

*Mémoire de stage Master 1
Mention « Géosciences, Environnement, Risques »
Spécialité « Risques technologiques et naturels »*

Du 6 avril au 19 juin.

Cartographie d'inventaire et morphodynamique des mouvements de versant dans le bassin du Riou-Bourdoux (Alpes de Haute-Provence), approche qualitative au 1/10000^{ème}.

Alexandre MATHIEU



Glissement rotationnel de Pra Bellon, Riou-Bourdoux, Barcelonnette (Cliché : Mathieu.A, 2009)

Structure d'accueil : Institut de Physique du Globe de Strasbourg (UMR 7516), Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre.

Maître de stage : Jean-Philippe Malet (chargé de recherches au CNRS, Institut de Physique du Globe de Strasbourg (UMR 7516), Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, Université De Strasbourg).

Correspondant universitaire : Anne-Véronique Auzet (professeur, Faculté de Géographie et d'Aménagement, Université De Strasbourg).

Jury : Anne-Véronique Auzet, Michel Granet (Directeur de l'EOST).

Avant-propos

Remerciements.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma reconnaissance à Jean-Philippe Malet pour m'avoir donné l'opportunité de faire ce stage et pour m'avoir fait confiance en me proposant ce travail de recherche. Pendant plus de deux mois j'ai ainsi pu découvrir le monde de la recherche et mettre en place, avec les conseils éclairés de Jean Philippe, une méthode de travail qui a conduit à la rédaction de ce mémoire. Merci également pour les connaissances qu'il m'a apporté en répondant aux diverses interrogations que j'ai pu soulever pendant mon travail.

Mes remerciements vont également au personnel du service de Restauration des Terrains de Montagne de *Barcelonnette*. Leur accueil et leurs conseils sur le terrain ont été très appréciables et appréciés. La volonté de partager leurs connaissances sur l'histoire et la dynamique du *Riou-Bourdoux* m'a donné l'occasion d'enrichir les miennes.

Un merci spécial au Laboratoire Image et Ville et à Anne Puissant pour avoir mis à disposition leur matériel le temps de quelques impressions pour mes supports cartographiques, cela m'a été d'une aide inestimable.

Pour ses astuces dans la digitalisation sous *Arcview*, je remercie Alexandre Remaître grâce à qui j'ai pu économiser un temps précieux.

Pour quelques autres manipulations de dernière minute sous *Arcview*, je remercie Jean-Philippe Malet qui m'a apporté son aide et ses connaissances.

Pour ses discussions intéressantes et ses remarques pertinentes sur le terrain, je tiens à remercier Marina Utasse qui a également été d'une aide précieuse lors de la finalisation de la carte morphodynamique.

Enfin, merci à tous les stagiaires et doctorants pour les moments de détente après les longues journées de terrain.

Structure d'accueil.

Ce stage s'est déroulé du 6 avril au 19 juin au sein de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) qui se trouve dans les locaux de l'EOST (Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre) et sur le terrain à Barcelonnette (Alpes de Haute-Provence). L'IPGS est une unité mixte de recherche (UMR 7516) financée par le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) et l'Université de Strasbourg. Différentes thématiques scientifiques y sont abordées : sismologie, géodésie, géophysique, géosciences de surface, environnement, etc. Le stage a été réalisé sous la direction de Jean-Philippe Malet, chargé de recherche au CNRS, qui étudie le fonctionnement des processus hydro-gravitaires dans la vallée de Barcelonnette à travers plusieurs projets européens (ALARM, Mountain Risks, etc.).

Sommaire

Avant-propos	1
Sommaire	2
Introduction	3
Première partie : état de l'art de la cartographie de l'aléa gravitaire et présentation du site d'étude	4
1.1. Etat de l'art : cartographie de l'aléa gravitaire dans le Riou-Bourdoux.....	4
1.1.1. Synthèse des documents existants.....	4
1.1.2. L'apport de la carte morphodynamique au 1/10000 ^{ème}	6
1.2. Caractéristiques physio-géographiques du site d'étude.	7
1.2.1. Le cadre général du bassin de Barcelonnette.	7
1.2.2. Le site d'étude 'Riou-Bourdoux'.	11
Seconde partie : Objectifs de travail et démarche méthodologique.....	15
2.1. Présentation des objectifs de travail.....	15
2.1.1. La carte morphodynamique.....	15
2.2. Présentation de la démarche méthodologique.....	19
2.2.1. Choix de l'approche générale.....	19
2.2.2. Méthodologie de l'étape de terrain.....	19
2.2.3. Méthodologie de l'étape de documentation.	21
2.2.4. Méthodologie de l'étape du rendu cartographique.....	22
Troisième partie : présentation des résultats obtenus et réflexion sur la réalisation d'une carte 'expert'.	24
3.1. Description et interprétation des processus morphogénétiques.	24
3.1.1. Les formations glaciaires et périglaciaires.	24
3.1.2. Les formations fluviatiles et torrentielles.....	25
3.1.3. Les mouvements de versants.....	26
3.1.4. Synthèse statistique	31
3.2. Vers une carte 'expert' (qualitative) des 'mouvements de versants'.....	32
Conclusion.....	34
Table des figures	36
Bibliographie.....	37
Annexes.....	39

Introduction

Le terme '*mouvements de versants*' regroupe une grande variété de processus hydro-gravitaires dont les mécanismes d'initiation et d'évolution sont conditionnés par des facteurs de prédisposition (topographie, lithologie, structure géologique, occupation du sol, etc.) et par des facteurs déclenchants (forçage climatique, pression anthropique, séisme, etc.). Phénomènes azonaux, les mouvements de versants affectent de nombreuses régions du globe (Flageollet, 1989). Toutefois, certaines zones sont considérées comme plus sujettes à ce type d'aléa : c'est le cas des zones montagneuses qui, de part leur physiologie, réunissent la plupart des facteurs décrit précédemment. Ainsi, les pays de l'arc alpin sont fréquemment exposés aux mouvements de versant (Veyret, 2004).

Marquée par une situation d'instabilité généralisée qui affecte ses versants, la moyenne vallée de l'Ubaye (Barcelonnette, Alpes de Haute-Provence) en est un exemple concret. Elle constitue, à ce titre, un site d'étude intéressant pour des projets européens comme ALARM¹ (2001-2004) et surtout Mountain Risks (2007-2010) dans lequel s'inscrit ce stage. De même, les grands glissements qui affectent la vallée (Super-Sauze, La Valette) font l'objet d'un suivi et d'un monitoring par l'Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités de Versants (OMIV). Des chercheurs, de nationalité et de spécialité variées, sont impliqués dans ces recherches dont les buts sont, (i) de mieux connaître le fonctionnement des processus géomorphologiques en milieu montagneux, (ii) de développer de nouvelles techniques de cartographie et d'analyse de l'aléa (Moine, 2008). La vallée de l'Ubaye est également le siège de nombreux appareils torrentiels qui, en incisant les versants, entretiennent les instabilités et engendrent des laves torrentielles. Si la plupart d'entre eux ont fait l'objet d'une cartographie de l'aléa par Thiery en 2007 (Abriès, Bourget, Faucon, Sanières), ce n'est pas le cas du Riou-Bourdoux, torrent le plus dangereux et le plus dommageable de la vallée de part son activité passée.

C'est dans ce contexte qu'il est apparu intéressant de poursuivre sur le Riou-Bourdoux les travaux de cartographie initiés par Thiery sous le projet ALARM. L'objectif du stage consiste en **l'inventaire et la cartographie des instabilités de versant dans le bassin afin d'obtenir une quantification de l'aléa '*mouvements de versants*'**. Pour mener à bien cet objectif, la méthodologie mise en place s'appuie sur une approche qualitative '*experte*' au 1/10000^{ème}. **Elle s'articule autour d'observations et de levés de terrain, d'analyses de documents et d'un rendu cartographique sous SIG² et DAO³**.

Ce mémoire est l'aboutissement des travaux effectués pendant le stage. Il s'organise en trois parties :

- i. Un état de l'art de la cartographie de l'aléa gravitaire et une présentation du site d'étude.
- ii. Une présentation des objectifs de travail et de la méthodologie adoptée pour chaque étape du stage.
- iii. Une présentation et une discussion des résultats obtenus suivie d'une réflexion sur la réalisation ultérieure d'une carte '*expert*'.

¹ ALARM : *Assessment of Landslide Risk and Mitigation in Mountain Areas*.

² SIG : *Système d'Information Géographique*.

³ DAO : *Dessin Assisté par Ordinateur*.

Première partie : état de l'art de la cartographie de l'aléa gravitaire et présentation du site d'étude.

1.1. Etat de l'art : cartographie de l'aléa gravitaire dans le Riou-Bourdoux.

1.1.1. Synthèse des documents existants.

La connaissance de l'aléa '*mouvements de versants*' dans le Riou-Bourdoux est notamment le résultat de plusieurs travaux scientifiques (Légier, 1977 ; Salomé et Beukenkamp, 1989 ; Delsigne, 1999) et du travail incessant du service RTM⁴ de Barcelonnette.

Les schémas géomorphologiques réalisés par Légier en 1977 décrivent les principaux secteurs de glissement (les Aiguettes, Pra Bellon, La Grande Combe) à travers une série d'interprétations géomorphologiques. En 1989 et 1999, les cartes géomorphologiques de Salomé et Beukenkamp puis de Delsigne rendent compte avec précision de la dynamique qui touche le bassin dans sa totalité. Une carte géologique de la région, moins précise, donne également un aperçu de la répartition générale des instabilités dans le bassin-versant. Par ailleurs, le Riou-Bourdoux bénéficie d'un document issu de l'évolution de la cartographie géomorphologique qui fait suite à deux catastrophes naturelles de 1970 : l'avalanche de Val d'Isère en février et le mouvement de terrain du plateau d'Assy en octobre. Ces deux événements ont été le moteur d'une réflexion sur les risques naturels et sur la nécessité de les cartographier. Cette demande sociale est à l'origine de ce nouveau document qu'est la carte ZERMOS⁵. Cette carte propose un zonage du risque à travers un découpage en zones stable, d'instabilité potentielle et d'instabilité déclarée. Le Riou-Bourdoux dispose donc de documents cartographiques apportant des informations, soit sur le risque, soit sur l'aléa (Fig.1).

Documents	Information	Echelle	Secteur
Carte ZERMOS	sur le risque	1/25000 ^{ème}	Vallée de l'Ubaye
Carte géologique	sur l'aléa	1/50000 ^{ème}	Vallée de l'Ubaye
Schémas géomorphologiques (1977)	sur l'aléa	variable selon les schémas	Versants du Riou-Bourdoux
Carte géomorphologique (1999)	sur l'aléa	1/10000 ^{ème}	Bassin-versant du Riou-Bourdoux
Carte géomorphologique (1989)	sur l'aléa	1/25000 ^{ème}	Vallée de l'Ubaye

Fig.1. Synthèse et caractéristiques des documents cartographiques sur l'aléa et le risque gravitaire pour le Riou-Bourdoux.

