'éperon stable, vers la cote 1400m, et s'est arrêtée au niveau des seuils RTM (Mahaut, 1996 ; Malet, 2003 ; Le Mignon, 2004) : son extension est d'environ 500m (Colas & Locat, 1993). Sur la base de ces informations, un scénario similaire a été mis en place afin de caler le modèle et d'obtenir les mêmes résultats.

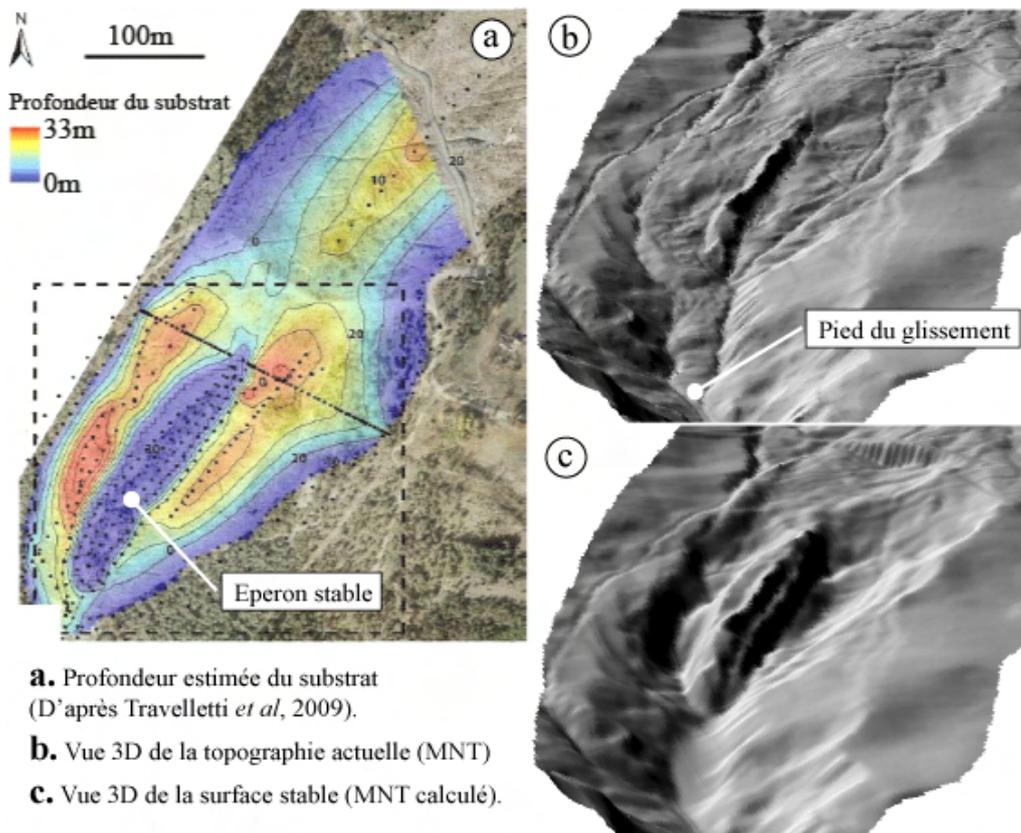
La topographie utilisée est issue d'un MNT de résolution 50cm (données LiDAR) qui a été interpolé à 2m. **Cette résolution est un bon compromis entre la finesse des résultats et le temps de calcul**, qui dépend du nombre de pixels qui composent les cartes raster utilisées dans MassMov. En 1988, les talwegs qui passent de chaque côté de l'éperon stable n'étaient pas encore remplis par les argiles glaciaires provenant de l'amont, ce qui est le cas maintenant (cf. figure 6). Pour être le plus fidèle aux conditions de 1988, il a été envisagé de recréer la topographie de l'époque.

Une étude récente a permis, sur la base de mesures géotechniques et d'investigations géophysiques (résistivité, tomographie sismique), **d'estimer la profondeur du substrat stable par rapport à la surface topographique** (Travelletti *et al*, 2009). L'épaisseur ainsi estimée de la masse en mouvement (cf. figure 7a) a été soustraite de la topographie actuelle (cf. figure 7b) afin d'obtenir la topographie initiale (cf. figure 7c). Le volume d'argiles glaciaires accumulées autour de l'éperon marneux est estimé à environ 885000m<sup>3</sup>. Dans cette masse, un volume de

50000m<sup>3</sup> a été retenu vers la cote 1400m : c'est la zone source pour le scénario de calage du modèle.



*Figure 6. Diachronie 1988/2007 du glissement-coulée de La Valette.*

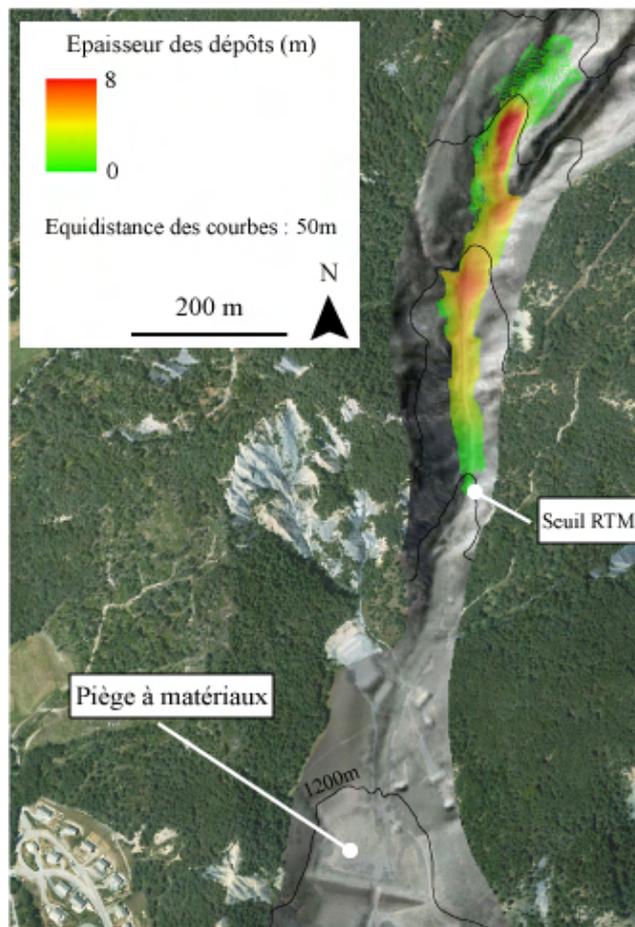


*Figure 7. Estimation de la profondeur du substrat autour de l'éperon stable.*

**Le modèle a été calé en modifiant la valeur de la densité, du seuil d'écoulement et de la viscosité dynamique tout en restant dans leur fourchette de valeur respective.** La valeur de l'angle de friction interne, estimée dans la bibliographie entre 29° et 32°, sera de 30°. Enfin, puisqu'une valeur trop haute ou trop basse du taux de fluidification n'est pas représentative de la réalité, et qu'aucune information à son sujet n'a été trouvée dans la bibliographie, le choix le plus pertinent a été de conserver sa valeur par défaut (10 m.s). Cette valeur est proposée dans la documentation de MassMov pour une rhéologie de type Bingham.

**Un premier essai de calage a été réalisé avec les valeurs au minimum.** Si dans ces conditions la coulée va au moins jusque là où s'étendait celle de 1988, alors il sera possible de caler le modèle tout en restant dans les fourchettes de valeurs issues de la bibliographie. Ce fut le cas, et MassMov a ainsi été calé sur l'évènement de 1988. Le résultat obtenu, présenté en figure 8, est très proche des observations faites en 1988. Plusieurs jeux de paramètres permettaient d'obtenir des résultats satisfaisants, et le modèle a été validé avec les paramètres suivants :

- (i). Rhéologie : **2** ;
- (ii). Densité : **1760 kg.m<sup>3</sup>** ;
- (iii). Seuil d'écoulement : **540 Pa** ;
- (iv). Viscosité dynamique : **205 Pa.s** ;
- (v). Angle de friction basal : **0** ;
- (vi). Angle de friction interne : **30°** ;
- (vii). Taux de fluidification : **10 m.s**.



*Figure 8. Résultat de l'étape de calage et de validation de MassMov sur La Valette.*

### II.3.4. Choix des scénarios de simulation.

Comme en témoigne l'évènement de 1988, la menace d'une éventuelle coulée de boue sur La Valette provient du volume important d'argiles glaciaires accumulées autour de l'éperon marneux. Un forçage climatique (orage, pluies intenses) peut rapidement fluidifier le pied du glissement qui va évoluer sous la forme d'une coulée rapide. **À partir de cette zone source, différents scénarios dits 'principaux' seront proposés.**

Récemment, une coulée a été observée dans la partie amont du glissement. L'évolution régressive de l'escarpement principal, importante depuis 2002, déstabilise constamment les matériaux situés en contrebas : les conditions hydrogéologiques sont donc très changeantes et il est difficile de contrôler les apports en eau. Cette régression est guidée par un ensemble de fractures dans les flyschs (Travelletti *et al*, 2010). Toutes les conditions sont donc réunies pour le déclenchement potentiel de nouvelles coulées de boue. **À partir de cette zone source, différents scénarios dits 'secondaires' seront proposés.**

Les phases de propagation et de dépôt d'une coulée de boue sont étroitement liées à la topographie, dont la bonne représentation est indispensable pour obtenir une simulation fiable et pertinente (Gröndahl, 2008). La topographie utilisée pour les scénarios provient de données LiDAR, d'une résolution de 50cm (cf. tableau 2 p13). Un MNT et un MNS (pour le bâti) ont été assemblés puis interpolés à 2m. Cette résolution permet un bon compromis entre la précision des résultats à l'échelle du 1/5000<sup>ème</sup> et les temps de calculs nécessaires pour les simulations. Le résultat obtenu est présenté en annexe 8.

Pour définir les différentes zones sources dans la partie avale du glissement (scénarios principaux), **la méthodologie utilisée lors du calage du modèle a été reprise** (cf. figure 7 p21). Elle a permis d'obtenir l'épaisseur réelle de la masse en mouvement autour de l'éperon stable. **En remontant depuis le pied du glissement, plusieurs volumes initiaux ont été découpés dans la masse instable afin d'obtenir les zones sources** (cf. figures 9a à 9g).

**Un seul volume a été défini pour les scénarios secondaires** (partie amont du glissement). Son estimation est le résultat d'une étude menée sur l'évolution régressive de l'escarpement principal. La méthode utilisée est similaire à celle qui a permis d'estimer la profondeur du substrat dans la partie avale (cf. figure 7 p21), elle est détaillée dans Travelletti *et al* (2010). Le volume initial obtenu est illustré par la figure 9h.

Pour chaque volume obtenu, deux modes de rupture sont proposés : **constant et par vagues**. Cela permet de prendre en compte les observations, issues de l'analyse de sensibilité, sur le rôle de la carte des distances (cf. partie II.3.3). Ainsi, pour un même volume, les résultats issus de deux modes de rupture pourront être comparés. Pour cela, le volume initial est découpé en plusieurs parties équitables (deux, trois, ou quatre) qui fourniront l'apport des matériaux en plusieurs vagues.

La première partie de cette étude (cf. partie I.1) a mis en évidence une certaine ambiguïté sur la distinction entre les aléas 'coulée de boue' et 'lave torrentielle'. Afin de prendre en compte cette observation, **une rhéologie plus fluide a été simulée avec certains volumes seulement et un mode de rupture constant uniquement**. Les résultats permettront de comparer l'effet des deux rhéologies pour un même scénario. Pour cette rhéologie dite 'fluide', les valeurs utilisées pour les paramètres d'entrée sont très proches de celles qui ont permis de valider MassMov pour l'aléa

'lave torrentielle' sur le torrent de Faucon, voisin du torrent de La Valette (Gröndahl, 2008) :

- (i). Rhéologie : **2** ;
- (ii). Densité : **1850 kg.m<sup>3</sup>** ;
- (iii). Seuil d'écoulement : **390 Pa** ;
- (iv). Viscosité dynamique : **70 Pa.s** ;
- (v). Angle de friction basal : **0** ;
- (vi). Angle de friction interne : **15°** ;
- (vii). Taux de fluidification : **10 m.s**.

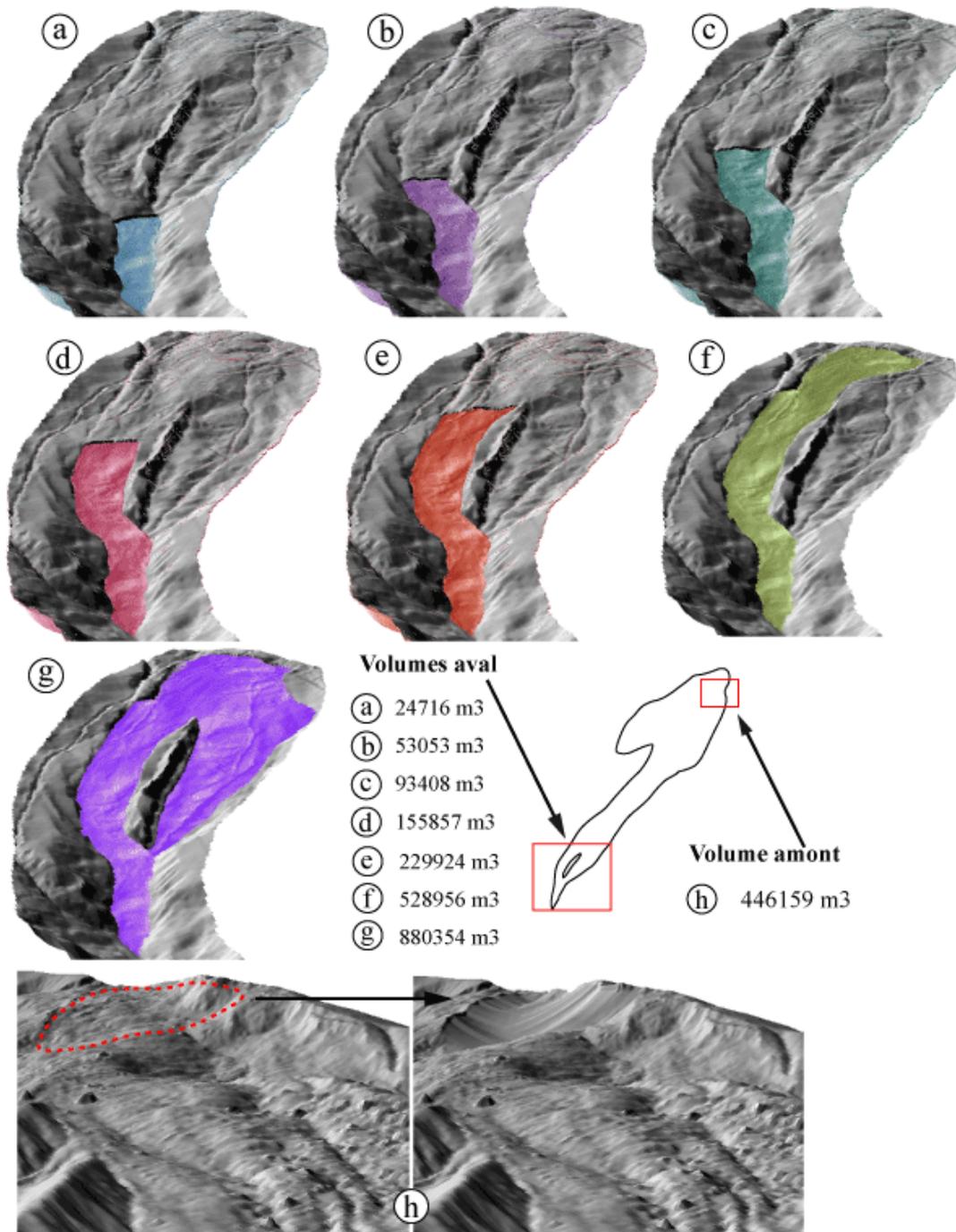
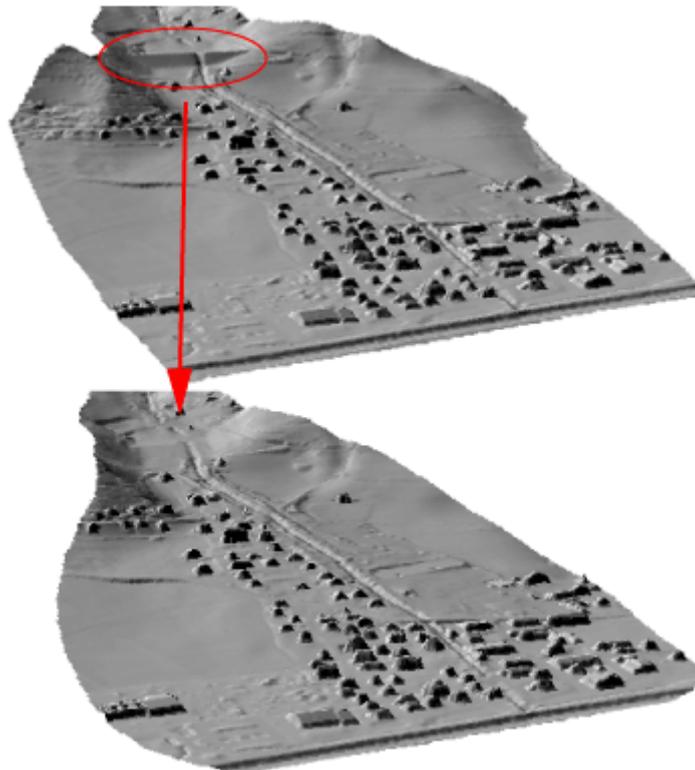