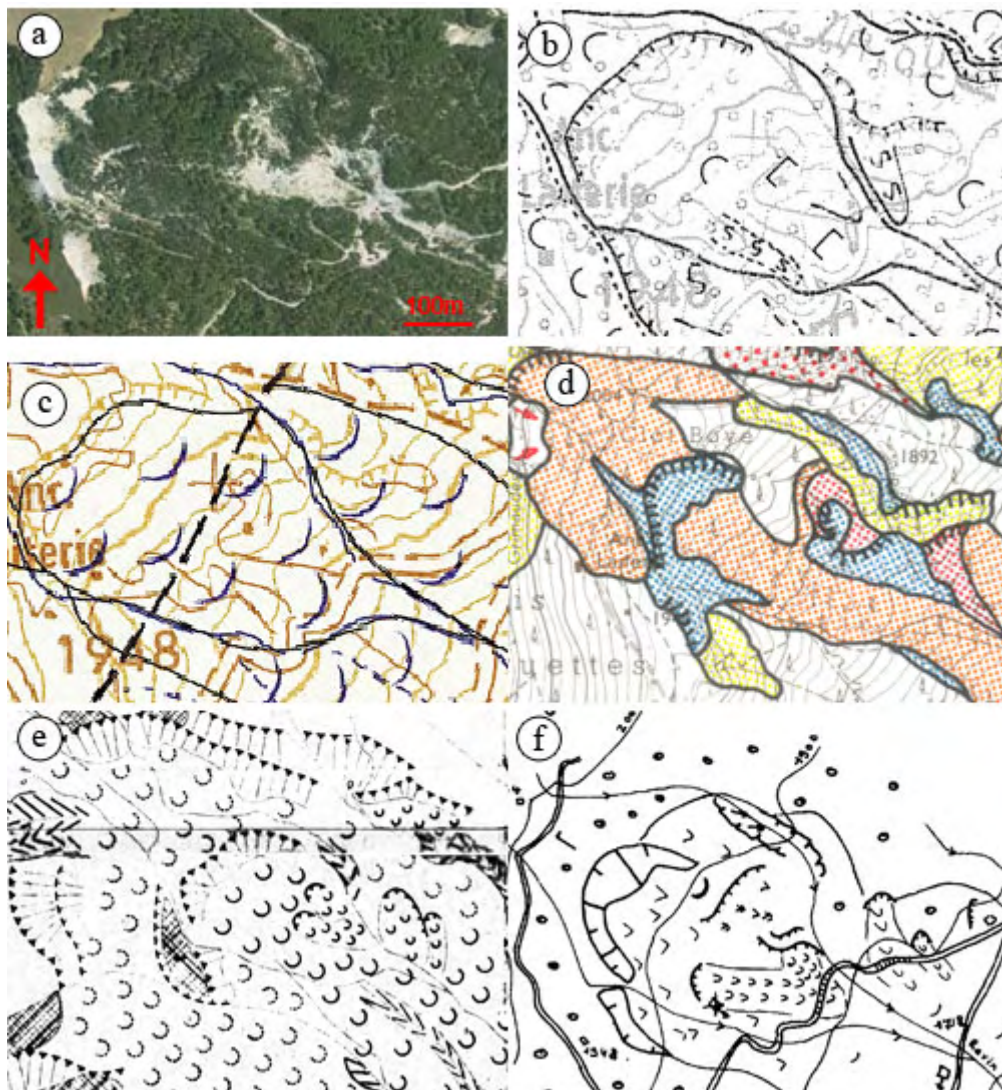
Si les documents de la figure 1 retranscrivent assez fidèlement les secteurs affectés par des instabilités de versants, il reste difficile de discerner, pour chaque phénomène :

- (i) Leurs **caractéristiques géomorphologiques** (état de surface, limites amont et aval, etc.).
- (ii) Leur **typologie** (mouvement translationnel, rotationnel, etc.). Notamment sur la carte géologique.
- (iii) Leur **degré d'activité** (actif, latent, fossile).

⁴ RTM : *Restauration des Terrains de Montagne.*

⁵ ZERMOS : *Zones exposées au Risque de Mouvement du Sol.*

Par ailleurs, il subsiste des décalages quant aux limites et aux interprétations des mouvements : cela s'explique par l'aspect subjectif des levés effectués selon des méthodes et à des échelles différentes (Thiery, 2007). Malgré ces écarts d'interprétation, les différents travaux à l'origine des documents des figures 1 et 2 s'accordent à dire que les **facteurs de prédisposition** aux 'mouvements de versants' dans le Riou-Bourdoux sont : la **topographie** (pentes fortes), la **géologie** (nature lithologique des terrains et formations superficielles), la '**préparation**' par les processus de gel-dégel, l'**occupation du sol** (forêt, prairie, etc.) et l'**activité torrentielle et fluviale** (sapement de berge, suppression de butée, etc.).



a. Orthophoto du secteur (IGN, 2004). b. Illustration du secteur par la carte géomorphologique de Salomé et Beukenkamp. c. Illustration du secteur par la carte géologique. d. Illustration du secteur par la carte ZERMOS. e. Illustration du secteur par la carte géomorphologique de Delsigne. f. Illustration du secteur par le schéma géomorphologique de Légier.

Fig. 2. Extraits des différents documents cartographiques illustrant le glissement des Aiguettes.

Ces documents apportent donc une information de base non négligeable à la répartition spatiale de l'aléa gravitaire dans le bassin-versant, mais leur intérêt reste limité dans le cadre d'une analyse 'réglementaire' du risque en France.

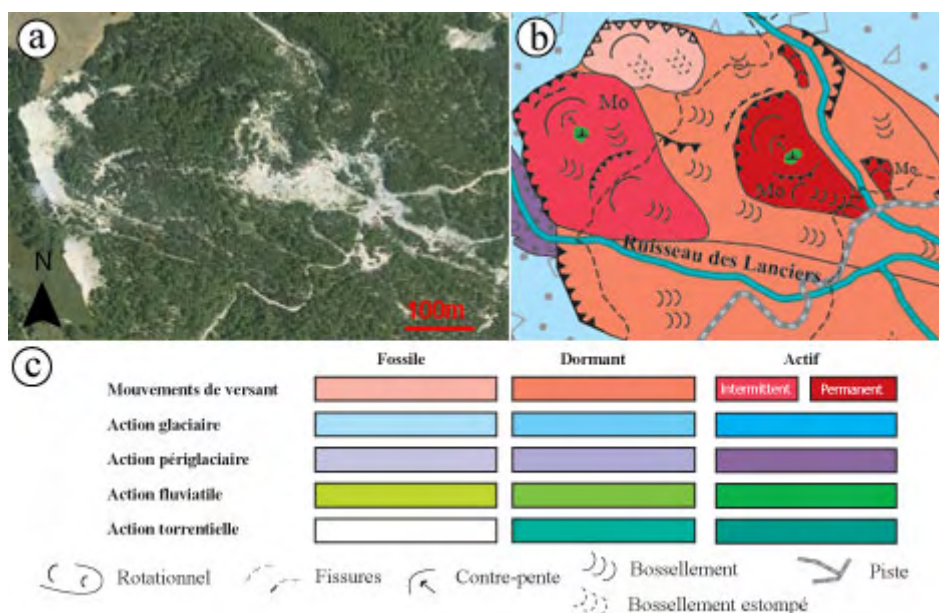
1.1.2. L'apport de la carte morphodynamique au 1/10000^{ème}.

En France, dans le cadre de la procédure PPR⁶, l'analyse et le zonage du risque s'effectuent à l'échelle réglementaire du 1/10000^{ème} et s'appuient en grande partie sur l'évaluation de l'aléa par des **cartes d'inventaires**. L'évaluation et la cartographie de l'aléa supposent de fournir des informations (qualitatives et quantitatives) sur la **distribution spatiale et temporelle** des phénomènes **pour un secteur précis et pour une période de retour donnée** (Thiery, 2007). Aucun des documents cités précédemment (Fig.2) ne répondent correctement à cette demande pour plusieurs raisons :

- (i) L'échelle n'est pas assez grande pour la cartographie précise d'un phénomène et n'est pas adaptée au contexte réglementaire d'analyse du risque en France.
- (ii) Quand l'échelle est adaptée, c'est la sémiologie graphique et l'approche cartographique générale qui n'est pas optimisée pour une évaluation correcte de l'aléa.

La réalisation d'une **carte morphodynamique au 1/10000^{ème}** pour le bassin du *Riou-Bourdoux* s'impose donc comme la solution adaptée à une cartographie de l'aléa telle que le demande le cadre réglementaire français. C'est un **outil de base** pour développer une réflexion sur le risque '*mouvements de versants*' et aboutir à la mise en place d'une carte '*expert*' puis à l'élaboration d'un PPR. Son utilisation est justifiée :

- (i) Par son échelle qui est adaptée à la procédure PPR.
- (ii) Par sa sémiologie graphique qui permet une évaluation précise de l'aléa en définissant la probabilité d'occurrence spatio-temporelle des phénomènes (Fig.3).
- (iii) Par sa base de données annexe qui reprend les caractéristiques de chaque mouvement cartographié (cartographie d'inventaire).



a. Orthophoto du glissement des Aiguettes (IGN, 2004). b. Extrait de la carte morphodynamique, glissement des Aiguettes. c. Extrait de la légende morphodynamique.

Fig.3. Exemple de cartographie morphodynamique. Glissement des Aiguettes.

⁶ PPR : Plan de Prévention des Risques. Document juridique qui réglemente l'urbanisation pour un endroit donné selon un zonage du risque. Le choix du zonage s'appuyant sur des documents scientifiques argumentés.

1.2. Caractéristiques physio-géographiques du site d'étude.

1.2.1. Le cadre général du bassin de Barcelonnette.

Le bassin de *Barcelonnette* se situe dans les Pré-Alpes du Sud (Alpes de Haute-Provence, 04). D'une largeur de 8 à 15km, il s'étend sur 22km entre *Jausier* (1210m) et *Méolans* (1040m). Il est traversé d'Est en Ouest par la moyenne vallée de l'*Ubaye* dont l'orientation illustre l'opposition classique entre un adret ensoleillé et un ubac ombragé et entraîne des différences climatiques et anthropiques (Remaître, 2006). Plusieurs phases tectoniques alpines ont contribué à la genèse du bassin (Remaître, 2006 ; Thiery, 2007). Elles sont à l'origine de la nature des formations lithologiques de la vallée et de la dissymétrie de ses versants. L'histoire géologique complexe du bassin est détaillée dans Légier (1977), Malet (2003), Remaître (2006) et Thiery (2007). Mais il est toutefois nécessaire de distinguer les principales étapes qui sont à l'origine des grands ensembles structuraux, autochtones et allochtones, de la vallée.

Les **terrains allochtones** se sont mis en place lors du plissement alpin de l'*Oligocène* qui a permis l'avancée de deux nappes de charriage, lithologiquement différentes, sur le domaine sédimentaire (Thiery, 2007) :

- (i) La nappe inférieure, ou **nappe de l'Autapie**, se compose de flyschs⁷ à *Helminthoïdes* et de flyschs dissociés. Elle repose directement sur l'autochtone.
- (ii) La **nappe du Parpaillon** recouvre en partie celle de l'*Autapie* mais repose également en discordance sur le soubassement autochtone. Elle est majoritairement constituée de flyschs à *Helminthoïdes*.

Pendant ces phases de charriage, les terrains sous-jacents ont été arrachés sous forme de fragments rocheux à la manière d'un rabot (Remaître, 2006). Ces **écaïlles** rendent complexe le contact entre l'autochtone et l'allochtone. La tectonique alpine est également à l'origine du pli anticlinal qui affecte les formations lithologiques du bassin : si ce pli est postérieur au charriage de la nappe de l'*Autapie*, la nappe du *Parpaillon*, dont la base se trouve à la même altitude (vers 2200m), ne semble pas avoir été affectée (Delsigne, 1999). Déversé vers le sud-ouest, cet anticlinal est à l'origine de la dissymétrie des versants de la vallée :

- (i) En *Ubac*, les crêtes sont armées dans les **écaïlles** calcaires et les **klippes**⁸ des nappes de l'*Autapie* et du *Parpaillon*. Le relief est par conséquent très dentelé et plusieurs sommets se distinguent nettement : la *Grande Séolane* (2909m), le *Pain de Sucre* (2560m).
- (ii) En *Adret*, les crêtes sommitales sont massivement armées dans la nappe du *Parpaillon*, unité structurale peu déformée. Le relief y est donc plus monotone : la *Grande Epervière* (2884m), la *Chalanche* (2984m).

Une phase d'**érosion différentielle** a dégagé les terrains autochtones du *Mésozoïque* en ouvrant une fenêtre géologique dans le bassin de *Barcelonnette* (Delsigne, 1999 ; Remaître 2006 ; Thiery 2007), d'où le nom de '*fenêtre de Barcelonnette*' qui apparaît souvent dans la littérature.

⁷ Flyschs : Formation sédimentaire constituée dans les fonds marins sous forme de turbidite : alternance granoclassée de séquences litées et déposées par les courants marins.

⁸ Klippe : Fragment résiduel isolé par l'érosion et témoignant de l'ancienne extension de la nappe de charriage.

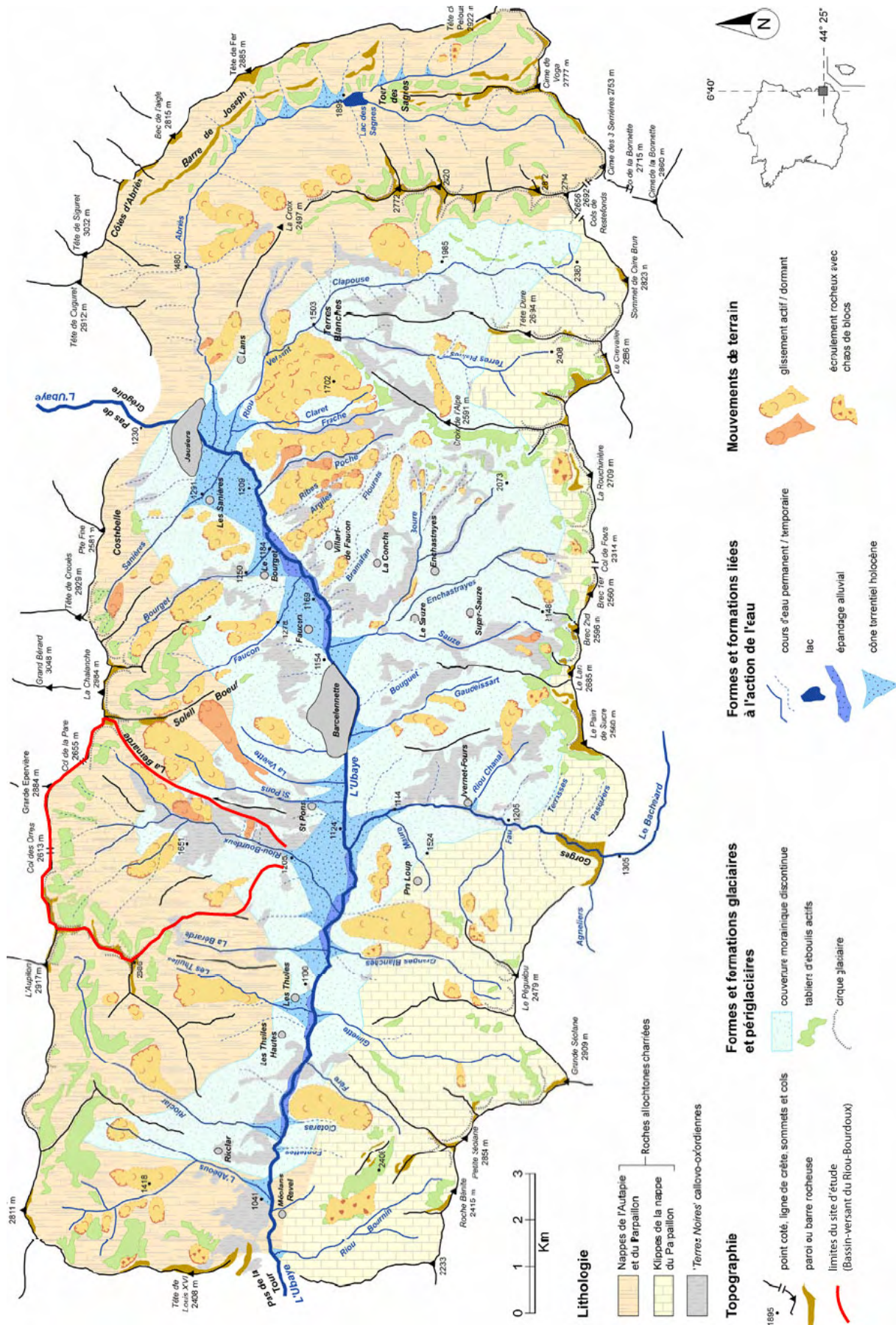
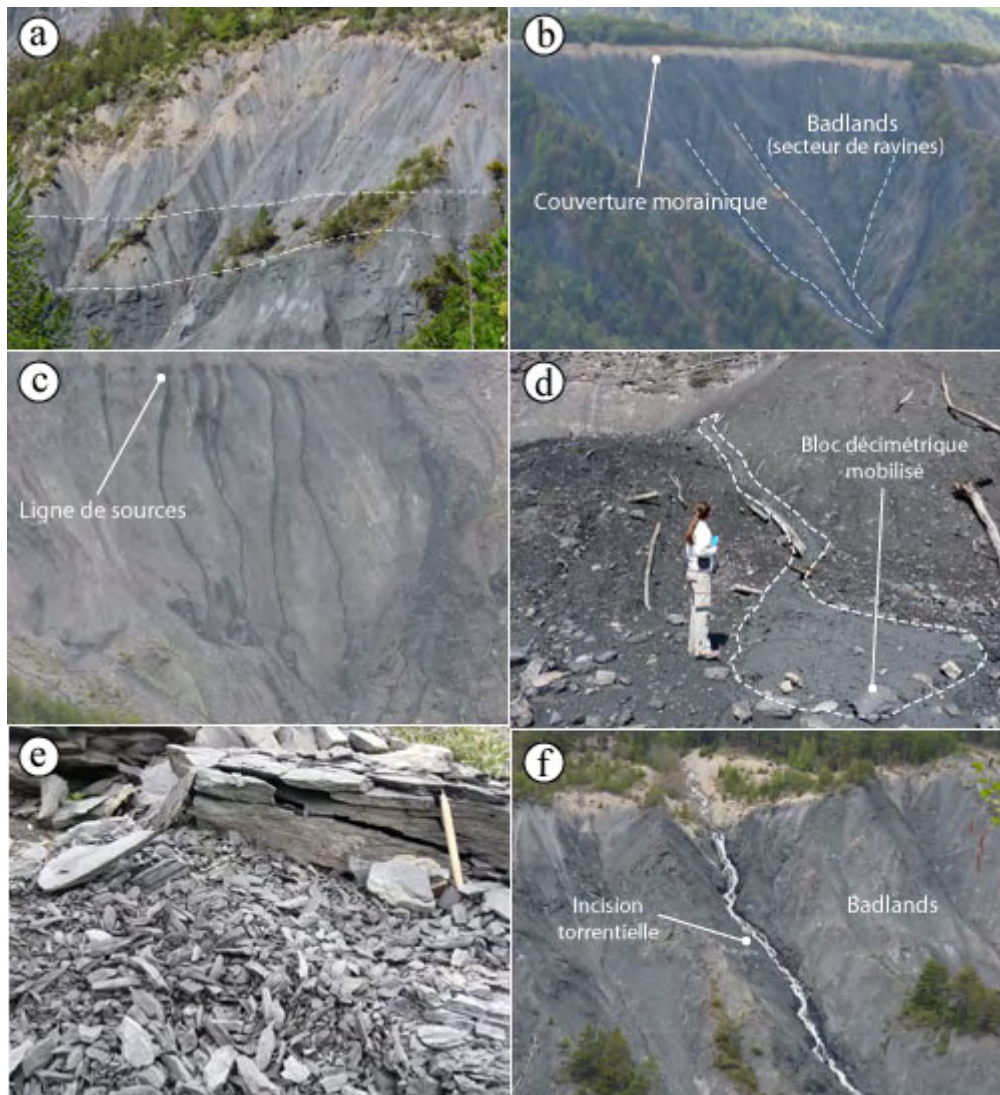


Fig.4. Carte géomorphologique simplifiée du bassin de Barcelonnette (modifié de Remaître, 2006).



a. Stratigraphie dans les 'Terres Noires'. b. Terrains autochtones affectés par le ravinement et placage morainique. c. Sources émergentes au contact marnes/flyschs, contraste de perméabilité. d. Réactivation locale sur un escarpement marneux au lendemain d'un épisode pluvieux. Comportement plastique, voire liquide des marnes. e. Microstructure en 'feuillets' des marnes noires qui se délitent facilement. f. Incision torrentielle 'aisée' dans les marnes noires.

Fig.5. Caractéristiques principales des marnes noires illustrées par le Riou-Bourdoux.

Les **terrains autochtones** se caractérisent par une épaisse série sédimentaire qui s'étend du *Trias* à l'*Eocène supérieur*. Les affleurements se développent majoritairement dans les marno-calcaires de l'*Argonien* et surtout dans les '**Terres Noires**' du *Callovo-oxfordien*, d'une puissance de 300m et constituées de plusieurs sous-ensembles (Fig.5a ; Malet, 2003 ; Remaître, 2006 ; Thiery, 2007) :

- (i) Les marnes schisteuses à plaquettes détritiques du *Callovien* (80-100m).
- (ii) Les marnes noires de l'*Oxfordien inférieur et moyen* (150 à 200m) constituées de bancs centimétriques de calcaires argileux.
- (iii) Les marnes noires de l'*Oxfordien supérieur* (80 à 150m).
- (iv) Les marnes noires de l'*Argovien* (20 à 30m).

La **susceptibilité aux ‘mouvements de versants’** de la vallée de l’*Ubaye*, illustrée par la figure 4, s’explique essentiellement par la microstructure et la minéralogie des **marnes noires callovo-oxfordiennes** et par la macrostructure du substrat, très faillé et diaclasé (Malet, 2003). Par ailleurs, leur changement rapide de consistance (passage d’un état solide à plastique puis liquide pour de faibles variations de teneur en eau) accentue la susceptibilité aux ‘mouvements de versants’ des marnes noires (Fig.5d ; Malet, 2003 ; Thiery, 2007). Les caractéristiques rhéologiques des ‘*Terres Noires*’ sont détaillées dans Malet *et al.*, 2002 et Malet, 2003.

Une autre caractéristique des ‘*Terres Noires*’ est leur **susceptibilité à l’érosion** (incision torrentielle et ravinement) qui se traduit par un paysage de ‘*badlands*’ (ou roubines) très caractéristique du bassin de *Barcelonnette* (Fig.5b, Fig.5f ; Légier, 1977 ; Delsigne, 1999 ; Malet, 2003 ; Remaître, 2006 et Thiery, 2007). Cette érodabilité s’explique par la structure des marnes : c’est une **formation meuble et mal consolidée donc très friable** (Fig.5e).

Enfin, l’**imperméabilité** des marnes noires, lorsqu’elles sont en place, favorise les sources et les concentrations en eau (Fig.5c), occasionnant des **surfaces de rupture** au contact des flyschs ou des formations superficielles, et notamment des formations morainiques du fait de leur capacité de rétention en eau élevée (Légier, 1977 ; Malet, 2003). Ces formations recouvrent les ‘*Terres noires*’ sur la majorité du bassin de *Barcelonnette* et occasionnent donc un **contraste de perméabilité** qui est, en partie, à l’origine de nombreuses instabilités (Fig.4 ; Fig.5b ; Légier, 1977 ; Delsigne, 1999 ; Remaître, 2006).