Figure 9. Localisation des volumes initiaux utilisés dans les scénarios de simulation.

**Pour les scénarios dont les matériaux atteignent le piège situé à l'aval, des scénarios équivalents mais avec une topographie 'sans barrage' ont été mis en place** (cf. figure 10). Cela permettra de quantifier l'effet du piège sur une coulée de boue : temps de remplissage, écrêtement des vitesses et des hauteurs, etc.



*Figure 10. Comparaison de la topographie avec et sans barrage.*

L'ensemble des scénarios de simulation ainsi obtenus est résumé en annexe 9.

### **III. Résultats observés et discussion.**

#### **III.1. Estimation des zones de contribution.**

La cartographie morphodynamique du secteur aval du torrent de La Valette a mis en évidence un certain nombre d'instabilités de versants. Les matériaux mobilisés sont susceptibles d'être emportés par une coulée de boue provenant de l'amont et d'augmenter le volume total en mouvement. Cependant, les observations et mesures de terrain ont permis d'estimer que **le volume issu de ces zones de contribution est de 9000m<sup>3</sup> environ**. C'est peu au regard des masses mises en mouvement autour de l'éperon stable. Aussi, il n'a pas été jugé nécessaire de prendre en compte ce volume dans l'estimation de l'aléa 'coulée de boue' sur La Valette. Une planche d'illustrations, un extrait de la carte morphodynamique ainsi qu'une notice explicative sont toutefois proposés en annexe 10.

### III.2. Présentation et discussion des résultats de simulation.

Les simulations ont démontré qu'une coulée de boue, dont la zone source est située au niveau de l'éperon stable, doit mobiliser un volume d'au moins 200000 m<sup>3</sup> pour atteindre le barrage et remplir partiellement le piège à sédiments ménagé à l'amont.

Pour les scénarios dont le volume est inférieur à 200000m<sup>3</sup>, les résultats sont présentés en termes de **hauteur des dépôts, de vitesses de déplacement, d'extension et de durée de l'évènement**. Pour les scénarios dont le volume est supérieur, les résultats seront plutôt présentés en termes **de force d'impact sur le bâti, de durée de remplissage du piège à matériaux, de capacité d'écrêtement des vitesses et des hauteurs**.

Les mesures ont été faites à différents points sur le trajet qu'emprunteront les scénarios. La position de ces points est indiquée en annexe 8.

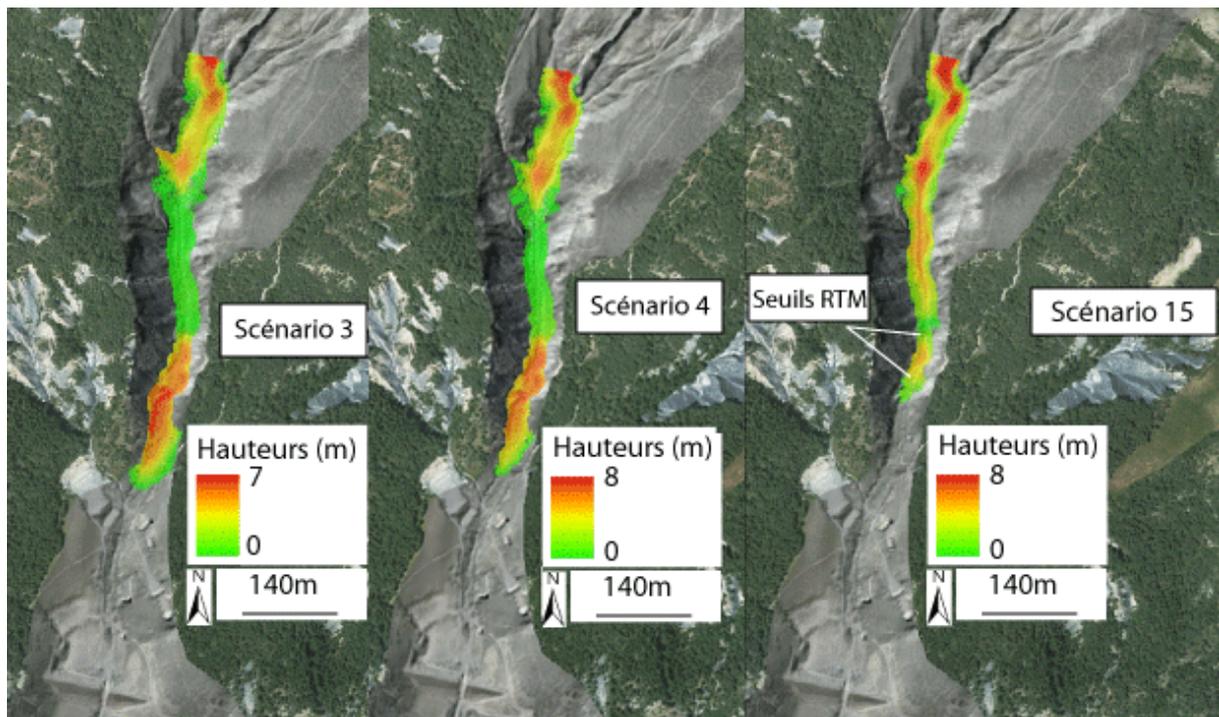
#### **III.2.1. Estimation de l'aléa : observations des scénarios inférieurs à 200000m<sup>3</sup>.**

Les scénarios 1 et 2 indiquent qu'un volume d'environ 25000m<sup>3</sup> qui se détache du pied du glissement ne se propagera pas loin vers l'aval. Cela peut s'expliquer par le fait qu'au niveau de la zone source, la topographie est relativement plane : la gravité n'est pas suffisante pour emmener les matériaux mis en mouvement. **L'évènement dur entre 45 et 105 secondes selon le mode de rupture considéré, durée pendant laquelle il parcourt moins de 30m par apport au pied du glissement.** Il n'a donc pas été jugé intéressant de proposer ici une carte d'extension des dépôts.

Les scénarios mobilisant un volume d'environ 50000m<sup>3</sup>, similaire à celui de 1988, sont plus intéressants. Pour un mode de rupture constant et la rhéologie visqueuse (scénario 3), l'évènement dur un peu plus de 6 minutes. Au niveau du premier point de mesure, le front de la coulée fait près de 5m de haut et sa vitesse est de 5,5 m.s. Quand la coulée atteint le deuxième point de mesure (1min 40sec plus tard), sa vitesse n'est plus que de 1,5 m.s pour une hauteur située entre 3m et 4m. Entre temps, les contacteurs ont déclenché l'alerte. La vitesse maximale moyenne atteinte est de 7,5 m.s. Comme le suggérait l'analyse de sensibilité, un mode de rupture par vague (scénario 4) a des conséquences sur **l'extension maximale des dépôts qui est moindre** (cf. figure 11).

Le scénario 3 a été proposé avec la rhéologie plus fluide (scénario 15). L'évènement est logiquement plus rapide avec une vitesse maximale moyenne de 13 m.s et une durée de 4 minutes environ. **Malgré sa fluidité, son extension est moins grande** (cf. figure 11). Cela semble être dû au fait que plus de matériaux ont été stockés à l'amont avec cette rhéologie.

Pour chaque scénario présenté par la figure 11, **les seuils RTM ont prouvé leur efficacité**. Dans le cas de la rhéologie fluide (scénario 15), ils ont stoppé le phénomène. Pour les deux autres scénarios, ils ont permis de stocker des volumes importants de matériaux qui se seraient certainement propager plus loin en aval.



*Figure 11. Cartes des hauteurs de dépôts (scénarios 3, 4, 15).*

Les scénarios 5 et 6 mobilisent un volume d'environ 93000m<sup>3</sup>, leur durée respective est de 7,5 minutes et 9 minutes. Là aussi, le mode de rupture agit sur l'extension de la coulée. Pour le scénario 5, à la fin de la simulation, 4m de dépôts se trouvent à l'entrée du piège à matériaux. Ces scénarios n'apportent pas d'informations supplémentaires mais une carte des hauteurs est toutefois proposée en annexe 11 pour le scénario 5 afin de visualiser l'aléa.

Les scénarios 7 et 8 mobilisent un volume de 155000m<sup>3</sup> environ sur une durée de presque 12 minutes. Le troisième point de mesure, situé à l'entrée du piège à matériaux, est atteint en seulement 1 min 40sec sur les 12 minutes que compte la simulation (pour une rupture constante). Cela s'explique par la topographie : **la coulée emprunte d'abord un chenal étroit et accélère**, puis elle arrive au niveau du piège à sédiments et ralentit en s'étalant sur une topographie plus 'ouverte' et moins encaissée.

La coulée commence à remplir le piège sur une hauteur de 5 à 6m mais ne touche pas le barrage. À ce moment, sa vitesse est descendue à 3 m.s. Dans le cas d'une coulée en plusieurs vagues successives, **une différence de vitesse entre les vagues est observée au niveau du premier point de mesure** : la seconde bénéficie probablement d'une topographie 'lissée' par les dépôts issus de la première vague (cf. figure 12d). Cette différence ne s'observe pas sur les points de mesure suivants car la deuxième vague à rattraper la première.

Le scénario 7 a été proposé avec la rhéologie plus fluide (scénario 16). Les vitesses sont logiquement plus élevées, avec une pointe à 20 m.s. La durée de l'évènement s'en trouve donc réduite : 3 minutes seulement contre 12 minutes pour le scénario 7. **L'extension des dépôts est, là aussi, moins grande** (cf. figure 12c). Quelque soit le scénario, **les seuils RTM prouvent à nouveau leur efficacité** car les matériaux se déposent sur des hauteurs importantes à leur niveau (cf. figure 12a, b, c). Le déclenchement du système d'alerte se fait respectivement au bout de 1 minute, 2 minutes et 50 secondes pour les scénarios 7, 8 et 16.