Outre le rôle des différentes phases de la tectonique alpine, la morphologie du bassin de ‘*Barcelonnette*’ est aussi liée à son **héritage glaciaire et post-glaciaire**. Les formations glaciaires proviennent de la dernière glaciation quaternaire (le *Pléniwürm*, 15000 à 20000 B.P) ainsi qu’au *Tardi-* et *Post-glaciaire* (Malet, 2003 ; Remaître, 2006 ; Thiery, 2007). Elles ont été déposées par le glacier de l’*Ubaye*, d’une épaisseur minimale de 600m, et par ses affluents. Recouvrant une grande partie des affleurements marneux, **les formations glaciaires et périglaciaires se caractérisent par une couverture morainique discontinue d’une épaisseur de 1 à 25m** (Fig.5b ; Thiery, 2007). Constituée d’une matrice fine de teinte beige claire à gris foncé (Flageollet *et al.*, 1999), elle s’apparente, de loin, aux marnes altérées qui se développent sur les interfluvés des ‘*badlands*’ : cette similitude peut prêter à confusion. Les formes glaciaires et périglaciaires sont variées : terrasses de kame, glaciers rocheux, cordons et arcs morainiques, blocs erratiques.

L’évolution du paysage dans le bassin de ‘*Barcelonnette*’ est aussi liée au climat, dont les caractéristiques regroupent des influences méditerranéennes, montagnardes et continentales (Malet, 2003 ; Thiery, 2007). Les **aspects méditerranéens** se résument par un fort ensoleillement annuel, des amplitudes thermiques diurnes marquées et une sécheresse estivale. D’une année sur l’autre les précipitations varient beaucoup et de longs épisodes pluvieux arrosent les mois d’automne et de printemps. L’hiver et l’été sont généralement plus secs mais la période estivale est marquée par des épisodes orageux très intenses et très localisés. Les **aspects montagnards** se traduisent par des précipitations hivernales, liquides ou solides, et des températures assez faibles. Des amplitudes thermiques journalières fortes et des cycles de gel-dégel très développés caractérisent l’**aspect continental**.

Ce climat aux influences multiples a des conséquences directes sur les ‘*mouvements de versants*’ en agissant sur les matériaux de façons : une **phase de préparation** avec un hiver froid et un printemps humide suivie d’une **phase de déclenchement** avec des orages estivaux et de longues pluies d’automne (Malet, 2003). Les caractéristiques climatiques du bassin de *Barcelonnette* sont détaillées dans Légier (1977), Malet (2003), Remaître (2006) et Thiery (2007).

1.2.2. Le site d'étude 'Riou-Bourdoux'.

Situé sur le versant adret du bassin de *Barcelonnette* (Fig.4), le bassin-versant torrentiel du *Riou-Bourdoux* occupe une surface de 18,8km², sans le cône de déjection. C'est un bassin bien développé qui possède une forme circulaire très visible. **La morphologie et la morphométrie** du bassin-versant sont représentatives des principaux appareils torrentiels de la vallée qui sont décrits de façon précise dans Remaître (2006). Tout comme ses voisins de l'Adret (*Faucon, Bourget, Sanières, Abéous*), le *Riou-Bourdoux* présente un profil en long très pentu dans sa partie amont et dont la pente diminue progressivement jusqu'à l'apex sur une longueur d'environ 7km (Fig.6). L'aspect accidenté que peut prendre le profil des torrents du versant adret est certainement le résultat des rectifications effectuées lors des travaux de correction du chenal (Remaître, 2006). Trois sections, caractéristiques de la morphologie des appareils torrentiels, peuvent être distinguées (Fig.6).

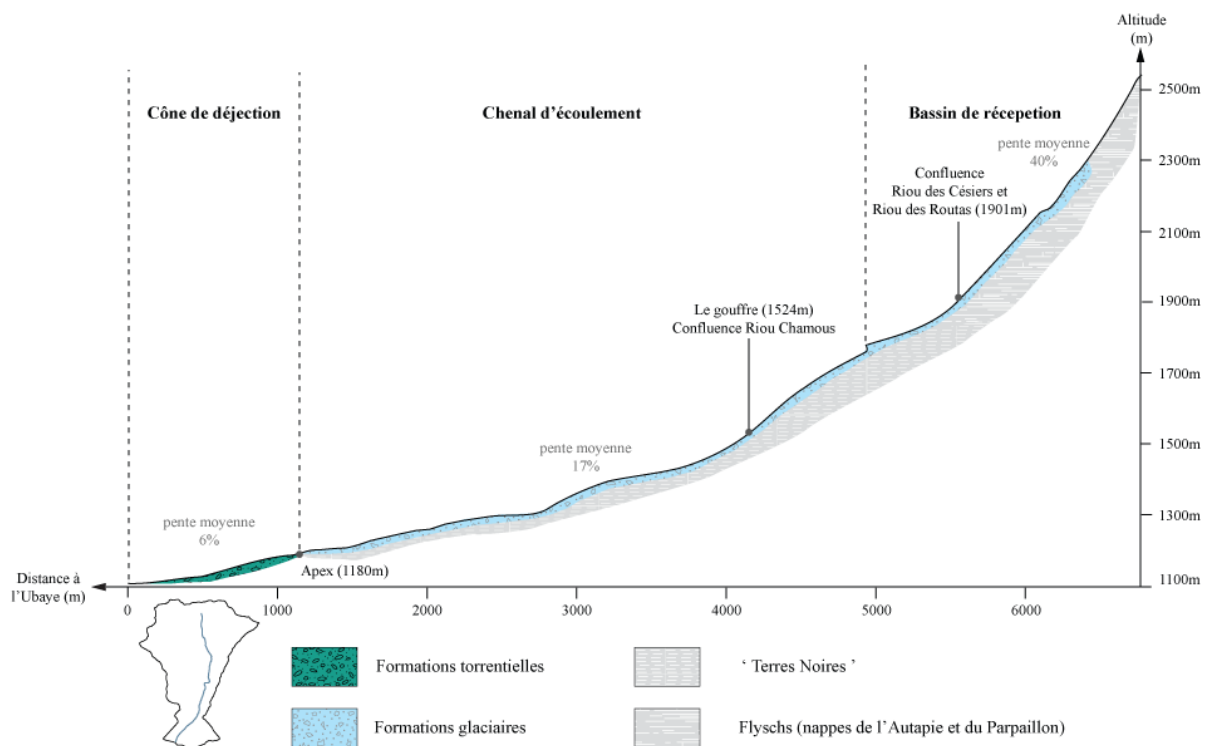
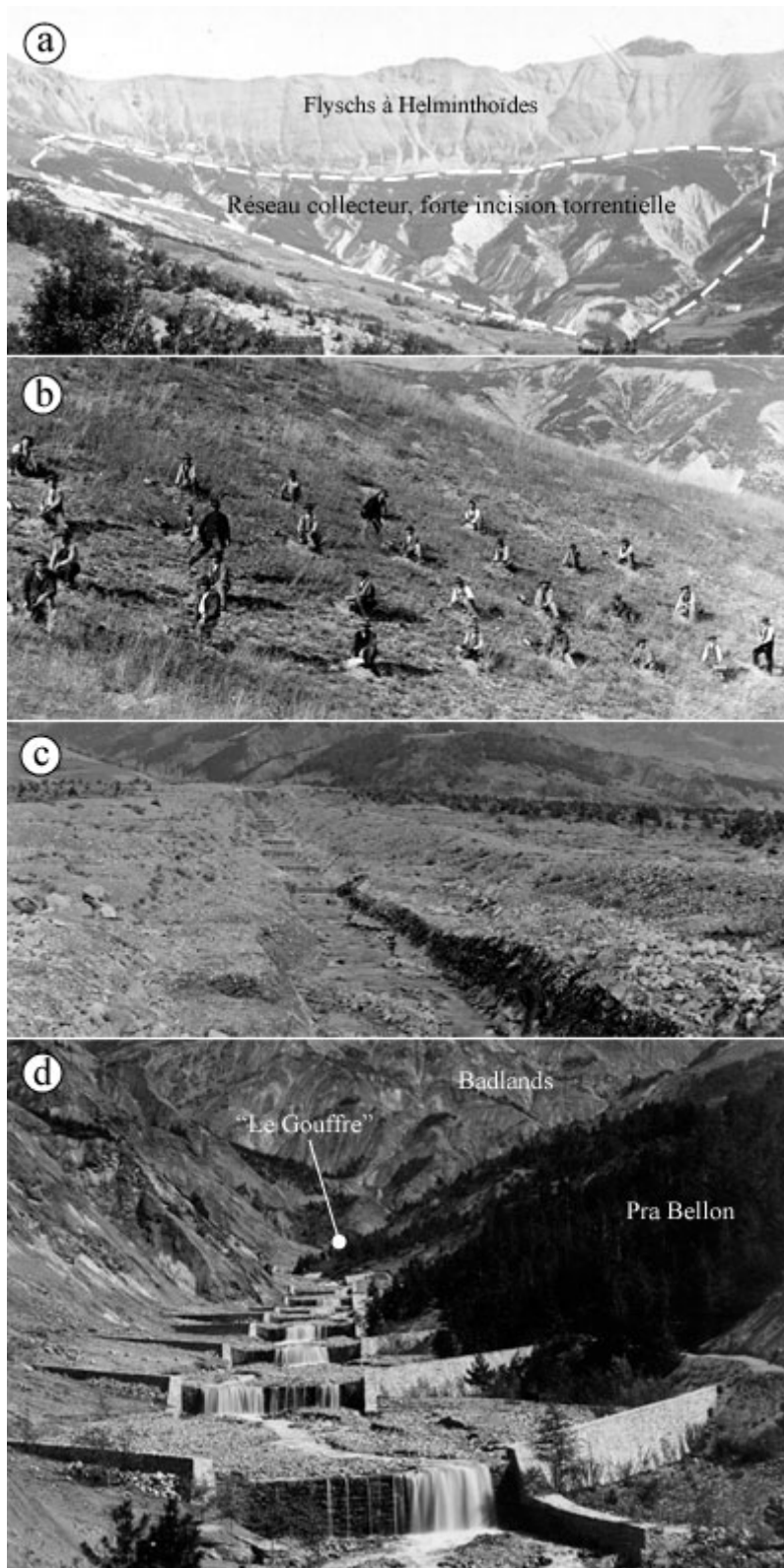


Fig.6. Profil en long du Riou-Bourdoux.

Le **bassin de réception**, avec une pente moyenne de 40%, se développe dans les nappes de charriage où naissent les principaux drains qui formeront le *Riou-Bourdoux* : le *Riou-Chamous*, le *Riou des Césiers*, le *Riou de la Pare*, le *Riou des Primas*, etc. Le bassin de réception est le siège de nombreux écoulements intermittents qui naissent sur les pentes abruptes des crêtes lors de la fonte des neiges et autres épisodes pluvieux. Au fur et à mesure des confluences, l'écoulement devient permanent et forme les principaux affluents du *Riou-Bourdoux* qui prend son nom à partir du 'gouffre'. Ce réseau collecteur très développé contribue à entailler profondément les versants, formant un paysage déchiqueté (Fig.7a). L'aspect circulaire bien dessiné du bassin de réception s'explique par la présence d'anciens cirques glaciaires qui témoignent de l'intensité des glaciers würmiens à laquelle a succédé l'action torrentielle que nous observons aujourd'hui.



a. Vue sur le réseau collecteur principal du Riou-Bourdoux surmonté par les crêtes de flyschs (cliché RTM, 1909). b. Chantier d'exécution de plantations de mélèzes à 1800 m d'altitude en rive droite du Riou-Bourdoux (cliché RTM, 1904). c. Chenal artificiel creusé sur le cône de déjection (cliché RTM, 1910). d. Vue sur le chenal central du Riou-Bourdoux corrigé par les plus gros seuils du bassin-versant (cliché RTM, 1904).

Fig.7. Prises de vue sur l'état du bassin-versant au début dans les années 1900-1910.

Le **chenal d'écoulement** possède une pente moyenne de 17% et correspond au '*Riou-Bourdoux*' *stricto sensu*. C'est le chenal principal du réseau hydrographique, il est corrigé, comme ses affluents, par de nombreux ouvrages que le RTM entretient depuis plus d'un siècle (Fig.7d). Cette section du bassin est caractérisée par des versants intermédiaires aux pentes plus douces qui sont formés dans les marnes noires souvent recouvertes d'un placage morainique et de colluvions. **Ces versants sont le siège de nombreuses instabilités** principalement liées au contraste de perméabilité qui existe entre les marnes et les formations glaciaires et périglaciaires (Delsigne, 1999 ; Thiery, 2007). Ils sont également entrecoupés par un ravinement intense incisant les marnes qui apparaissent sous forme de '*badlands*' (Fig.5b).

Le **cône de déjection** s'étale selon une pente moyenne de 6%. Sa grande superficie témoigne de **l'intensité de l'activité torrentielle passée du Riou-Bourdoux** (Légier, 1977 ; Delsigne, 1999). Le cône est aujourd'hui inactif et donc très anthropisé : présence d'activités industrielles, de loisirs, d'un aérodrome, d'habitations, etc. Le chenal actuel, très rectiligne, est le résultat des travaux du service RTM (Fig.7c).

Le *Riou-Bourdoux* fait partie des cinq appareils torrentiels les plus importants de la vallée avec les torrents de *Faucon*, des *Sanières*, du *Bourget* et de l'*Abéous* : ils sont tous situés en rive droite de l'*Ubaye* (Fig.4) et sont responsables de 72% des crues et laves torrentielles depuis 1850 (Remaître, 2006). Cependant, le *Riou-Bourdoux* se distingue par la taille de son bassin, notamment de son bassin de réception, et par son activité passée. À partir de données d'archives et de témoignages fiables, il a été estimé que l'intervalle moyen séparant deux évènements est compris entre deux et trois ans contre seulement huit pour l'*Abéous* (Remaître, 2006). Selon les mêmes sources historiques, 63 évènements torrentiels, dont 36 crues et 27 laves, ont été attribuées au *Riou-Bourdoux*. Loin derrière, le torrent des *Sanières* est à l'origine de 47 évènements torrentiels (Remaître, 2006).

Les orages estivaux, intenses et brefs, sont souvent à l'origine des crues et laves torrentielles. Il est donc difficile d'établir une corrélation entre les évènements observés et recensés, et les statistiques climatiques générales. Cependant, une étude approfondie de la torrentialité et du climat du bassin de *Barcelonnette* effectuée par Remaître (2006) permet d'obtenir des résultats intéressants.

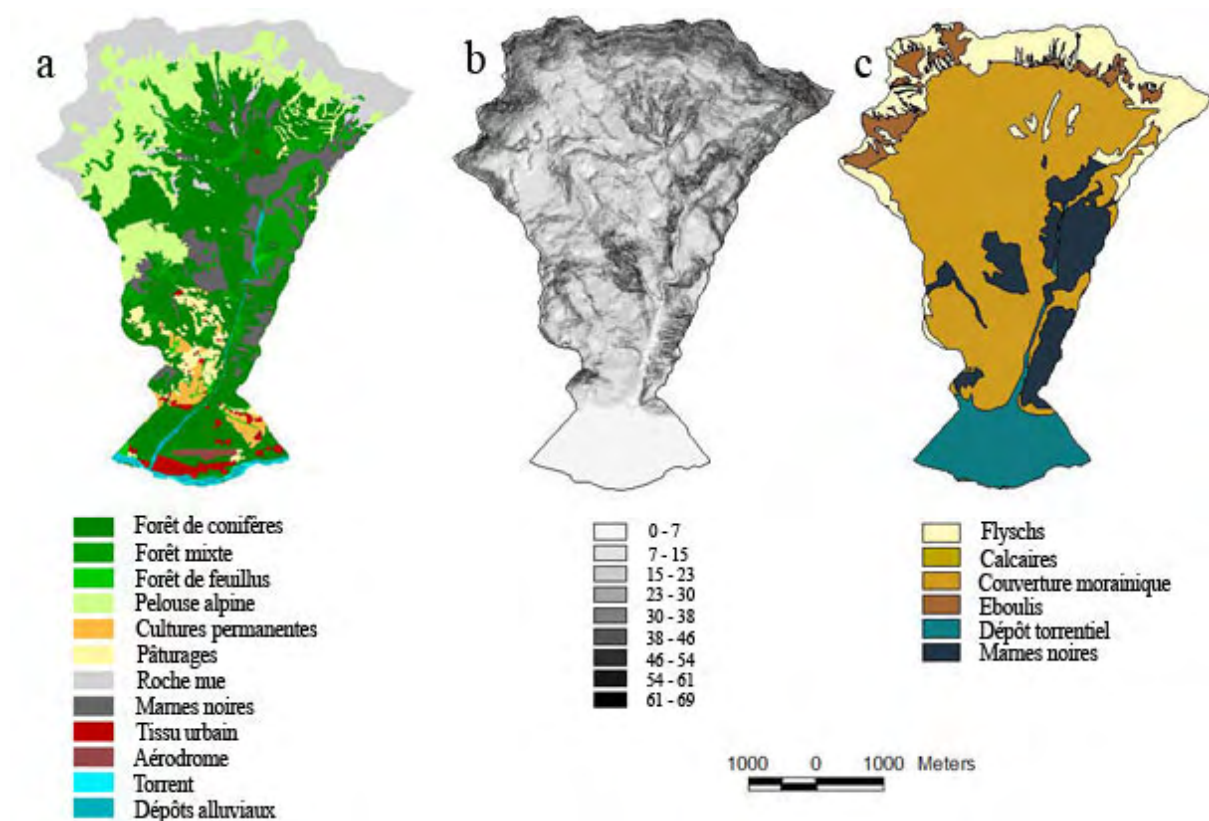
La torrentialité et les instabilités qui affectent le bassin de *Barcelonnette* et surtout le *Riou-Bourdoux* sont à mettre en relation avec une présence humaine forte depuis plusieurs siècles et notamment une activité anthropique :

- (i) **Ancienne**, avec un déboisement intense et presque total du bassin-versant afin de permettre la mise en place d'activités agro-pastorales favorisées par l'exposition en *Adret* (cultures, pâturage, etc.). Le défrichement et le surpâturage ont donc mis à nu les sols, les rendant très sensibles à l'érosion et à l'incision torrentielle.
- (ii) **Récente**, avec les travaux de correction du service RTM qui ont débutés dans les années 1860 et qui s'organisent selon plusieurs axes : l'interdiction juridique des activités agro-pastorales sur certains secteurs sensibles, le gazonnement des versants puis le reboisement, et surtout la correction des chenaux du *Riou-Bourdoux* et de ses principaux affluents.

L'historique de l'occupation humaine du *Riou-Bourdoux* et des longs travaux de correction du service RTM est détaillé et bien documenté dans Delsigne (1999) et Delsigne *et al.* (2001).

Cette **présence humaine a fortement influencé la physionomie du paysage forestier** du bassin de *Barcelonnette*. Le *Riou-Bourdoux* en est un exemple concret car la totalité de son

couvert forestier actuel est d'origine anthropique : il est le résultat des plantations effectuées surtout entre 1866 et 1914 (Fig.7b). **Le peuplement est dominé par les résineux** (pin noir d'Autriche, pin cembro, mélèze). Tout comme le reste de la vallée, le *Riou-Bourdoux* voit se développer sur ses versants un cortège floristique en étages successifs, depuis l'étage collinéen jusqu'à l'étage alpin : outre la pression anthropique, le climat est aussi responsable du peuplement forestier actuel (Remaître, 2006). La physionomie de *la Forêt Domaniale du Riou-Bourdoux* est détaillée dans Delsigne (1999).



a. Carte de l'occupation du sol en 2008. b. Carte des pentes (%) dérivée d'un modèle numérique de terrain. c. Carte simplifiée de la nature du sol.

Fig.8. Caractéristiques principales du Riou-Bourdoux.

Le bassin de *Barcelonnette* est marqué par une **déstabilisation généralisée** illustrée par la figure 4. Ces instabilités sont le résultat de la conjonction de plusieurs facteurs : une **lithologie** sensible à l'érosion, un **héritage glaciaire** source de nombreux matériaux mobilisables, une **torrentialité** bien développée, un **climat agressif** et une **présence humaine** forte. Le *Riou-Bourdoux*, bassin-versant torrentiel affecté par des instabilités, est très représentatif de cette situation. La figure 8 présente les **principaux traits caractéristiques** de ce bassin-versant qui constitue le site d'étude de ce stage.

Seconde partie : Objectifs de travail et démarche méthodologique.

2.1. Présentation des objectifs de travail.

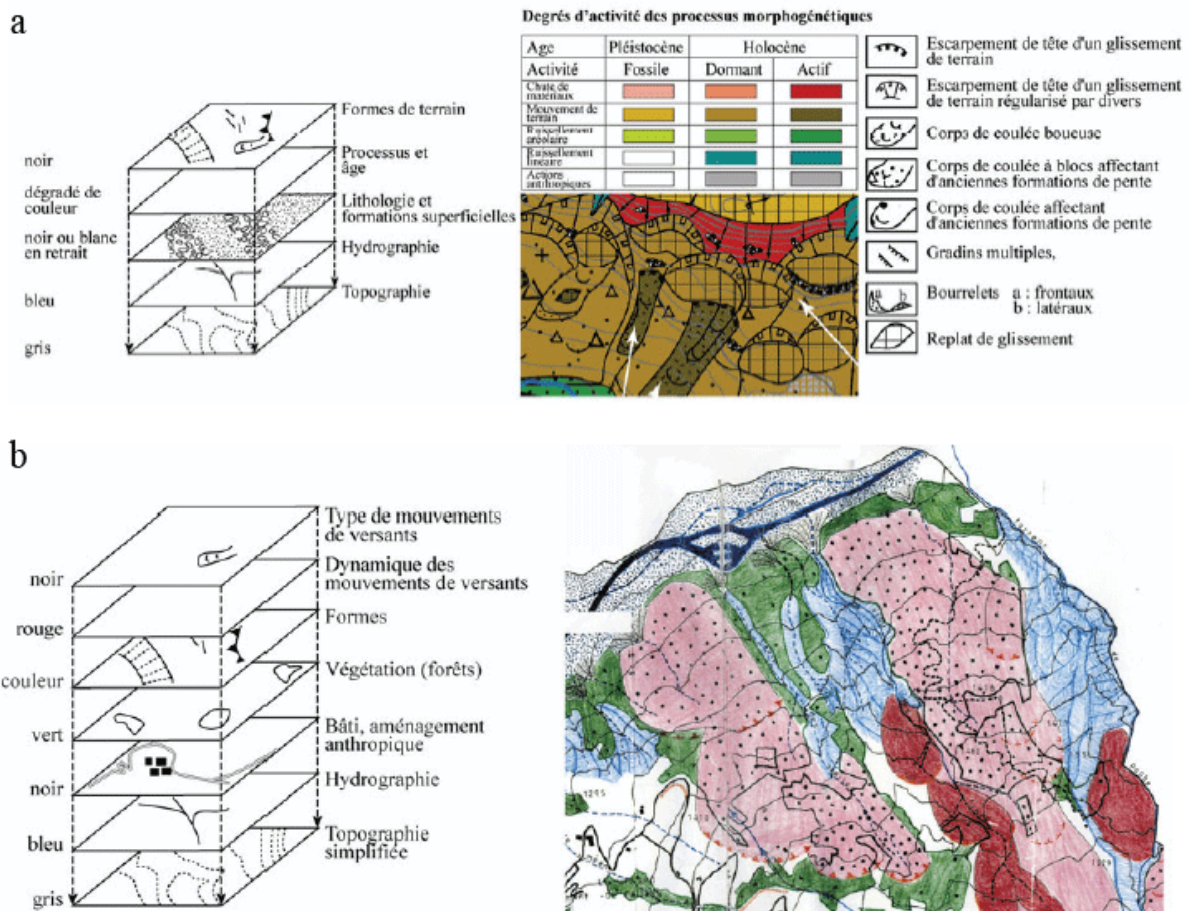
La description générale du bassin de *Barcelonnette* effectuée en première partie montre que plusieurs facteurs influencent la localisation, spatiale et temporelle, des '*mouvements de versants*'. Cependant, l'état de l'art de la cartographie de l'aléa gravitaire dans le *Riou-Bourdox* a mis en évidence **un manque de précisions sur les différents types de phénomènes, leurs limites précises et leur degré d'activité**. Avec ce manque de données, il n'est pas possible d'établir une cartographie de la susceptibilité et de l'aléa à l'échelle du 1/10000^{ème}. **Dans ce contexte, il apparaît indispensable d'engager une cartographie morphodynamique adaptée pour disposer de ces informations manquantes**. Cette carte d'inventaire est accompagnée d'une **base de données reprenant les caractéristiques de chaque mouvement** : la carte et la base de données constituent les objectifs de ce travail.