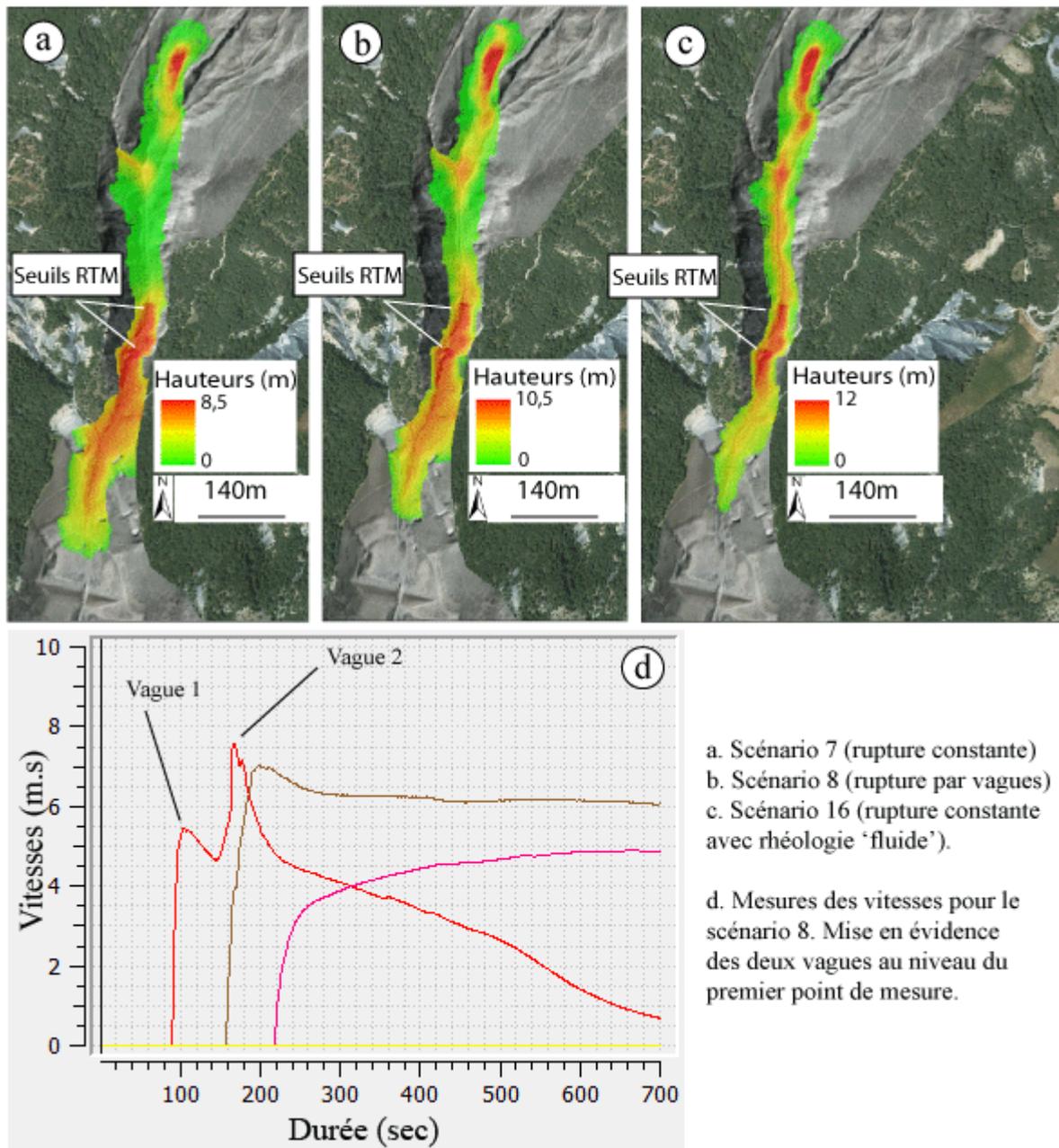


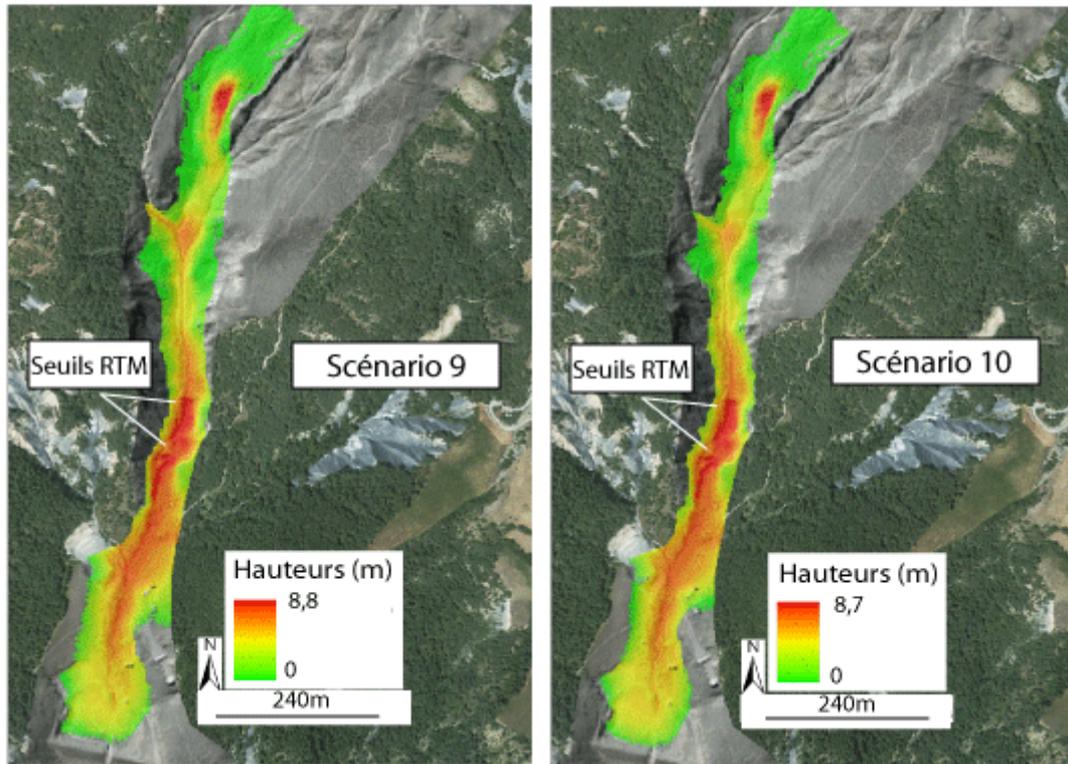
Figure 12. Cartes des hauteurs de dépôts et vitesses de déplacement (scénarios 7, 8, 16).

### III.2.2. Estimation de l'aléa : observations des scénarios supérieurs à 200000m<sup>3</sup>.

Les scénarios 9 et 10 mobilisent un volume d'environ 230000m<sup>3</sup> pendant 30 minutes. Leur durée plus longue est due au temps de remplissage partiel du piège à matériaux sous 4m de sédiments en moyenne. Dans les deux cas la coulée a été nettement ralentie, les vitesses au niveau du barrage sont de l'ordre du décimètre par seconde vers la fin de la simulation. Les résultats en terme de vitesse, de hauteur des matériaux et d'extension des dépôts est presque identique quelque soit le mode de rupture (cf. figure 13). La seule différence vient du fait que le scénario 10 a atteint, au bout de 27 minutes de simulation, le quatrième point de mesure, situé contre le barrage. Une force d'impact a pu être calculée : elle est de 6600 kN. Dans les deux cas, **les seuils RTM prouvent toujours leur efficacité** : en

diminuant les vitesses de déplacement, ils permettent de retenir des volumes conséquents d'atterrissements (cf. figure 13). Le déclenchement du système d'alerte se fait respectivement au bout de 1 minute, 2 minutes et 50 secondes pour les scénarios 9, 10 et 17.

Le scénario 9 a été proposé avec la rhéologie plus fluide (scénario 17). Les vitesses de déplacement sont de l'ordre de 6 à 8 m.s en moyenne, contre 3 à 4 m.s pour le scénario 9. La durée de l'évènement n'est que de 11 minutes. **Malgré la fluidité accrue, l'extension des dépôts n'est pas plus grande** et le piège à matériaux est à peine rempli : cette observation a déjà été faite précédemment, elle n'est pas illustrée ici.



*Figure 13. Cartes des hauteurs de dépôts (scénarios 9 et 10).*

Pour les scénarios 9, 10 et 17, la topographie a été modifiée et le barrage supprimé afin de comparer les résultats (scénarios 19, 20 et 25). Mais le piège à matériaux n'a pas assez été rempli pour que sa suppression puisse changer les résultats observés précédemment.

Les scénarios mobilisant un volume de 530000m<sup>3</sup> sont les premiers à remplir complètement et à dépasser le piège à sédiments. Leur durée est d'environ 30 minutes. Le mode de rupture n'apporte ici aucune différence entre les scénarios 11 et 12, qui, outre le temps mis pour atteindre le barrage, 2min et 30sec contre 5min et 30sec, sont très similaires en termes d'extension des dépôts, de vitesse de déplacement et d'épaisseur des sédiments. La figure 14 compare les résultats du scénario 11 (mode de rupture constant et rhéologie visqueuse) avec le scénario 21 (le même mais sans le barrage).

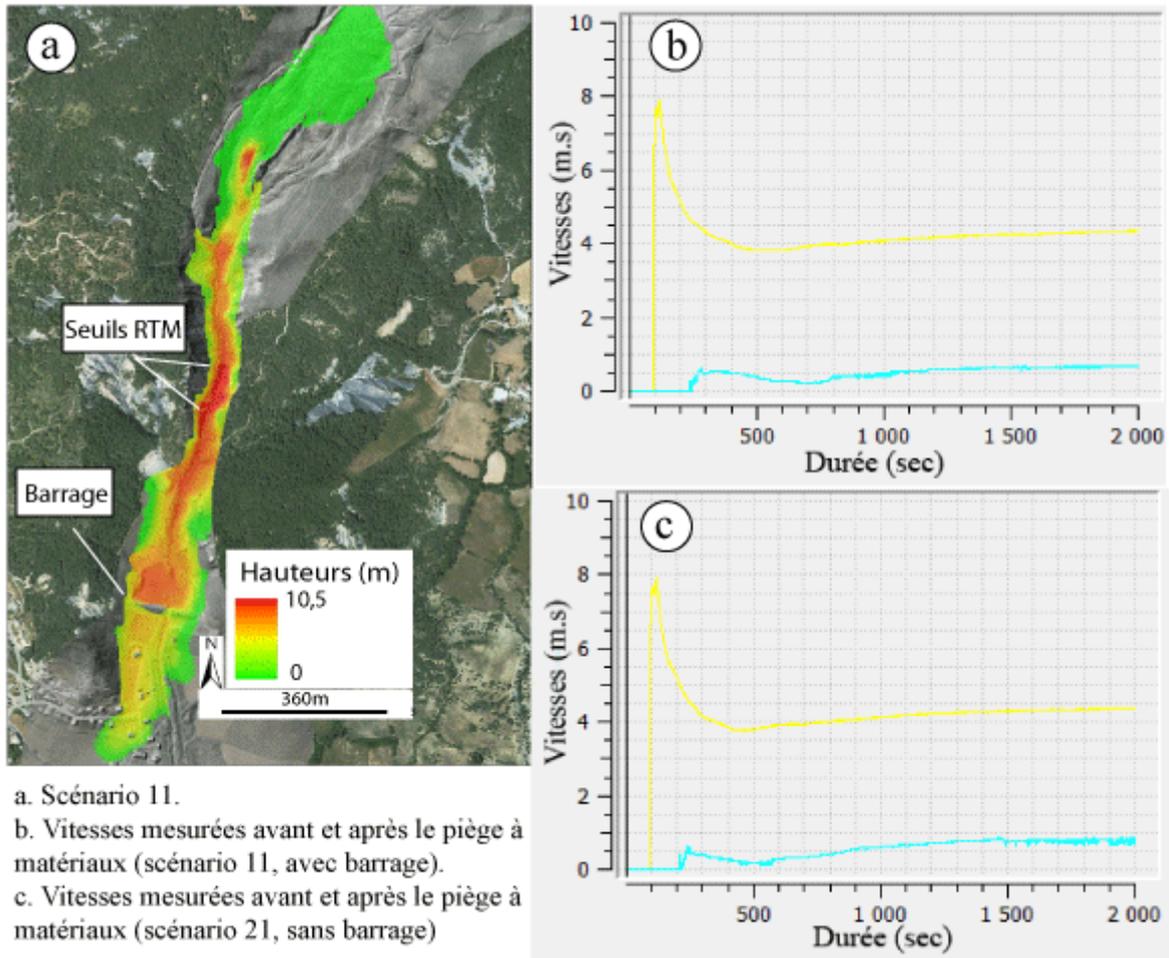


Figure 14. Cartes des hauteurs des dépôts et vitesses de déplacements (scénarios 11 et 21).

Cette figure indique que le piège à matériaux joue bien un rôle sur l'écrêtement de la coulée. Pourtant, même sans le barrage, les vitesses sont diminuées (cf. figure 14b, c). **Cela laisse supposer que c'est plutôt le fossé creusé en amont du barrage qui écrête la coulée en stockant un certain volume** (cf. figure 14a). Pour le scénario 11, le barrage subit une force d'impact de 45000 à 50000 kN et absorbe une partie de l'énergie de la coulée, les premiers bâtiments touchés en aval subissant une force d'impact, moins conséquente, de 10000 à 20000 kN. Le piège a mis 1 minute pour se remplir déborder.

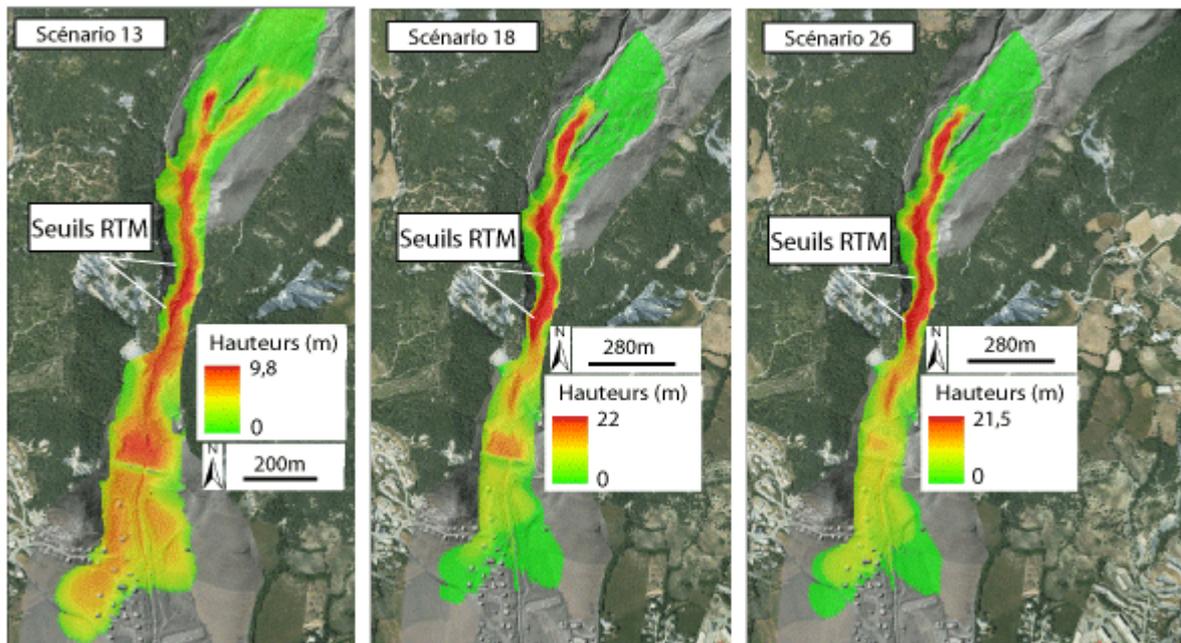
Le scénario 13 (rupture constante) mobilise la quantité maximale de matériaux disponibles dans la partie aval du glissement (880000m<sup>3</sup>). L'extension de la coulée, les vitesses de déplacement et la hauteur des dépôts sont presque identiques pour un mode de rupture par vagues (scénario 14). Une coulée de boue de ce volume s'étend beaucoup plus loin sur le cône, submergeant la route principale qui traverse le lotissement (cf. figure 15). Pour ce scénario, le barrage se remplit et déborde en 30 secondes seulement et subit une force d'impact de 55000 kN. Les premiers bâtiments à l'aval subissent une force d'environ 35000 kN, cette valeur tombe à 25000 kN pour les bâtiments situés plus loin sur le cône alluvial. Le rôle tampon du piège à matériaux est ici presque inexistant et le scénario identique mais sans le barrage (scénario 23) donne des résultats très similaires.

Le scénario 13 a été simulé avec la rhéologie 'fluide' (scénario 18). Comme observé précédemment, **l'extension est moindre et des volumes importants de matériaux sont stockés en amont**, au niveau de l'éperon stable, comme l'indique

les valeurs indiquées en légende. Le barrage subit une force d'impact de 70000 kN, qui chute entre 15000 et 30000 kN pour les bâtiments en aval. Les vitesses sont aussi écrêtées de 12 m.s à 4 m.s. Dans ce cas aussi, la rhéologie fluide se propage moins en aval que la rhéologie visqueuse (cf. figure 15).

Le scénario 18 a été simulé sur une topographie sans barrage (scenario 26). L'extension et les hauteurs des dépôts sont plus importantes. Le rôle tampon du barrage est visible (cf. figure 15).

Enfin, quelque soit le scénario, avec un volume de 880000m<sup>3</sup> les seuils RTM situés dans le chenal sont peu efficaces (cf. figure 15).

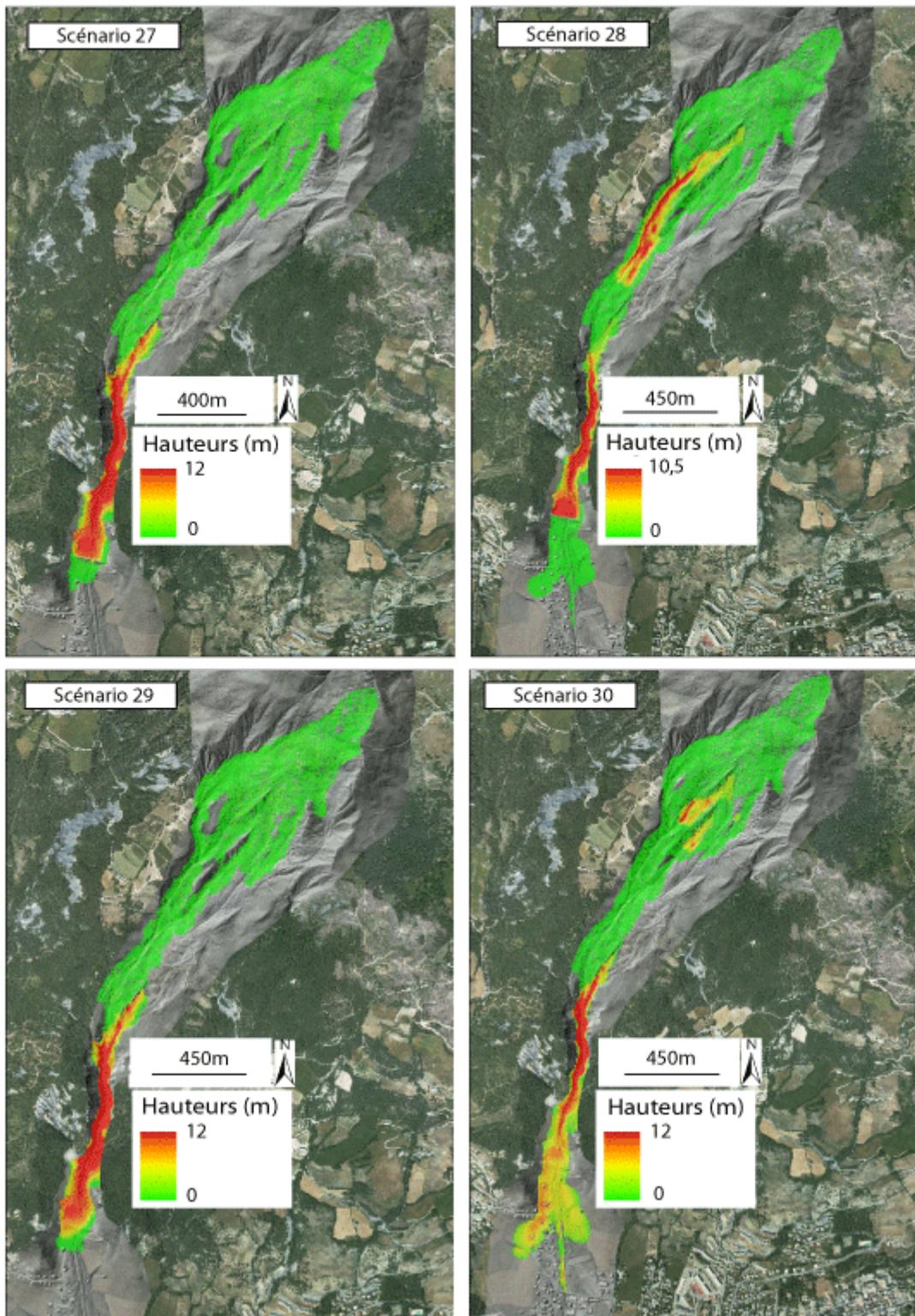


*Figure 15. Cartes des hauteurs de dépôts (scénarios 13, 18, 26).*

Les scénarios secondaires, situés dans la partie amont du glissement, mobilisent un volume de 445000m<sup>3</sup> environ. La rhéologie de type 'coulée' et la rhéologie plus fluide ont été simulées (scénarios 27 et 28). **Un résultat inattendu a été la submersion du barrage dans les deux cas.** Contrairement aux observations précédentes, ici la rhéologie fluide se propage plus loin que la rhéologie visqueuse (cf. figure 16).

La force d'impact exercée contre le barrage est de 40000 kN dans le cas d'une coulée de boue contre 65000 kN pour la rhéologie plus fluide. L'impact sur les bâtiments en aval n'a pas été calculé car, pensant que ce volume n'atteindrait pas le piège à matériaux, aucun point de mesure n'a été placé sur le cône alluvial. La différence de force d'impact est due à la vitesse des matériaux, plus rapides dans le cas de la rhéologie plus fluide.

Les mêmes scénarios ont été simulés sans le barrage (scénarios 29 et 30). **Dans le cas d'un évènement de type 'coulée de boue', la suppression du barrage ne change presque rien à l'extension des dépôts.** Avec la rhéologie plus fluide cependant, il est possible d'observer un transfert vers l'aval des matériaux déposés : il n'en reste que très peu dans la partie amont, alors que sur le cône leur hauteur a nettement augmenté (cf. figure 16). **Le barrage semble donc plus efficace dans le cas d'un évènement plus fluide.**



*Figure 16. Cartes des hauteurs de dépôts (scénarios 27, 28, 29, 30).*

**Les différents scénarios simulés sur La Valette ont permis de faire les observations suivantes :**

- (i).** Toute coulée dont le volume est inférieur à 25000m<sup>3</sup> ne représente pas de risque pour la commune située en aval ;
- (ii).** Il faut un volume minimum d'environ 230000m<sup>3</sup> pour atteindre le barrage, mais il n'est pas rempli entièrement. Il serait intéressant d'estimer exactement le volume que le barrage peut retenir à plein sans pour autant déborder ;
- (iii).** Les seuils RTM disposés dans le chenal sont efficaces dans presque tous les scénarios. Il serait intéressant d'effectuer d'autres simulations en supprimant ces seuils de la topographie, comme cela a été fait avec le barrage dans cette étude, afin de mesurer quantitativement leur rôle dans la propagation d'une coulée de boue. Proposer des simulations avec des seuils en plus serait aussi intéressant ;
- (iv).** Le chenal étroit du torrent de La Valette augmente les vitesses ;
- (v).** La rhéologie fluide engendre logiquement des vitesses plus élevées, de 15 m.s en au minimum (54km/h). La rhéologie visqueuse engendre des vitesses de 5 à 10 m.s (18 à 36 km/h) ;
- (vi).** L'extension des dépôts est moins grande pour la rhéologie visqueuse, peut-être car plus de matériaux sont stockés dans le chenal en amont. Ce résultat n'a pas pu être expliqué entièrement et la cause qui en est à l'origine reste à déterminer ;
- (vii).** Le mode de rupture a un effet sur l'extension des dépôts. Avec une rupture par vagues, une coulée de boue se propage moins loin. Cela peut s'expliquer par le fait que la première vague modifie la topographie sur laquelle va s'écouler la vague suivante. Mais cela n'explique pas pourquoi l'extension est moindre dans tous les scénarios observés.
- (viii).** Dans le cas d'un mode de rupture par vagues, les vitesses de déplacement de la seconde vague sont supérieures aux vitesses de la première. Cela peut s'expliquer par le fait que les dépôts d'une vague comblent les discontinuités topographiques. La vague suivante bénéficie d'une topographie plus 'lisse' favorable à des vitesses de déplacement élevées ;
- (ix).** Le piège à matériaux semble s'organiser en deux sous-systèmes. Le fossé à lui seul est assez efficace pour stopper une coulée visqueuse, dont les matériaux vont se déposer à l'intérieur. Le barrage semble plus efficace pour la rhéologie fluide pour laquelle les matériaux avec des vitesses plus élevées ne sont pas totalement stoppés par un simple fossé : il est alors nécessaire d'avoir un obstacle qui joue le rôle de butée ;
- (x).** Le barrage dans son ensemble permet d'écrêter les vitesses et donc la force d'impact qui en découle. Les données observées sur la force d'impact ont besoin d'être comparées avec des données sur les capacités de résistance des bâtiments et du barrage afin d'estimer les dommages potentiels qu'ils peuvent subir.

## CONCLUSION.

---

En raison des difficultés rencontrées sur le terrain pour obtenir des données sur les coulées de boue au moment où celles-ci se produisent, **les simulations numériques s'imposent donc comme une alternative intéressante dans toute recherche sur la quantification de cet aléa.** Comme le démontre les données obtenues sur la coulée de 1988 à La Valette, les informations, basées sur des observations post-événement, sont surtout qualitatives. Or, dans un contexte d'une gestion du risque, il s'avère nécessaire d'évaluer quantitativement l'aléa (extension de la coulée, vitesses de déplacement, épaisseur des dépôts, etc.). C'est dans ce contexte, et pour répondre à ces attentes, que s'est mise en place cette étude.

Les résultats obtenus ont notamment permis d'estimer le temps nécessaire à une coulée pour atteindre les contacteurs et déclencher le système d'alarme, ainsi que le temps nécessaire pour remplir le piège à matériaux avant de le submerger, offrant ainsi un intervalle supplémentaire pour évacuer les populations. Les résultats ont montré que pour un volume conséquent de 230000m<sup>3</sup>, le piège n'était que partiellement rempli, ce qui offre une marge de sécurité importante car de tels volumes n'ont jamais été observés à La Valette. Toutefois, pour un volume de 530000m<sup>3</sup>, le barrage est submergé en une minute, ce qui laisse peu de temps pour évacuer les populations. Il est alors possible d'en conclure que le piège à matériaux peut stocker un volume intermédiaire sans être submergé : ce volume reste à déterminer. Les simulations 'sans le barrage' semblent démontrer que dans le cas d'une coulée visqueuse, le fossé aménagé en amont du barrage suffit à ralentir et à stocker les sédiments. Alors que pour la rhéologie 'fluide', le fossé à lui seul ne suffit pas à stopper les matériaux qui se déplacent plus vite et qui nécessitent une butée pour être ralentis ou stoppés : le barrage joue ce rôle. Les simulations ont également permis de quantifier le comportement de l'aléa lui-même (vitesses de déplacement, épaisseur des dépôts, extension du phénomène, force d'impact sur le bâti).

L'étude de terrain, quant à elle, a permis d'estimer le volume mobilisé par les zones de contribution (instabilités de versants) à environ **9000m<sup>3</sup>**. Cette quantité est sans commune mesure avec les volumes potentiellement mobilisables par une coulée dans la partie aval du glissement, **et ne constitue pas un risque supplémentaire.**

Les simulations proposées dans cette étude ont permis d'obtenir des premiers résultats intéressants sur le comportement des coulées de boue à La Valette, et mêmes utiles pour la gestion de crise ou la réduction de la vulnérabilité.

Les résultats doivent cependant être interprétés avec un certain recul vis-à-vis des volumes utilisés pour les scénarios principaux. Contrairement au volume amont, **les volumes aval ont été déterminés de façon empirique.** Dans la réalité, il est peu probable que la totalité des matériaux stockés autour de l'éperon stable (880000m<sup>3</sup>) soient mis en mouvement au cours d'un seul événement. De plus, compte tenu des drainages existants, **il est difficile de déterminer dans quelles conditions exactement une coulée pourrait se déclencher**, et quel volume serait mobilisé. Ce qui est sûr, c'est qu'une coulée apparaît dans des conditions très humides (saturation). Or, les travaux RTM effectués sur le glissement ont nettement modifié l'hydrologie du site.

Une recherche sur les conditions nécessaires au déclenchement d'une coulée à La Valette serait intéressante et pourrait compléter cette étude qui s'est concentrée sur les phases de propagation et de dépôts du phénomène.

## **LISTE DES ABBREVIATIONS**

---

**2D** : deux dimensions ou bidimensionnel.

**3D** : trois dimensions ou tridimensionnel.

**CODIS** : Centre Opérationnel Départemental Incendies et Secours.

**IGN** : Institut Géographique National.

**LiDAR** : Airborne Light Detection and Ranging.

**MNS** : Modèle Numérique de Surface.

**MNT** : Modèle Numérique de Terrain.

**ORSEC** : Organisation de la Réponse de SEcurité Civile.

**PSS** : Plan de Secours Spécialisé.

**PVC** : PolyVinyl Chloride (en français : polychlorure de vinyle).

**RTM** : Restauration des Terrains de Montagne (service spécialisé de l'Office National des Forêts).

**SIG** : Système d'Information Géographique.

Unités des paramètres rhéologiques :

**m.s** : mètres par secondes

**Pa** : Pascal

**Pa.s** : Pascal par seconde

**kN** : kilo-Newton

## LISTE DES FIGURES

---

Figure 1. Position des ‘coulées de boue’ dans les mouvements de versants (Malet, 2003)..	- 9 -
Figure 2. Présentation et évolution du glissement-coulée de La Valette. ....	- 12 -
Figure 3. Commande PCRaster utilisée pour lancer MassMov. ....	- 16 -
Figure 4. Principe de fonctionnement de la légende morphodynamique (Thiery, 2007)....	- 17 -
Figure 5. Relation entre le taux de fluidification et la carte ‘distances’ de PCRaster.....	- 19 -
Figure 6. Diachronie 1988/2007 du glissement-coulée de La Valette. ....	- 21 -
Figure 7. Estimation de la profondeur su substrat autour de l’éperon stable. ....	- 21 -
Figure 8. Résultat de l’étape de calage et de validation de MassMov sur La Valette.....	- 22 -
Figure 9. Localisation des volumes initiaux utilisés dans les scénarios de simulation. ....	- 24 -
Figure 10. Comparaison de la topographie avec et sans barrage. ....	- 25 -
Figure 11. Cartes des hauteurs de dépôts (scénarios 3, 4, 15).....	- 27 -
Figure 12. Cartes des hauteurs de dépôts et vitesses de déplacement (scénarios 7, 8, 16). -	- 28 -
Figure 13. Cartes des hauteurs de dépôts (scénarios 9 et 10).....	- 29 -
Figure 14. Cartes des hauteurs des dépôts et vitesses de déplacements (scénarios 11 et 21).-	- 30 -
-	
Figure 15. Cartes des hauteurs de dépôts (scénarios 13, 18, 26).....	- 31 -
Figure 16. Cartes des hauteurs de dépôts (scénarios 27, 28, 29, 30).....	- 32 -

## LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 1. Terminologie des glissements de type écoulement (D’après Le Mignon, 2004). -	- 7 -
Tableau 2. Synthèse des données utilisées pendant l’étude. ....	- 13 -

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- Begueria, S., van Asch, Th.W.J., Malet, J.P. & Gröndahl, S. (2009). A GIS-based numerical model for simulating the kinematics of mud and debris flow over complex terrain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **9**, 1897-1909.
- Blijenberg, H.M. (2007). Application of physical modelling of debris flow triggering to field conditions : limitations posed by boundary conditions. *Engineering Geology*, **91**, 25-33.
- Colas, G. & Locat, J. (1993). Glissement et coulée de La Valette dans les Alpes de Haute-Provence : présentation générale et modélisation de la coulée. *Bulletin de Liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées*, **187**, 19-28.
- 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.
- Coussot, P. & Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Review*, **40**, 209-227.
- Evin, M. (1990). Le glissement de la valette (Barcelonnette). *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, **2**, 149-158.
- Geertsema, M., Clague, J., Schwab, W., Evans, S. (2006). An overview of recent large catastrophic landslides in northern British Columbia, Canada. *Engineering Geology*, **83**, 120-143.
- Gröndahl, S. (2008). Analysis of debris flow characteristics with numerical modelling - application to two alpine torrents and to the Semeru volcano. *Mémoire de stage, Master 2 'Géosciences, Environnement, Risques', Université Louis Pasteur, Strasbourg*, 38 p.
- Le Mignon, G. (2004). Analyse de scénarios de mouvements de versants de type glissements-coulées. Application à la région de Barcelonnette. *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). *Proceedings of the 1<sup>st</sup> European Conference on Landslides, Swets & Zeitlinger, Lisse*, 239-245.
- Mahaut, A. (1996). Etude du fonctionnement du glissement de terrain de La Valette. *Mémoire de Maîtrise Génie des Transformations de la Matière et Environnement, Faculté des Sciences, Université de Marseille*, 24 p.
- Malet, J.P. (2003). Les glissements de type écoulement dans les marnes noires des Alpes du Sud. Morphologie, fonctionnement et modélisation hydro-mécanique. *Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg*, 364 p.
- Malet, J.P., Laigle, D., Remaître, A. & Maquaire, O. (2005). Triggering conditions and mobility of debris flows associated to complex earthflows. *Geomorphology*, **66 (1-4)**, 215-235.