2.1.1. La carte morphodynamique.

La **cartographie géomorphologique** est un exercice **subjectif** puisqu'il s'agit de faire une **interprétation** de la mise en place des différentes unités morphologiques. Son objectif est **d'expliquer la formation du relief et de hiérarchiser les différentes étapes de sa mise en place** (Thiery, 2007). Les informations ainsi fournies par la carte géomorphologique sont nombreuses : relief, processus, lithologie, formations superficielles, etc. Il n'existe pas, à ce jour, de système de légende universel : chaque légende devant être adaptée à l'échelle de travail, aux objectifs visés et aux informations qu'il faut faire ressortir en priorité.

Afin de répondre aux besoins précédemment exposés, la carte géomorphologique ne doit pas se contenter de fournir les informations de base sur la genèse du relief : elle doit aussi comporter des informations sur l'activité des '*mouvements de versants*' et des autres processus. C'est pour cette seule raison qu'elle est appelée '*carte morphodynamique*'. Cette carte a été élaborée par Thiery au cours de sa thèse afin de disposer d'un outil de base pour ses travaux ultérieurs. Comme dans tout système de légende, une attention particulière doit être portée à la retranscription des données obtenues sur le terrain et par analyse de documents : **trop d'information rend la carte illisible et inutilisable et risque de complexifier l'analyse qui découle de son utilisation ; au contraire, pas assez d'information rend le document peu fiable et inutilisable également**. Le choix du système de légende pour la carte morphodynamique est donc une étape importante : une analyse des différentes méthodes de cartographie morphologique existantes est présentée dans Thiery (2007). **D'origine scientifique ou universitaire, ces systèmes de légendes sont variés et Thiery en a retenu deux à partir desquels est élaborée la carte morphodynamique :**

- (i) **Le système '*champenois*'** (Fig.9a ; Guérémy et Marre, 1996) est développé à l'échelle du 1/10000^{ème} pour être utilisable dans le cadre de la procédure PPR. Les processus morphogénétiques sont représentés par des aplats de couleur dont la saturation en indique le degré d'activité. Des figurés noirs représentent les formes topographiques. La lithologie est indiquée seulement où la roche affleure car elle ne constitue pas une information prioritaire.
- (ii) **Le système '*strasbourgeois*'** (Fig.9b) est issu des travaux menés depuis 1992 sur la cartographie morphodynamique au 1/10000^{ème} dans le bassin de *Barcelonnette* (Thiery, 2007). Il est plus spécialisé que le système '*champenois*' et met clairement l'accent sur le processus '*mouvements de versants*' qui est représenté par un aplat



a. Illustration du système de légende 'champenois' développé par Guérémy et Marre. b. Illustration de système de légende 'strasbourgeois' développé par Augier et Flageollet.

Fig.9. Systèmes de légende à l'origine de la carte morphodynamique (Thiery, 2007).

Ces systèmes de légende ont donc été choisis en raison :

- (i) De l'aspect pratique du système 'champenois', notamment pour le choix **d'une couleur par processus** et pour le **dégradé de couleur** selon l'activité du processus.
- (ii) De l'aspect orienté '**mouvements de versants**' du système 'strasbourgeois'.

Le système de légende 'morphodynamique' qui en découle est présenté dans la partie 'méthodologie' de ce mémoire.

2.1.2. La base de donnée attributaire 'mouvements de versants'.

Cette base de données répertorie les caractéristiques qualitatives et quantitatives de chaque phénomène identifié par une série d'attributs (Fig.10). Ces attributs ont été choisis par Thiery lors de sa thèse afin de définir les meilleurs variables qualificatives, ils sont répartis sur trois bases de données attributaires : (i) une **base de données contenant des informations**

qualitatives et semi-qualitatives, (ii) une base de données contenant des informations quantitatives, (iii) une base de données dérivée contenant des indices complémentaires dont les calculs sont issus des données de la base précédente.

Les attributs qualitatifs et semi-qualitatifs sont :

- (i) Le type de phénomène (issu de la typologie de la carte morphodynamique) ;
- (ii) L'activité déterminée de manière experte ;
- (iii) Une série d'attributs permettant de décrire l'état de surface de l'objet (dégradation de l'escarpement, état des fissures, état du bossellement, port des arbres, présence de sources, etc.) ;
- (iv) La végétation observée sur l'objet⁹ ;
- (v) La dégradation des objets anthropiques si il y en a (route, piste, canalisation, etc.).
- (vi) Les indices de confiance cartographique (existence des phénomènes sur d'anciens documents, observation de terrain, etc.).

Ces attributs servent à définir le degré d'activité des phénomènes en se basant sur une série d'indicateurs présentés en annexe 3.

Les attributs quantitatifs sont :

- (i) La longueur projetée de l'objet (m) mesurée sur SIG ;
- (ii) La longueur réelle de l'objet (m) en tenant compte de sa pente moyenne (°) ;
- (iii) La longueur et la largeur de la zone de départ, ou d'ablation (m) ;
- (iv) L'épaisseur estimée de la zone d'ablation (m) ;
- (v) La longueur et la largeur de la zone d'accumulation (m) ;
- (vi) L'épaisseur estimée du matériau déplacé (m) ;
- (vii) La surface des objets (m²) ;
- (viii) L'altitude amont de l'objet (m) ;
- (ix) L'altitude aval de l'objet (m) ;
- (x) Le dénivelé de l'objet (m) ;
- (xi) Le périmètre de l'objet (m) ;
- (xii) La pente moyenne (°) ;
- (xiii) Le volume estimé de l'objet (m³) ;
- (xiv) La vitesse estimée de l'objet (par classes estimées ; Cruden et Varnes, 1996) ;
- (xv) L'intensité estimée, par classe (volume x vitesse).

⁹ Le type de végétation observée est dérivé des classes de végétation présentes dans la base de données ALARM sur l'occupation du sol. Cette base a été créée par Anne Puissant au sein du Laboratoire Image et Ville. Correspondance du type de végétation avec l'identifiant dans la base de donnée : Forêt de conifères (1), Forêt mixte (2), forêt de feuillus (3) ; Pelouses naturelles (4) ; Pâturages (5) ; Cultures (6).

Les indices dérivés sont :

- (i) L'indice de profondeur ;
- (ii) L'indice de dilatation ;
- (iii) L'indice de déplacement ;
- (iv) L'indice de ténuité ;
- (v) L'indice d'écoulement plastique ;
- (vi) L'indice de largeur de la zone d'accumulation sur la longueur totale ;
- (vii) L'indice de largeur de la zone d'ablation sur la longueur totale ;
- (viii) L'indice de largeur de la zone d'ablation sur la largeur de la zone d'accumulation ;

Le mode de calcul de chacun de ces indices est présenté en annexe 4.

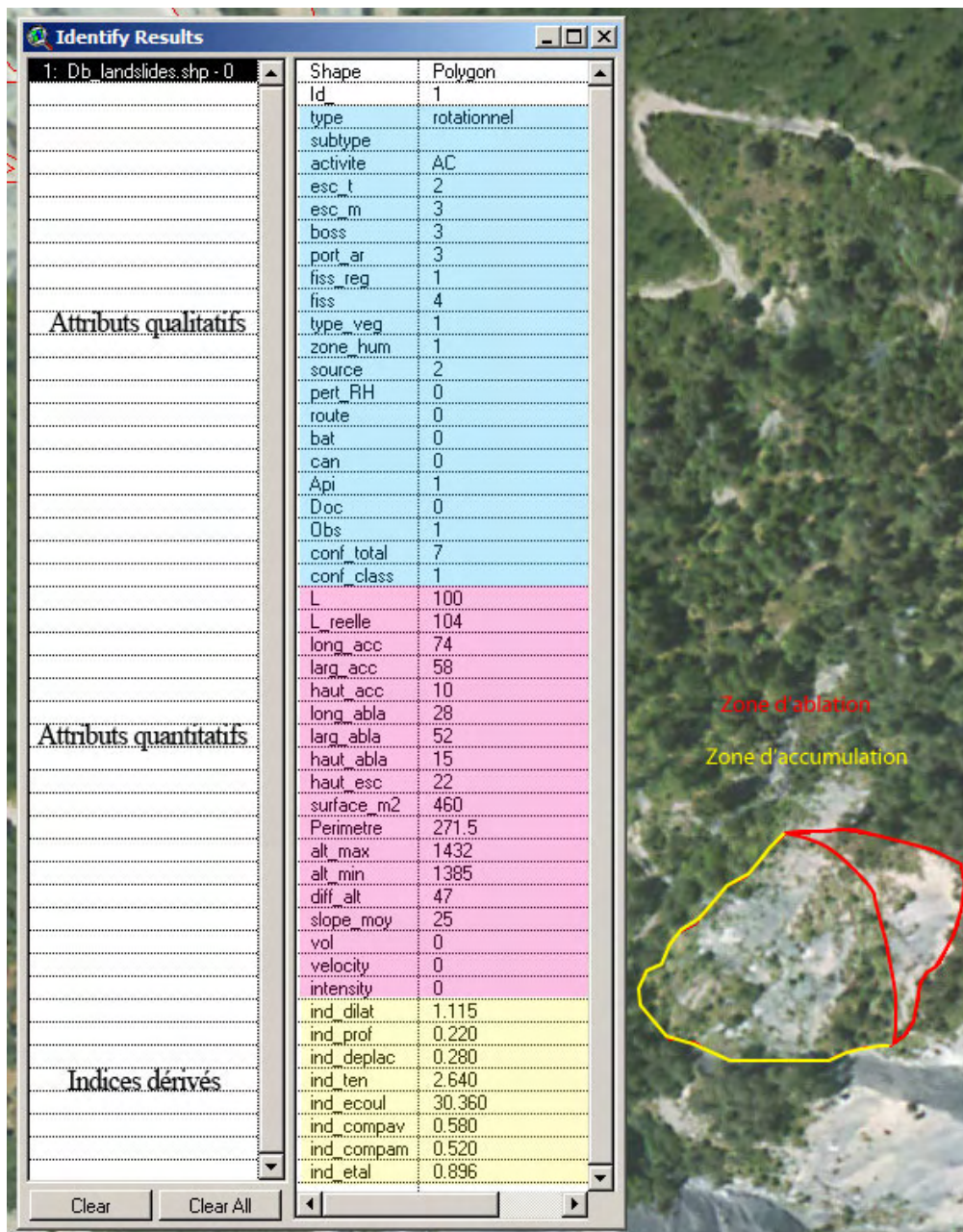


Fig.10. Exemple de base de données pour un phénomène identifié.