Malet, J.P., Locat, J., Remaître, A. & Maquaire, O. (2003). Dynamics of distal debris-flows induced in clayey earthflows. Implications for hazard assessment. *Proceedings of the International Conference on Fast Slope Movements : Prediction and Prevention for Risk Mitigation. Napoli, Italy, Patrone Editore, Bologna*, 341-348.

Malet, J.P., Maquaire, O., Locat, J. & Remaître, A. (2004). Assessing debris flow hazard associated with slow moving landslides : methodology and numerical analyses. *Landslides, Journal of the International Consortium on Landslides*, **2004-1**, 83-90.

Malet, J.P., Remaître, A., Ancey, C., Locat, J., Meunier, M. & Maquaire, O. (2002). Caractérisation rhéologique des coulées de débris et des laves torrentielles du bassin marneux de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France). Premiers résultats. *Rhéologie*, **1**, 17-25.

Mathieu, A. (2009). Cartographie d'inventaire et morphodynamique des mouvements de versant dans le bassin du Riou-Bourdoux (Alpes-de-Haute-Provence, France). Approche qualitative au 1/10.000è. *Mémoire de stage, Master 1 'Géosciences, Environnement, Risques', Université de Strasbourg*, 40 p.

Meunier, M. (1994). Le point sur les méthodes d'étude des laves torrentielles. *Congrès FAO de juillet 1994*.

Meunier, M (1991). Éléments d'Hydraulique Torrentielle. *Études Montagne*, N°1. **278**, Éditions Cemagref, Grenoble.

Remaître, A. (2006). Morphologie et dynamique des laves torrentielles : application aux torrents des Terres Noires du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud). *Thèse de Doctorat, Université de Caen-Basse-Normandie, Caen*, 487 p.

Remaître, A., Malet, J.P., Maquaire, O. & Ancey, C. (2003). Study of a debris-flow event by coupling a geomorphological and a rheological investigation, example of the Faucon stream (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Proceedings of the Third International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation : Mechanics, Prediction and Assessment, Davos, Switzerland, Millpress, Rotterdam*, 375-385.

Remaître, A., Malet, J.P., Maquaire, O., Ancey C. & Locat, J. (2005). Mobility of debris-flows in clays-shale basins. Part II : Flow behaviour, runout modelling and torrential hazard assessment. *Earth Surface Processes and Landforms*, **30(4)**, 479-488.

Thiery, Y. (2007). Susceptibilité du Bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud, France) aux 'mouvements de versant' : cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste. *Thèse de Doctorat, Université de Caen-Basse-Normandie, Caen*, 445 p.

Travelletti, J., Malet, J.P., Hibert, C. & Grandjean, G. (2009). Integration of geomorphological, geophysical and geotechnical data to define the 3D morpho-structure of the La Valette mudslide (Ubaye Valley, French Alps). *Proceedings of the International Conference on Landslide Processes: from geomorphologic mapping to dynamic modelling, Strasbourg, CERG Editions*, 203-208.

Travelletti, J., Samyn, K., Malet, J.-P., Grandjean G & Jaboyedoff M. (2010). A multidisciplinary approach to landslide structure characterization : integration of

seismic tomography survey and high resolution LiDar data with the Sloping Local Base Level method. [Poster]. *European Geosciences Union (EGU), General Assembly, 2-7 May 2010, Vienna, Austria.*

Squarzoni, C., Delacourt, C. & Allemand, P. (2003). Nine years of spatial and temporal evolution of the La Valette landslide observed by SAR interferometry. *Engineering Geology*, **68(1-2)**, 53-66.

van Asch, T.W.J. (2005). Modelling the hysteresis in the velocity pattern of slow-moving earth flows: the role of excess pore pressure. *Earth Surface Processes and Landforms*, **30**, 403-411.

van Asch, Th.W.J. & Nieuwenhuis, J.D. (1994). Results of landslide mobility investigations on the recent time scale. In: Casale, R., Fantechi, R., Flageollet, J.C. *Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community, Final report, Volume II, Contract EPOCH, European Commission*, 565-573.

van Asch, Th.W.J., van Beek, L.P.H. & Bogaard, T.A. (2007). Problems in predicting the mobility of slow-moving landslides. *Engineering Geology*, **91(1)**, 46-55.

van Beek, L.P.H. (1996). Evaluation of the dynamical modelling of the Valette landslide. *Workshop: 'Landslides-Flash floods' Barcelonnette-Vaison la Romaine, CERG, Council of Europe, Major Hazards Agreement, Strasbourg*, 9-16.

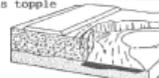
<http://pcraster.geo.uu.nl/>, PCRaster website [mai 2010] : site de la Faculté de Géosciences (Université d'Utrecht, Pays-Bas) dédié à la présentation du logiciel de modélisation PCRaster, développé par les équipes du département de géographie de la Faculté. Principales rubriques : téléchargement, documentation, exemples, support.

## ANNEXES

### Annexe 1 : Présentation des principales tentatives de classification des ‘mouvements de versants’.

Les ‘mouvements de versants’ sont des phénomènes complexes et variés : leur très grand nombre nécessite de pouvoir les classer afin de simplifier la réalité et permettre de les distinguer et de les étudier. Le terme de ‘tentative’ est utilisé ici pour mettre en évidence le fait que les différentes classifications proposées dans la littérature ne peuvent rendre compte, sans faire d’approximations, de ce qui se passe dans la réalité. Ainsi, malgré une volonté de simplification, les typologies proposées amènent souvent à une confusion générale. Cela s’explique par :

- (i). L’abondance de dénominations et de sous-catégories qui sont proposées (Le Mignon, 2004) ;
- (ii). Des critères de classifications qui varient d’un auteur à l’autre (Le Mignon, 2004 ; Thiery, 2007) ;
- (iii). Un manque de consensus dans les terminologies usitées, pour un même phénomène, d’un langage à un autre (par exemple entre le français et l’anglais).

TYPE OF MOVEMENT	TYPE OF MATERIAL		
	BED ROCK	ENGINEERING SOIL	
		DEBRIS	EARTH
I. FALLS	Rock fall 	Debris fall	Earth fall
II. TOPPLES	Rock topple 	Debris topple 	Earth topple
III. SLIDES	Rock slump 	Debris slump	Earth slump 
	A. ROTATIONAL  B. TRANSLATIONAL  	Debris slide 	Earth block slide  Earth slide 
IV. LATERAL SPREADS	Rock lateral spread 		Earth lateral spread 
V. FLOWS	Gravitational sagging  	Debris avalanche  Soil creep 	Rapid earth flow (Quick clay flow)  Earth flow 

Type of movement	Type of material		
	Bedrock	Engineering soils	
		Predominantly coarse	Predominantly fine
Falls	Rock fall	Debris fall	Earth fall
Topples	Rock slope	Debris slope	Earth topple
Slides	Rotational few units	Rock slump	Debris slump
	Translational many units	Rock block slide	Debris block slide
		Rock slide	Debris slide
Lateral spreads	Rock spread	Debris spread	Earth spreads
Flows	Rock flow	Debris flow	Earth flow
	(deep creep)		(soil creep)
Complex	Combination of two or more principal types of movement		

Figure 1.1. Classification de Varnes (D’après Le Mignon, 2004).

La classification de Varnes (1978) est l'une des plus utilisées (Thiery, 2007). Elle se base sur le processus et le mécanisme d'initiation, mais prend en compte également la vitesse de déplacement du phénomène ainsi que sa morphologie (cf. figure 1.1). Les coulées de boue sont classées ici dans les processus de type 'flows'. Le critère 'vitesse' n'est pas illustré ici mais Varnes estime qu'un mouvement lent connaît une progression inférieure à 1,5m par mois et qu'un mouvement rapide progresse au minimum à 1,5m par jour.

A. Rebond isostatique ("Rebound")	B. Fluage ("Creep")	C. Affaissement ("Sagging")	D. Glissements ("Landslides")	E. Mouvements de sols de type écoulement ("Debris movements of flow-like form")	F. Fauchage ("Topples")	G. Chutes ("Falls")	H. Mouvements complexes ("Complex slope movements")
post-excavation	superficiel, essentiellement saisonnier	affaissement simple associé à un glissement	rupture confinée	coulée de boue	selon discontinuités du massif	par détachement de blocs	bombement de vallée
post-érosion	profond et continu	double affaissement associé à deux glissements	rupture rotationnelle	coulée de boue périglaciaire	en traction	par remobilisation de blocs	mouvement en masses
	progressif, avant une rupture	affaissements multiples	rupture composée	glissement-coulée			ancienne falaise argileuse
	post-rupture		rupture translationnelle	lave torrentielle			glissement évoluant en aval en écoulement ou en coulée de boue
				sturzstroms			glissement déclenché par ruissellements et infiltrations
							glissements emboîtés
							glissements multiples

Figure 1.2. Classification de Hutchinson (D'après Le Mignon, 2004).

La classification de Hutchinson (cf. figure 1.2) se base en partie sur le mode de propagation pour classer les phénomènes. Les coulées de boue sont définies ici comme des 'mouvements de type écoulement' au même titre que les laves torrentielles et les glissements-coulées. Cette typologie semble utiliser trop de paramètres et un même processus peut se retrouver dans plusieurs catégories : c'est le cas des glissements-coulées.

En 1991, Meunier propose une approche intéressante de la classification des 'mouvements de versants'. Il se base ici sur la proportion de fraction solide et le type de matériaux mobilisés (Meunier, 1991 ; Coussot & Meunier, 1996). Ceci permet de prendre en compte tous les types de processus existants tout en distinguant la transition entre les domaines de la mécanique des roches, des sols, des fluides et de l'hydraulique torrentielle (Thiery, 2007). Cette approche, illustrée par la figure 1.3, montre bien qu'il n'existe pas de limite nette entre chaque type de phénomène et que les classifications qui utilisent des tableaux (et donc des limites bien définies) sont obligées de faire des approximations. Le schéma de 1991 a été repris, modernisé et complété plusieurs fois : Meunier, 1994 ; Coussot & Meunier, 1996 ; Malet, 2003 ; Le Mignon, 2004 ; Remaître, 2006 ; Thiery, 2007 ; etc.

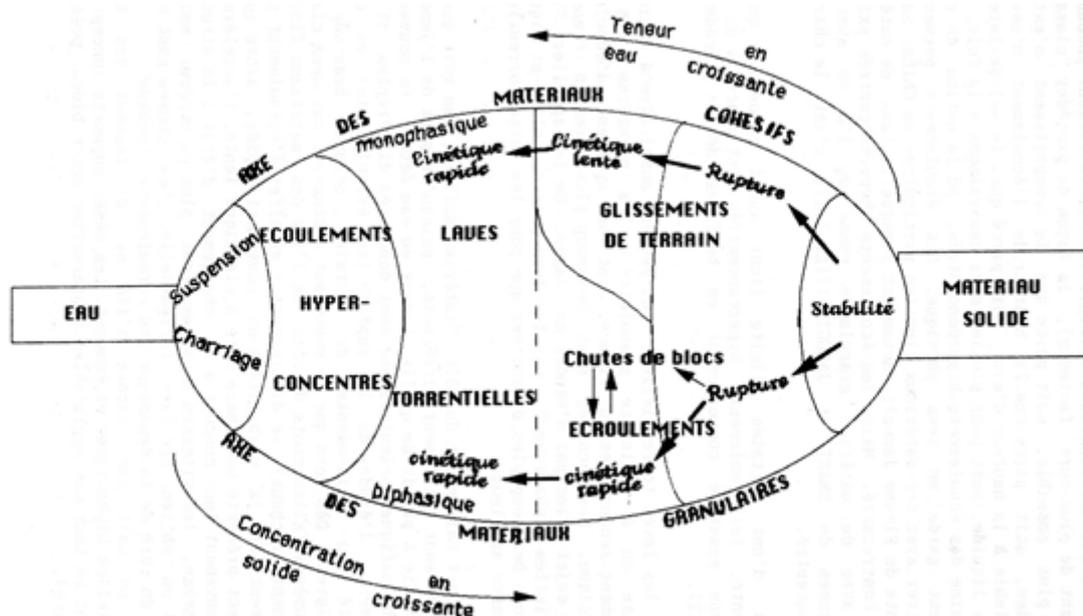


Figure 1.3. Classification de Meunier (D'après Meunier, 1991).

En 2001, Hungr *et al* proposent une classification centrée essentiellement sur les événements à phase d'écoulement (cf. figure 1.4). Le critère déterminant ici est le type de matériaux impliqués, mais des classes de vitesses sont également proposées et diffèrent de celles de Varnes (1978). Ainsi, un processus est considéré comme lent quand sa vitesse de propagation est inférieure à 13m par mois, et rapide quand sa vitesse dépasse 1,8m par heure.

Material	Water content	Special condition	Velocity	Name
Silt, Sand, Gravel, Debris (talus)	dry, moist or saturated	- no excess pore-pressure, - limited volume	various	Non-liquefied sand (silt, gravel, debris) flow
Silt, Sand, Debris, Weak rock	saturated at rupture surface content	- liquefiable material, - constant water	Ex. Rapid	Sand (silt, debris, rock) flow slide
Sensitive clay	at or above liquid limit	- liquefaction in situ, - constant water content	Ex. Rapid	Clay flow slide
Peat	saturated	- excess pore-pressure	Slow to very rapid	Peat flow
Clay or Earth	near plastic limit	- slow movements, - plud flow (sliding)	< Rapid	Earth flow
Debris	saturated	- established channel, - increased water content	Ex. Rapid	Debris flow
Mud	at or above liquid limit	- fine-grained debris flow	> Very rapid	Mud flow
Debris	free water present	- flood	Ex. Rapid	Debris flood
Debris	partly or fully saturated	- no established channel, - relatively shallow, steep source	Ex. Rapid	Debris avalanche
Fragmented Rock	various, mainly dry	- intact rock at source, - large volume (> 10 000 m <sup>3</sup> )	Ex. Rapid	Rock avalanche

Figure 1.4. Classification de Hungr *et al* (D'après Le Mignon, 2004).

Outre l'abondance des catégories et terminologies utilisées dans les classifications, le passage d'une langue à une autre pour définir un phénomène ajoute à la confusion. Aussi, une grille de lecture proposant différentes approches internationales est apparue en 1996 (cf. figure 1.5).

		<i>Anglais</i>	<i>Français</i>	<i>Italien</i>	<i>Espagnol</i>
Slide (rotational)		slump (expression populaire) rotational slip rotational slide	chute de bloc glissement simple (rotationnel)	scivolamento (scorrimento) rotazionale	deslizamiento rotacional simple
Slide (translational)	debris slide	shallow translational slides, sheet slides, soil slips	glissements de débris	scivolamento (scorrimento) di detrito	deslizamiento de derrubios
	mudslide	earthflow (US usage) mudflow (redundant usage, English)	glissement évoluant en coulée boueuse (foirage)	scivolamento (scorrimento) di terra	coladas de barro
		slump-earthflow		scivolamento (scorrimento) rotazionale-colata di terra	rotacion con flujo de tierras
Flow	rock flow (sackung)	sagging, rock creep, deep seated gravitational creep	déformation lente de versant rocheux, fauchage	deformazione profonda da creep in roccia	flujos de rocas
	debris flow	mudflow (old usage), lahar (volcanic mudflow)	coulée de débris <i>laves torrentielles</i>	colata di detrito	corriente de derrubios
	soil flow (mudflow)	mudflow, alpine mudflow, earthflow, sandflow	coulée boueuse coulée de sable	colata di terra	flujos de arena
Complex	flow slide	flow slide	glissement-coulée	scorrimento-colata	flujo deslizante

*Figure 1.5. Classification de Dikau (D'après Le Mignon, 2004).*

De cette synthèse sur la classification des 'mouvements de versants', il en ressort que la plupart des typologies existantes, à l'image de celles présentées ici, reposent sur des données qualitatives issues d'observations post-événement. L'apport de données quantitatives et/ou statistiques sur des phénomènes bien identifiés apporterait plus de pertinence.

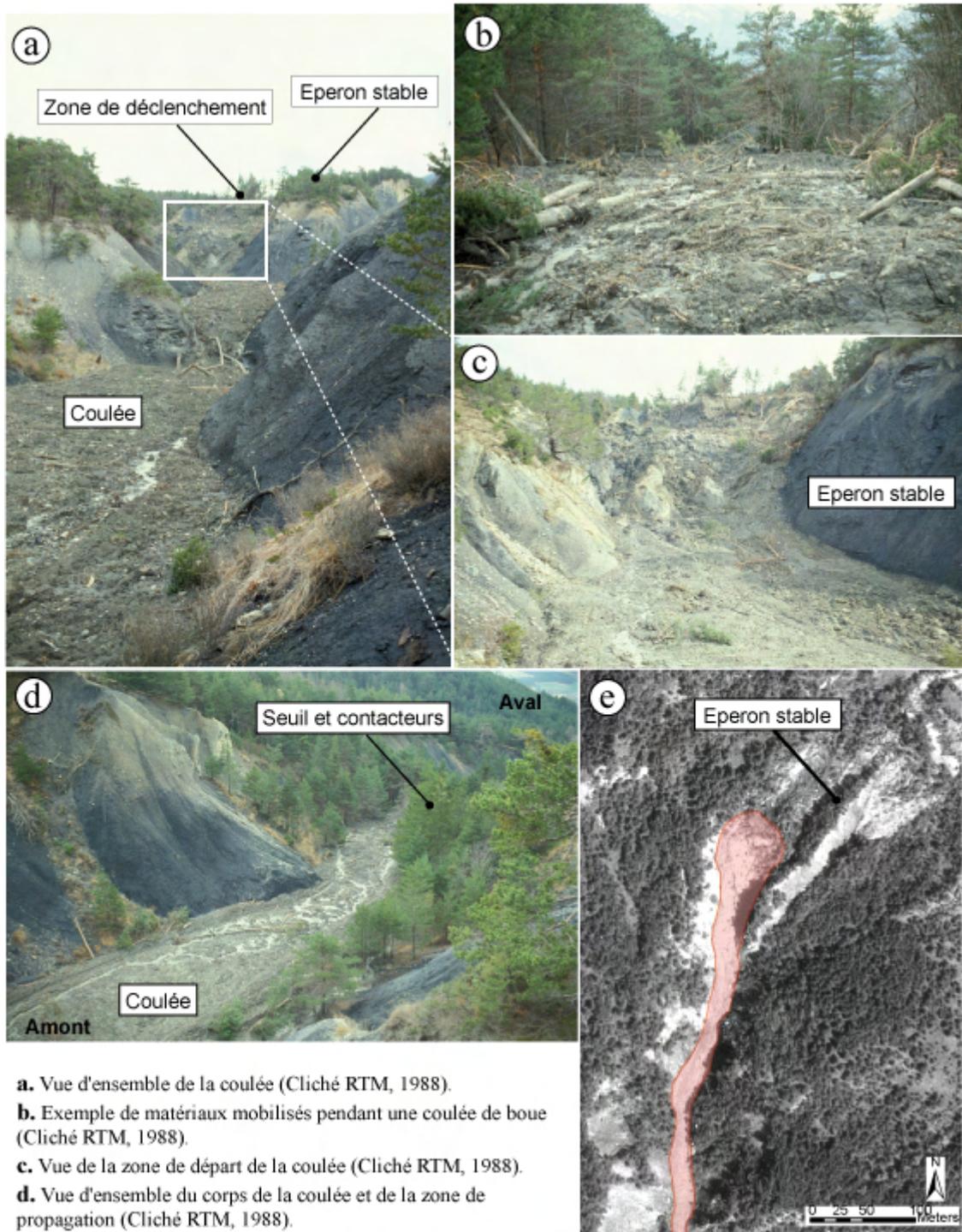
Par ailleurs, dans une finalité de 'gestion du risque' gravitaire, il serait intéressant de proposer comme critère de classification principal la vitesse de déplacement des processus (Remaître, 2006). Cet aspect a des conséquences directes sur la marge de manœuvre des acteurs de la gestion d'une crise et doit donc être pris en compte.

Il est alors possible de proposer la distinction suivante (Remaître, 2006) :

Les mouvements 'lents' dont la déformation est progressive et sans accélération brutale ;

- (i). Les mouvements 'rapides', plus dangereux, qui peuvent subir des accélérations.
- (ii). Les coulées de boues et laves torrentielles sont de ce fait considérées comme des mouvements 'rapides' et potentiellement dommageables.

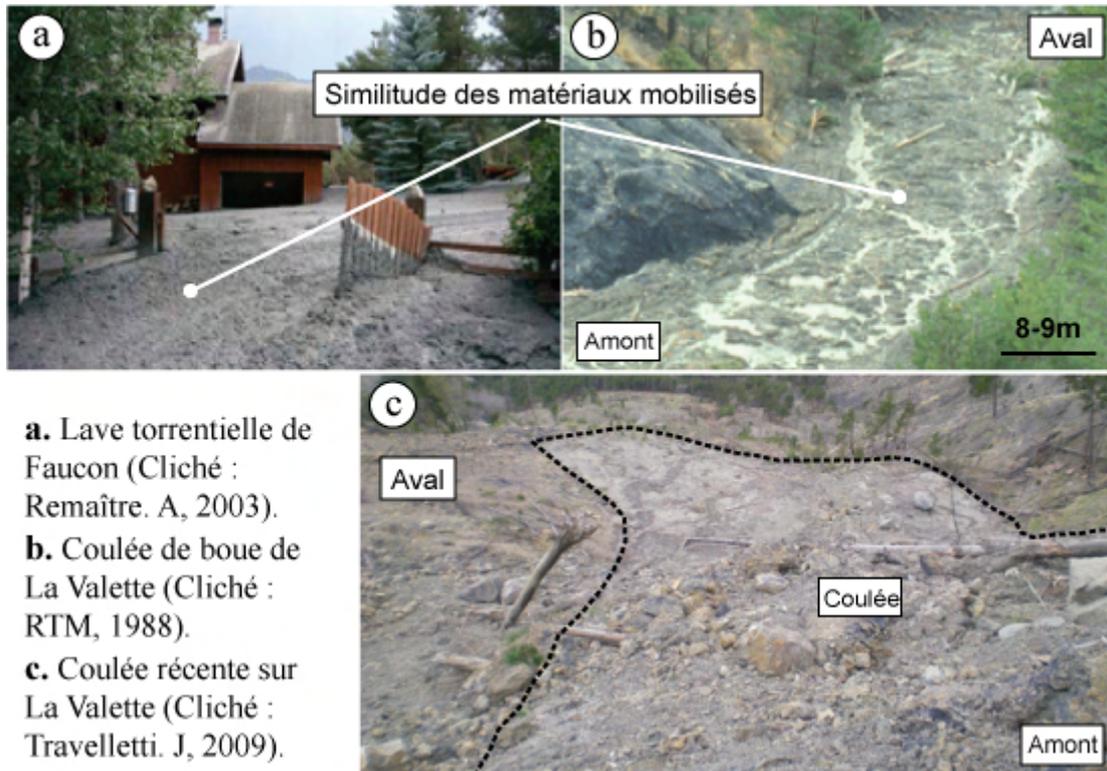
**Annexe 2. Planche d'illustration de la coulée de boue de 1988.**



**a.** Vue d'ensemble de la coulée (Cliché RTM, 1988).  
**b.** Exemple de matériaux mobilisés pendant une coulée de boue (Cliché RTM, 1988).  
**c.** Vue de la zone de départ de la coulée (Cliché RTM, 1988).  
**d.** Vue d'ensemble du corps de la coulée et de la zone de propagation (Cliché RTM, 1988).  
**e.** Orthophoto du secteur (1988) et localisation de la coulée.

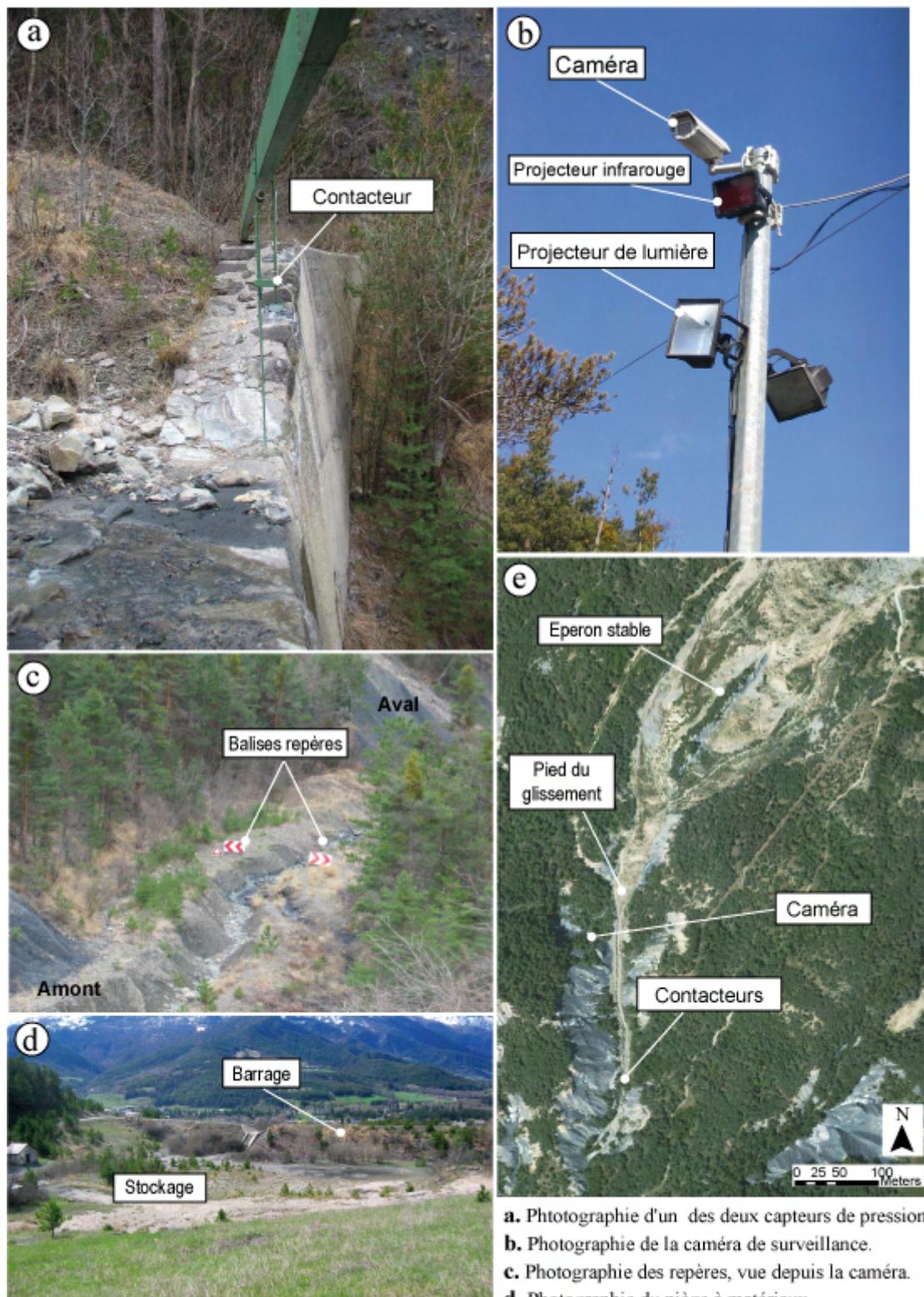
 Coulée boueuse de 1988

**Annexe 3. Illustration de dépôts issus d'une lave torrentielle et d'une coulée de boue.**



**a.** Lave torrentielle de Faucon (Cliché : Remaître. A, 2003).  
**b.** Coulée de boue de La Valette (Cliché : RTM, 1988).  
**c.** Coulée récente sur La Valette (Cliché : Travelletti. J, 2009).