2.2. Présentation de la démarche méthodologique.

2.2.1. Choix de l'approche générale.

L'évaluation et le zonage de l'aléa peut se faire selon plusieurs approches en fonction des **objectifs de travail**, du **nombre et de la qualité des données d'entrées** et de **l'échelle de travail**. Suivant le **degré de subjectivité** introduit dans l'analyse, Thiery a retenu les approches suivantes : qualitative, semi-quantitative, quantitative, hybride, temporelle, déterministe. L'annexe 2 présente les caractéristiques principales de chaque approche.

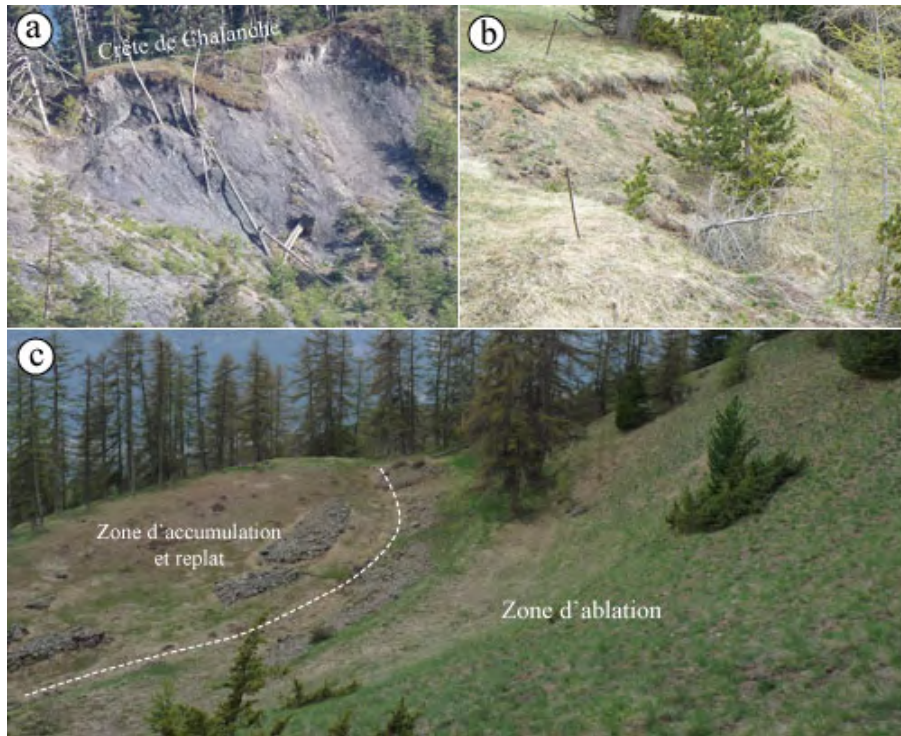
Pour notre travail, c'est **l'approche qualitative** dite '*experte*' qui a été retenue. Elle repose sur l'opinion de la personne en charge de l'évaluation de l'aléa (Thiery, 2007). Les informations sont collectées sur le terrain avec l'appui de photographies aériennes et autres documents existants (travaux scientifiques, archives, cartes diverses, etc.). La **cartographie d'inventaire**, ou morphodynamique, s'inscrit dans cette approche. Elle nécessite un relevé de terrain, une photo-interprétation, l'analyse de documents historiques fournissant des informations sur le type et l'activité des phénomènes. Le résultat cartographique peut être considéré comme **une forme élémentaire de carte d'aléa**.

2.2.2. Méthodologie de l'étape de terrain.

Sur le terrain, le principal travail est de collecter un maximum de données, qualitatives et quantitatives, concernant les différents processus qui ont modelé le bassin-versant, en mettant l'accent sur le processus '*mouvements de versants*'. Il s'agit donc d'inventorier un maximum de phénomènes et, pour chacun d'eux, **d'effectuer une série de mesures et d'observations afin de compléter les attributs qualitatifs et quantitatifs**. Ainsi, les longueurs et largeurs des zones d'ablation et d'accumulation ont été mesurées par décamètre ou topofil. Quand la configuration du terrain ne permet pas d'effectuer ces mesures, une estimation par photo-interprétation est réalisée à condition que le mouvement soit clairement visible et qu'il existe déjà sur le document. De même, l'altitude des limites amont et aval de chaque mouvement est mesurée avec un GPS Magellan. Chaque phénomène identifié spatialement est cartographié sur un fond topographique au 1/10000^{ème}.

L'étape de terrain est avant tout une étape d'observation. Pour les mouvements de versants, il s'agit de décrire les différentes variables qualitatives permettant de **définir l'activité du phénomène**. Sur le terrain, qualifier l'activité passe par la description de trois indicateurs : **la morphologie, l'état de la végétation et la perturbation du réseau hydrographique**. D'autres indices ont aussi été observés pour compléter les variables qualitatives (présence de zone humide, état des aménagements, etc.).

La morphologie s'impose comme l'indicateur le plus pertinent car son analyse repose sur un principe simple : plus la forme est fraîche, plus le phénomène est considéré comme actif. Ainsi, la présence d'escarpement, de fissures, de blocs disloqués ou d'une topographie chaotique sont considérés comme des marqueurs de l'activité récente et intense d'un mouvement. Un '*état de surface*' peut donc être dressé pour chaque phénomène. En comparant les états de surface les uns aux autres, il est possible d'établir une échelle relative de l'activité.



a. Escarpement frais d'un glissement-coulée à composante rotationnelle. b. Escarpement atténué et végétalisé sur la partie amont du glissement des Aiguettes. c. Glissement rotationnel fossile entièrement végétalisé, les formes sont très atténuées.

Fig.11. Indicateurs de l'activité : la morphologie.

La végétation est un marqueur complémentaire très utile. L'observation du port des arbres peut permettre de retracer les différents stades d'activité d'un phénomène. Ainsi, une forêt ivre, des arbres morts ou déracinés, une végétation différente des alentours sont autant de témoins de l'activité et de la localisation d'un mouvement. À l'inverse, une végétation pionnière, des arbres redressés supposent une activité passée. De même, une végétation hygrophile sur un phénomène stabilisé suggère une forte humidité et la possibilité d'une réactivation prochaine.



a. Arbre penché témoignant de l'activité de la coulée. Un arbre redressé retrace les phases de réactivation du mouvement b. Forêt ivre sur le glissement des Aiguettes. Les arbres penchés vers l'amont sont caractéristiques d'une zone d'ablation.

Fig.12. Indicateurs de l'activité : la végétation.

Les torrents sont aussi considérés comme un critère d'instabilité. Leur pouvoir érosif peut modifier les berges (sapement) et la suppression de butée qui en découle peut déclencher un mouvement ou en réactiver un. Si le pied d'un glissement n'est pas en contact avec le torrent (présence d'une terrasse), alors le glissement se stabilisera.

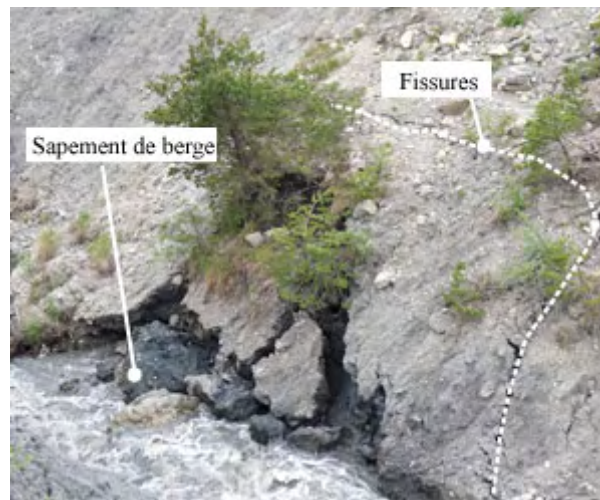


Fig.13. Sapement de berge par le Riou-Bourdoux en aval du 'gouffre'.

2.2.3. Méthodologie de l'étape de documentation.

L'étape de documentation est **préalable et complémentaire** à toute mission de terrain. Dans notre cas elle permet, (i) de localiser les phénomènes sur des documents cartographiques, sur des photos d'archives ou sur des photos aériennes, (ii) d'obtenir une information sur l'activité d'un mouvement par analyse diachronique de photos aériennes sur plusieurs dates, (iii) d'affiner les limites spatiales d'un mouvement cartographié sur le terrain. Cette étape permet aussi d'obtenir les connaissances générales sur le *Riou-Bourdoux* (sa lithologie, son histoire, etc.) qui peuvent aider à la compréhension de l'aléa '*mouvements de versants*'. **Une documentation bien préparée doit permettre, pour le terrain, de se concentrer sur la seule acquisition de données.** Dans notre cas, les documents utilisés pour compléter les levés de terrain sont :

- (i) Les bases de données *IGN* : la *BD Carto* (IGN, 2006) et la *BD Ortho* (IGN, 1956, 2004) qui permettent une interprétation du paysage par observation d'un certain nombre d'indicateurs (type de végétation, dégradation de la surface du sol, etc.). Une méthode d'inventaire et de caractérisation des mouvements de terrain par photo-interprétation est détaillée dans Moine (2008) ;
- (ii) Les jeux de photographies aériennes des années 1956 et 2004 qui permettent de distinguer des '*mouvements de versants*' par vision stéréoscopique.
- (iii) Des documents cartographiques issus de travaux scientifiques : une carte géomorphologique au 1/10000ème sur la totalité du *Riou-Bourdoux* (Delsigne, 1999), une carte géomorphologique au 1/25000ème sur la totalité du bassin de *Barcelonnette* (Salomé et Beukenkamp, 1989), la carte ZERMOS au 1/25000ème sur la totalité du bassin de *Barcelonnette*, la carte géologique de la région au 1/50000ème, les schémas géomorphologiques de Légier (1977) ;
- (iv) Des photographies du *Riou-Bourdoux*, provenant des archives du RTM, qui sont bien documentées et qui permettent d'observer, sur certains secteurs, des

L'analyse croisée de ces documents, couplée aux observations de terrain, permet de définir un indice de confiance cartographique (ICC) pour chaque phénomène cartographié. Cet indice constitue un des attributs qualitatifs de la base de données, son mode de calcul est détaillé dans l'annexe 5.

2.2.4. Méthodologie de l'étape du rendu cartographique.

La légende la carte morphodynamique est un compromis de deux systèmes de légende géomorphologique (cf. partie 2.1.1). Pour ce stage, la légende de Thiery a été adaptée au contexte du *Riou-Bourdoux* : certains processus morphogénétiques, considérés comme inutiles ou superflus car inexistant, ont été retirés ; certains figurés devant être appliqués sur de très petites surfaces ont du être adaptés pour être lisibles et compréhensibles. La légende utilisée pour le *Riou-Bourdoux*, tout comme l'originelle réalisée par Thiery, s'organise en deux partie.

Age supposé	Pléistocène		Holocène		Historique		Actuel
	20 000 B.P.		10 000 B.P.		150 B.P.		Présent
	Fossile		Dormant		Actif		
Mouvements de versant	[Barre rose pâle]		[Barre orange]		[Barre rouge] Intermittent [Barre rouge foncé] Permanent		
Action glaciaire	[Barre bleu clair]		[Barre bleu]		[Barre bleu foncé]		
Action périglaciaire	[Barre violet pâle]		[Barre violet]		[Barre violet foncé]		
Action fluviatile	[Barre vert clair]		[Barre vert]		[Barre vert foncé]		
Action torrentielle	[Barre blanc]		[Barre cyan]		[Barre cyan foncé]		

Fig.14. Processus morphogénétiques retenus pour le Riou-Bourdoux (adapté de Thiery, 2007).