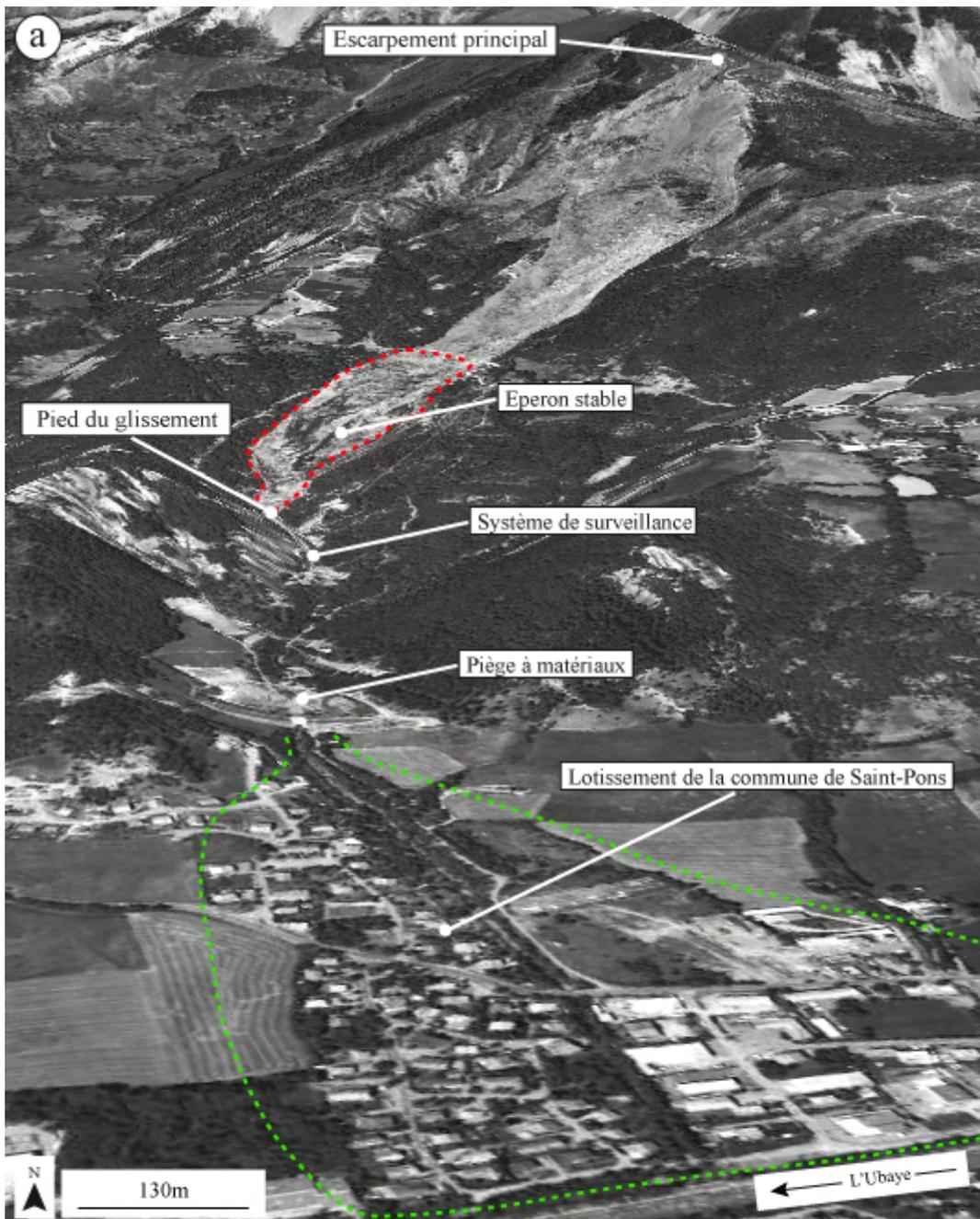
**Annexe 4. Planche d'illustration des mesures de protections passives sur le glissement de La Valette.**



Clichés a, b, c : RTM (2006).  
Cliché d : Mathieu. A (2010).

a. Photographie d'un des deux capteurs de pression.  
b. Photographie de la caméra de surveillance.  
c. Photographie des repères, vue depuis la caméra.  
d. Photographie du piège à matériaux.  
e. Orthophoto du secteur (2004).

**Annexe 5. Illustration du risque 'coulée de boue' sur la commune de Saint-Pons.**



(a) Vue 3D de La Valette (Google Earth)



**Aléa.**

Zone source pour d'éventuelles coulées de boue (885000 m<sup>3</sup>).  
Menace principale du glissement pour la commune en contrebas.



**Vulnérabilité.**

Cône torrentiel urbanisé : surtout des zones résidentielles.  
Environ 170 bâtiments et 700 personnes concernées.



## Annexe 6. Illustration du fonctionnement de MassMov2D.

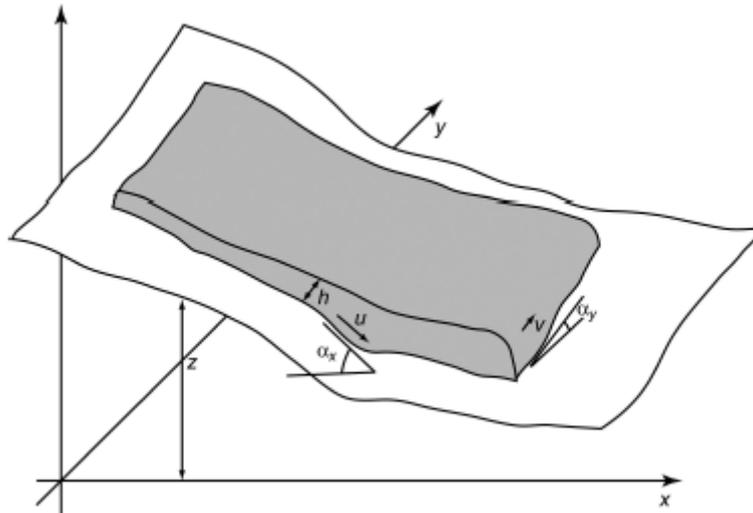


Figure 6.1. Illustration du cadre conceptuel de MassMov (Begueria et al, 2009).

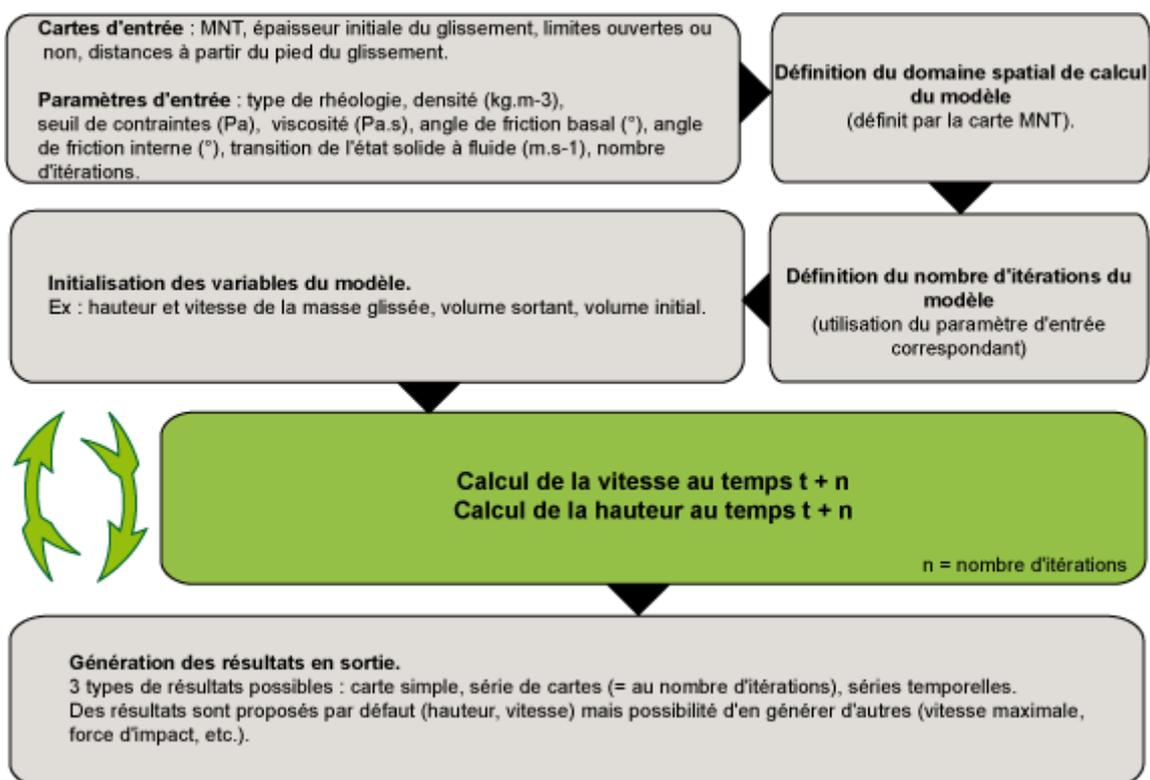
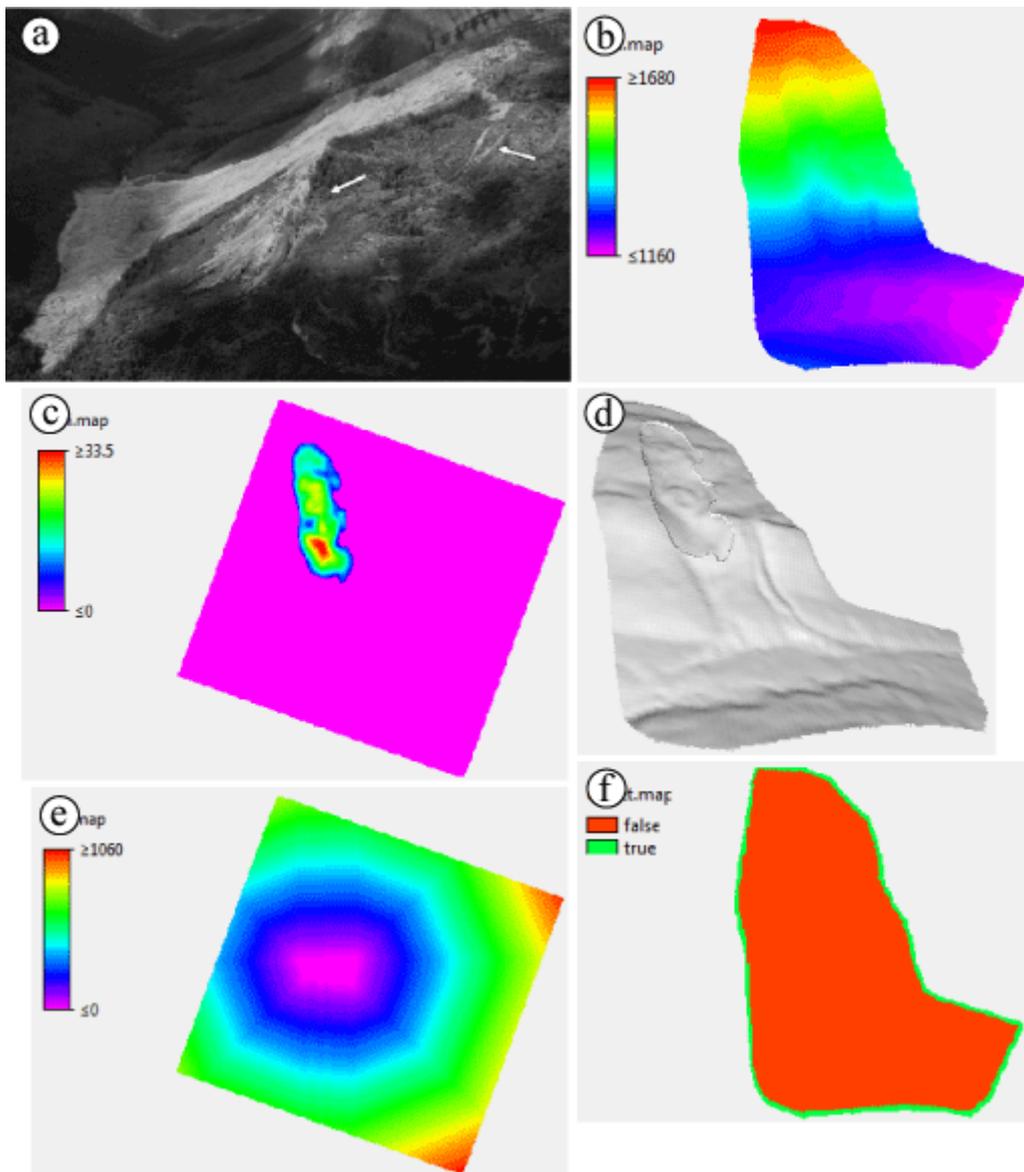


Figure 6.2. Organigramme du fonctionnement d'un modèle dynamique sous PCRaster.

## Annexe 7. Exemple de cartes d'entrée utilisées dans MassMov2D.

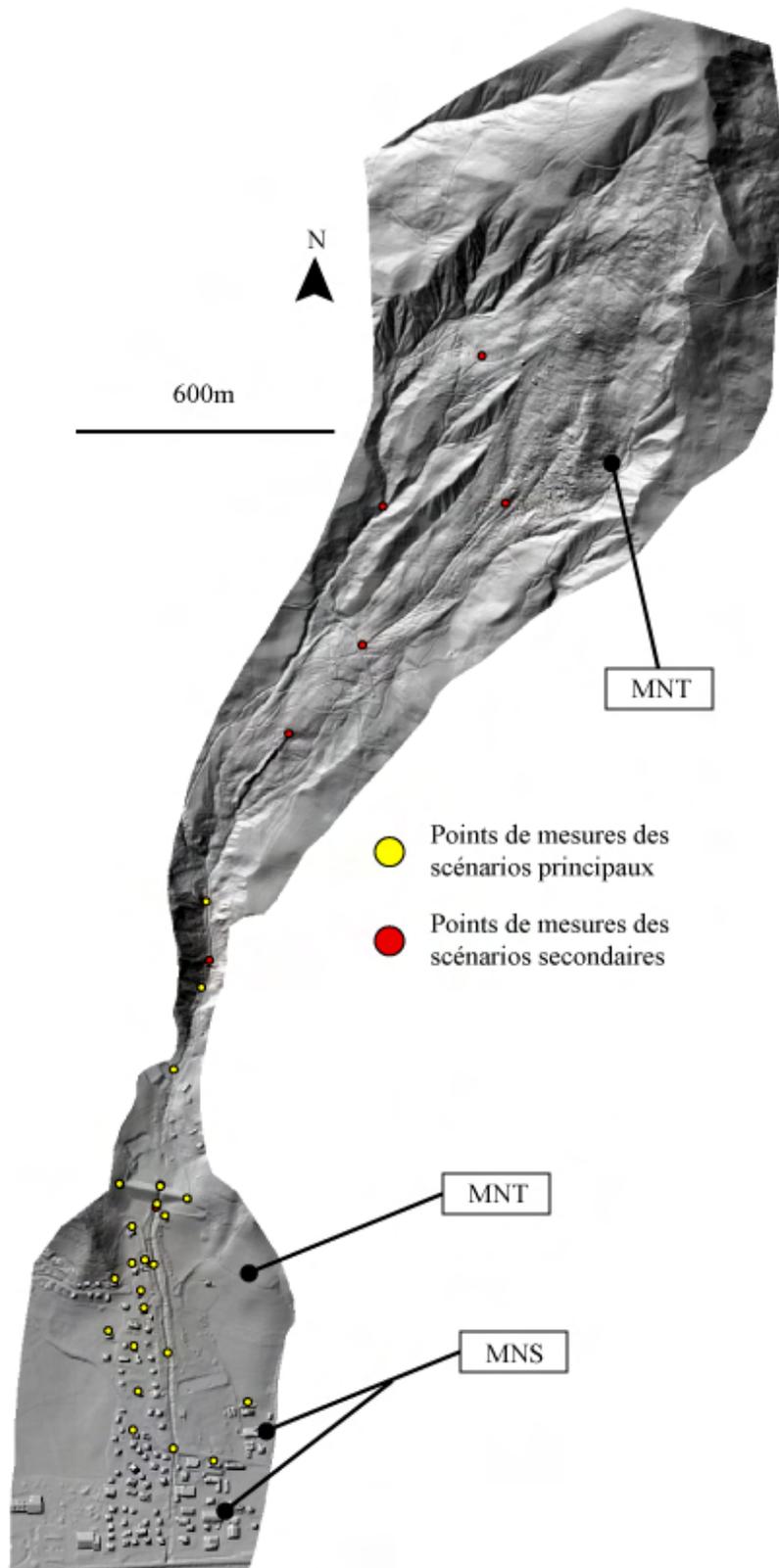
Cette annexe illustre les différentes cartes au format raster qui sont utilisées dans MassMov à travers l'exemple du glissement de Turnoff Creek en Colombie Britannique (Geertsema *et al*, 2006). Ce jeu de carte est proposé par défaut avec le modèle.

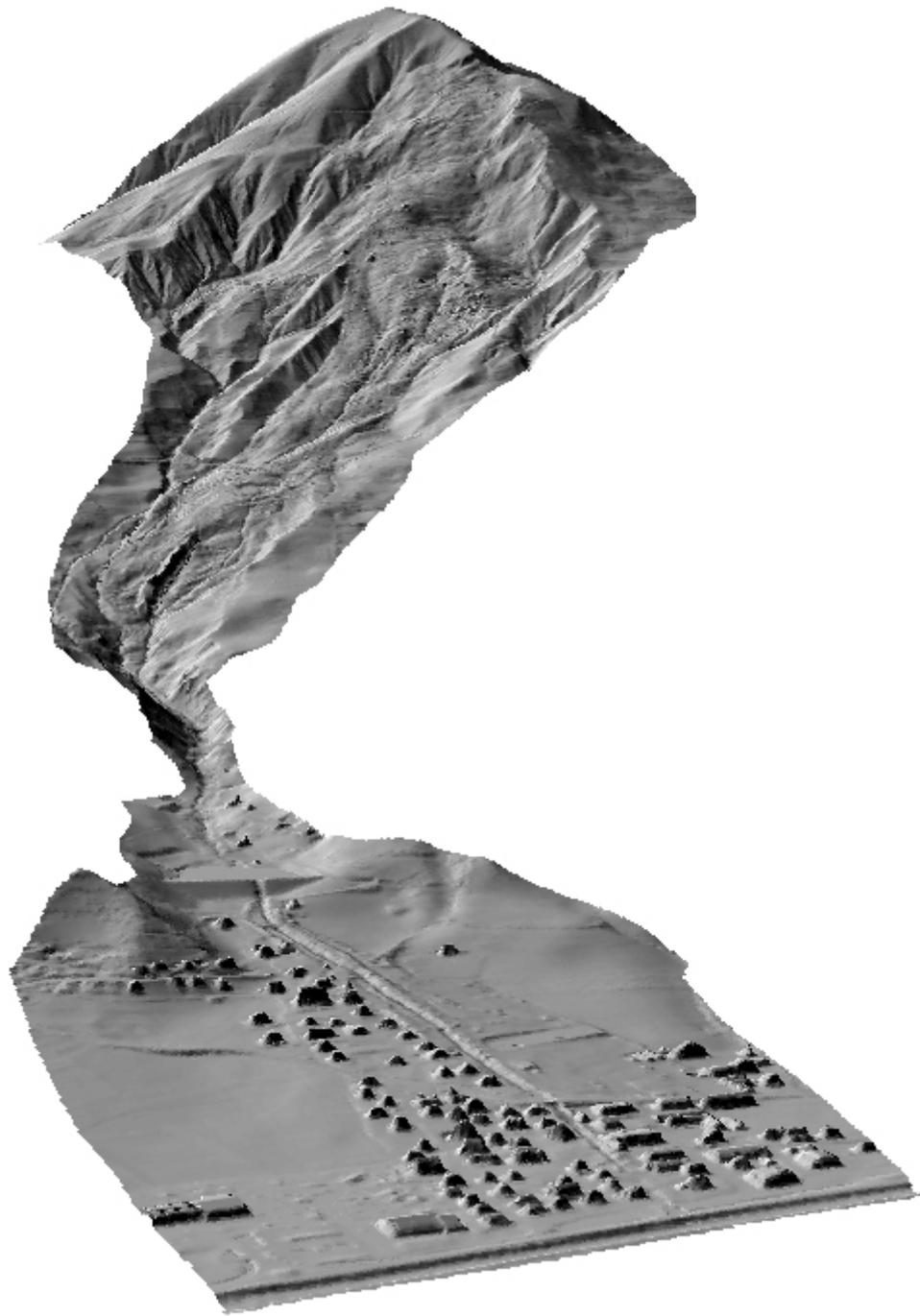
Une photographie de 2002 donne un aperçu du site (a). La carte représentant la topographie est illustrée ici en 2D et 3D (b et d). C'est cette carte qui définit le domaine spatial de simulation, ainsi que la résolution utilisée (par exemple, 1 pixel = 4m<sup>2</sup>). Les autres cartes auront la même résolution. De la topographie, est dérivée la carte booléenne qui définit les frontières de la simulation (f). Si les frontières sont ouvertes (TRUE), alors l'écoulement pourra sortir du domaine de simulation : la frontière peut être représentée par un point, correspondant par exemple à l'exutoire d'un bassin-versant. En (c) est représentée la hauteur initiale de la masse glissée. En (e) sont représentées les distances à partir du pied de la masse glissée. Avec le paramètre 'taux de fluidification' (m.s), cette carte définit le mode de rupture du matériel.



## Annexe 8. Topographie de base utilisée pour les simulations.

Cette annexe présente la surface topographique (en 2D et 3D) de base utilisée dans les simulations. Elle est issue d'un MNT et d'un MNS d'une résolution de 50cm qui ont été assemblés et interpolés à 2m. Des opérations SIG ont été faites dessus pour obtenir les volumes et supprimer le barrage.





## Annexe 9. Synthèse des différents scénarios de simulation effectués.

Cette annexe fait la synthèse des scénarios de simulation selon plusieurs critères. La localisation de la zone source, en amont ou en aval du glissement, définit le type de scénario : principal ou secondaire. Le terme 'lave' est utilisé pour définir une rhéologie plus fluide dont les paramètres sont similaires à ceux utilisés pour simuler des laves torrentielles sur le torrent de Faucon avec MassMov (Gröndahl, 2008). Le terme 'coulée' correspond à la rhéologie définie lors de l'étape de calage du modèle sur la coulée de boue de La Valette.

Scénario	Type	Volume (m3)	Rhéologie	Mode de rupture	Barrage
1	Principal	24716	Coulée	constant	Avec
2	Principal	24716	Coulée	2 vagues	Avec
3	Principal	53053	Coulée	constant	Avec
4	Principal	53053	Coulée	2 vagues	Avec
5	Principal	93408	Coulée	constant	Avec
6	Principal	93408	Coulée	2 vagues	Avec
7	Principal	155857	Coulée	constant	Avec
8	Principal	155857	Coulée	3 vagues	Avec
9	Principal	229924	Coulée	constant	Avec
10	Principal	229924	Coulée	3 vagues	Avec
11	Principal	528956	Coulée	constant	Avec
12	Principal	528956	Coulée	4 vagues	Avec
13	Principal	880354	Coulée	constant	Avec
14	Principal	880354	Coulée	4 vagues	Avec
15	Principal	53053	"Lave"	constant	Avec
16	Principal	155857	"Lave"	constant	Avec
17	Principal	229924	"Lave"	constant	Avec
18	Principal	880354	"Lave"	constant	Avec
19	Principal	229924	Coulée	constant	Sans
20	Principal	229924	Coulée	3 vagues	Sans
21	Principal	528956	Coulée	constant	Sans
22	Principal	528956	Coulée	4 vagues	Sans
23	Principal	880354	Coulée	constant	Sans
24	Principal	880354	Coulée	4 vagues	Sans
25	Principal	229924	"Lave"	constant	Sans
26	Principal	880354	"Lave"	constant	Sans
27	Secondaire	446159	Coulée	constant	Avec
28	Secondaire	446159	"Lave"	constant	Avec
29	Secondaire	446159	Coulée	constant	Sans
30	Secondaire	446159	"Lave"	constant	Sans

## **Annexe 10. Estimation des zones de contribution : planche d'illustration et notice.**

### Notice explicative de la carte morphodynamique.

Le secteur couvert par la carte s'étend du pied du glissement-coulée, situé vers 1285m d'altitude, jusqu'au piège à matériaux vers 1190m. Il est traversé par le torrent de La Valette qui s'écoule sur les marnes Callovo-Oxfordiennes autochtones. A certains endroits, ces marnes noires sont surmontées par une couverture morainique.

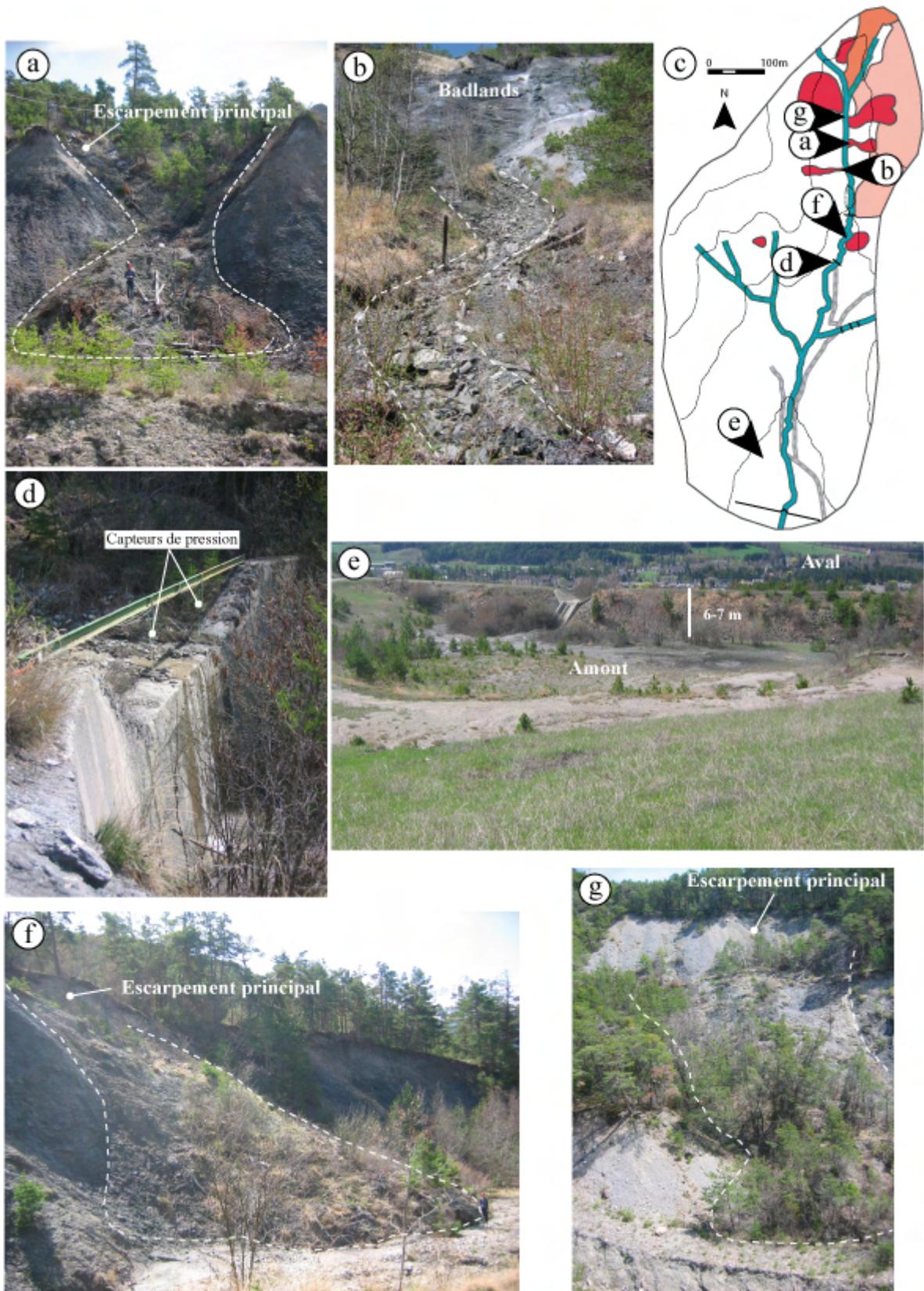
Sur l'adroit du torrent se développe un ravinement intense incisant la roche nue. Ce processus est à l'origine du paysage de badlands, caractéristique de la vallée de l'Ubaye. Le versant opposé est en partie affecté par une instabilité généralisée : un bossellement plus ou moins marqué et une végétation 'bousculée' (arbres penchés et/ou déracinés) témoignent de la situation. A proximité du chenal torrentiel, plusieurs 'mouvements de versants' s'individualisent. Ils sont principalement de type translationnel et rotationnel, comme sur l'ensemble du bassin de Barceonnette (Thiery, 2007; Mathieu, 2009). Mais dans les badlands se développent des événements de type 'coulée de débris'. Les volumes mobilisés peuvent entraver le cours du torrent ou bien être repris par celui-ci en cas d'activité torrentielle intense : cela ajoute un risque supplémentaire dans un secteur déjà menacé par d'éventuelles coulées de boues sur le glissement de La Valette. **Les quatre principaux mouvements observés mobilisent un volume moyen estimé à 9000m<sup>3</sup>.**

Ci-après, une planche d'illustrations du secteur cartographié :

- a. Photographie d'un glissement translationnel et de sa zone d'accumulation (Cliché : Mathieu. A, 2010).
- b. Photographie d'un coulée de débris dans les badlands (Cliché : Mathieu. A, 2010).
- c. Carte morphodynamique simplifiée du secteur. En couleur son indiquées les zones instables et leur degrés d'activité selon la légende utilisée (cf. partie II.3.1).
- d. Photographie du dispositif de surveillance (Cliché : Mathieu. A, 2010).
- e. Photographie du piège à matériaux (Cliché : Mathieu. A, 2010).
- f. Photographie d'un glissement translationnel et de sa zone d'accumulation (Cliché : Mathieu. A, 2010).
- g. Photographie d'un glissement rotationnel et de sa zone d'accumulation (Cliché : Mathieu. A, 2010).

### **Informations.**

La carte morphodynamique n'est pas présentée ici en raison de ses dimensions car les informations sont illisibles au format A4. La carte est disponible sur une planche à part au format A2.



**Annexe 11. Carte des hauteurs des dépôts pour le scénario 5.**