Les processus morphogénétiques, qui traduisent la genèse et la dynamique des formes de terrain, sont représentés par des aplats de couleurs. Cinq processus ont été retenus (Fig.14), contre sept à l'origine : **les 'mouvements de versants', l'action glaciaire, l'action périglaciaire, l'action fluviatile et l'action torrentielle**. Chaque processus correspond à une couleur précise. La couleur la plus voyante, le rouge, est utilisée pour représenter les 'mouvements de versants' afin de mettre en exergue ce type de processus. Pour chaque couleur, des niveaux de saturation distinguent les différents degrés d'activité des processus : l'activité des processus est distinguée selon l'âge, la périodicité. L'âge est estimé selon le degré d'estompement des formes. Trois degrés d'activité sont retenus pour l'ensemble des processus, à l'exception des 'mouvements de versants' pour lesquels une nuance est ajoutée selon les indicateurs observés sur le terrain (cf. partie 2.2.2) :

- (i) **Les processus fossiles ou éteints** correspondent à des événements passés qui ne sont plus susceptibles de se reproduire sous les conditions climatiques actuelles. Leur fréquence est nulle et les formes associées sont très estompées, il est difficile de les distinguer dans le paysage. Cependant, ces formes peuvent être affectées par des processus plus récents et différents. Par exemple, un secteur aujourd'hui inactif du glissement de *Pra Bellon* est affecté par du ravinement laissant place à un paysage de 'badlands' en lieu et place d'un ancien escarpement.

- (ii) **Les processus latents ou dormants** peuvent se déclencher dans les conditions naturelles actuelles (climat, topographie, etc.). La périodicité n'est pas connue mais la fraîcheur des formes suppose une activité plus récente qu'un processus fossile (Thiery, 2007).
- (iii) **Les processus actifs** sont nettement visibles dans le paysage, l'état de surface général est très différent des alentours. Un processus est considéré comme '*actif intermittent*' si il connaît des réactivations périodiques corrélées avec les conditions environnementales. Par exemple, une réactivation saisonnière suite à la fonte annuelle des neiges.

Les concepts utilisés et les difficultés rencontrées pour déterminer l'activité des '*mouvements de versants*' est présentée succinctement en annexe 6. En raison du manque d'information sur la date de déclenchement ou de réactivation des phénomènes, l'échelle d'activité a été simplifiée et les classes d'activité citées précédemment ont été choisies à partir des observations de terrains et des informations issues de l'étape de documentation. La figure 15 présente les degrés d'activité utilisés dans ce travail avec l'âge, la période de retour et la fraîcheur des formes de terrain.





ACTIVITE	INACTIF			ACTIF	
	Fossile	Latent (dormant)		Intermittent	Continu
AGE ESTIME	Pléistocène 20 000 B.P.	10 000 B.P.	Holocène	Historique 150 B.P.	Actuel Présent
PERIODE DE RETOUR	Inconnue			10 ans	1 an 1 jour
MORPHOLOGIE	 Les formes sont légèrement perceptibles, il ne reste que des traces morphologiques du phénomène	 Les formes sont modifiées par un drainage de surface, de l'érosion, le glissement se recouvre de végétation.	 La morphologie reste différente des alentours, cependant, les formes sont plus douces que précédemment.	 Formes fraîches, la morphologie est distincte des alentours, les fissures sont bien visibles.	

Fig.15. Légende adoptée pour les degrés d'activité des 'mouvements de versants' (Thiery, 2007).

Les formes et formations sont indiquées par des figurés de couleur noire inspirés des taxons décrits par Joly (1997). Chaque famille de formes et formations correspond à un processus. Les formations affectées par les '*mouvements de versants*' sont indiquées par un code alphabétique. Si un phénomène s'est déclenché dans deux formations différentes, les lettres correspondantes à chaque formation sont indiquées avec, dans l'ordre, les formations superficielles puis le substrat. Par exemple, un mouvement qui affecte les moraines (Mo) et les marnes sous-jacentes (Ma) sera indiqué par ce code : **MoMa**.

La carte a été levée sur plusieurs fonds topographiques au 1/10000^{ème}. Chaque soir, une mise au propre était effectuée sur d'autres fonds identiques. La carte a ensuite été digitalisée sous SIG puis habillée et complétée par DAO (Adobe Illustrator). La carte vectorielle obtenue¹⁰ pourra ensuite être transformée au format raster pour être géoréférencée sous SIG.

¹⁰ La carte est disponible hors texte au format A1. Elle est glissée à la fin du rapport.

Troisième partie : présentation des résultats obtenus et réflexion sur la réalisation d'une carte 'expert'.

3.1. Description et interprétation des processus morphogénétiques.

Pendant les étapes de documentation et de terrain, différents processus ont été observés. Ils sont présentés ci-après, l'accent sera mis sur les '*mouvements de versants*'.

3.1.1. Les formations glaciaires et périglaciaires.

Les formations glaciaires sont représentées principalement par la couverture morainique discontinue, surtout présente en rive droite. Elle est très reconnaissable par la teinte beige claire des matériaux qui la compose, il est possible d'y observer des *stries*, caractéristiques d'une activité glaciaire. Totalement fossile, la couverture morainique peut être stable (pente faible, pas de bossellement) ou remaniée par des processus de versants, notamment la solifluxion. Outre la couverture morainique, un glacier rocheux fossile a été observé au lieu dit '*Les Issaps*'. Un lobe délimite son extension aval. C'est un organisme de transport constitué de matériaux de taille variable, ces matériaux proviennent des tabliers d'éboulis situés en amont et recouvraient jadis une lentille de glace résiduelle. L'absence de suintements suppose que le glacier repose sur d'anciens dépôts glaciaires très perméables. L'absence de glace interstitielle permet également de définir le caractère fossile du glacier (Delsigne, 1999).

Très développées dans le bassin-versant, les formations glaciaires constituent une grande surface d'infiltration. Elles sont le siège de circulations d'eau et alimentent de nombreuses sources (*Ravin des Aiguettes, Riou des Primas*) au contact avec les '*Terres Noires*'.



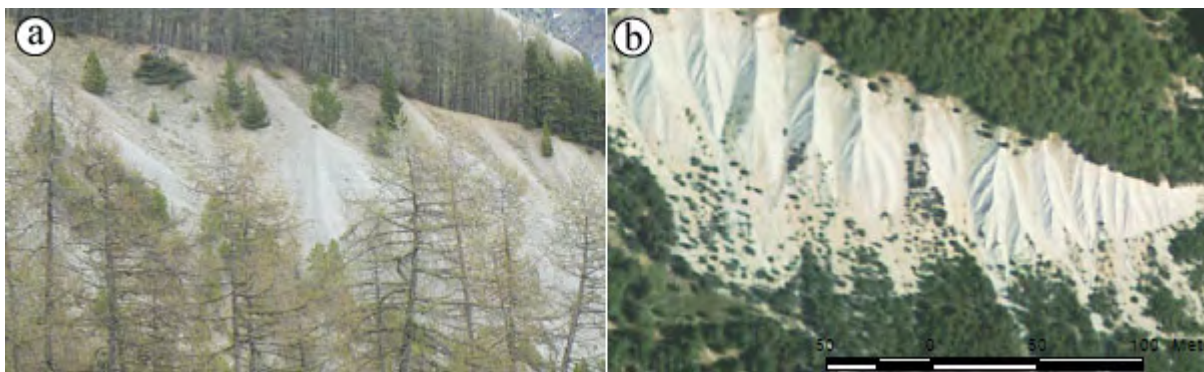
Fig.16. Orthophoto (IGN, 2004) du glacier pierreux au lieu dit 'Les Issaps'.

Deux grands types de **formations périglaciaires** sont distingués dans le bassin-versant : les **éboulis** (Fig.17) et les **colluvions**. Ces formations sont liées à l'action du gel, et notamment des processus de gel-dégel diurnes et annuels qui fragmentent les matériaux (gélifraction). L'intensité, la durée et la répétition des alternances gel-dégel influent directement sur la quantité de matériau produit. Les crêtes de flyschs (2300m à 2900m) voient se développer en contrebas des tabliers d'éboulis vifs (ces tabliers alimentent des sources à l'origine de certains torrents). À une altitude moins élevée (2000m) et plus localement, des cônes d'éboulis affectent des talus dans la couverture morainique : certains d'entre eux sont

fixés et colonisés par une végétation pionnière, l'action du gel y étant moins prononcée du fait de l'altitude moins élevée.

Selon le substrat affecté, deux types de colluvions sont distingués :

- (i) **Les colluvions morainiques**, qu'il est difficile de différencier de la couverture morainique *stricto sensu* car leurs granulométrie et texture sont identiques (Thiery, 2007). Ces colluvions se développent à proximité ou sur les versants en pente raide, proche des torrents (Riou de la Pare, Riou des Routas, etc.).
- (ii) **Les colluvions sur marne**, essentiellement composés de marne altérée, qui comblent les ravines. Ces formations, qui se développent surtout dans le paysage de 'badlands', sont très actives car entretenues par le ravinement (précipitations, fonte des neiges) et les fortes pentes.



a. Cônes d'éboulis au lieu dit 'La Cabane Neuve'. b. Orthophoto du secteur (IGN, 2004).

Fig.17. Illustration d'un processus périglaciaire : les éboulis.

3.1.2. Les formations fluviatiles et torrentielles.

Les formations lacustres, très minoritaires dans le bassin-versant, apparaissent seulement sous la forme de sagnes, au pied des principaux glissements rotationnels et à la faveur d'une contre-pente. Les **formations fluviatiles et torrentielles** sont plus largement représentées.

L'action fluviatile est à l'origine des 'badlands', elle affecte les marnes noires par ravinement. Le ravinement, ou ruissellement concentré, altère la surface des marnes et aboutit à la formation de ravines ou 'roubines'. Plusieurs secteurs de ravines apparaissent dans le *Riou-Bourdoux*, mais le secteur de la *Grande Combe* est le plus développé. Un important réseau de drainage s'est mis en place et se caractérise par une asymétrie puisque tous les ravinements se font en rive droite du chenal principal. Ce dernier a acquis un rang de niveau 3 (selon l'ordination de Strahler) et les écoulements amont, de niveau 1, sont très nombreux : c'est donc un véritable bassin-versant qui s'est développé au fur et à mesure de l'érosion régressive des marnes. Les berges culminent à 300m (Delsigne, 1999) et les pentes, qui relient les interfluves et les talwegs, sont très raides (plus de 50%). Cette disposition topographique s'observe facilement sur la carte des pentes (Fig.8b).

L'action torrentielle participe également à l'érosion des marnes par incision (Fig.5f). Les formations torrentielles se développent principalement sur le cône de déjection principal où la distinction entre les dépôts anciens, hérités de l'activité passée et plus intense du *Riou-Bourdoux*, et les dépôts récents, situés dans le lit principal, a été effectuée sur la base d'un étagement des formes. En effet, d'un point de vue textural et granulométrique, les dépôts holocènes, historiques et actuels sont grossièrement les mêmes (Thiery, 2007). Des dépôts torrentiels récents peuvent être observés le long du chenal d'écoulement, depuis 'le gouffre'

jusqu'à l'apex : ils sont considérés comme actifs. Le cône du *Ravin de l'Eglise* est considéré comme 'dormant' car le torrent a été dévié par le RTM vers le *Ravin des Aiguettes* et le cône est aujourd'hui entièrement colonisé par la végétation.

La datation relative des dépôts torrentiels dans le chenal principal est rendue difficile en raison de son côté 'artificiel' dû aux travaux de correction du RTM qui ont remodelé la morphologie du lit (terrasses, etc.). De même, les dépôts issus des laves et des crues torrentielles n'ont pas été distingués. La morphologie d'un lit torrentiel est détaillée dans Remaître (2006).



a. Incision du Riou-Bourdoux dans ses propres dépôts. b. Le volume des blocs qui constituent l'atterrissement témoigne de la puissance des crues et surtout des laves torrentielles.

Fig.18. Illustration du chenal principal du Riou-Bourdoux.

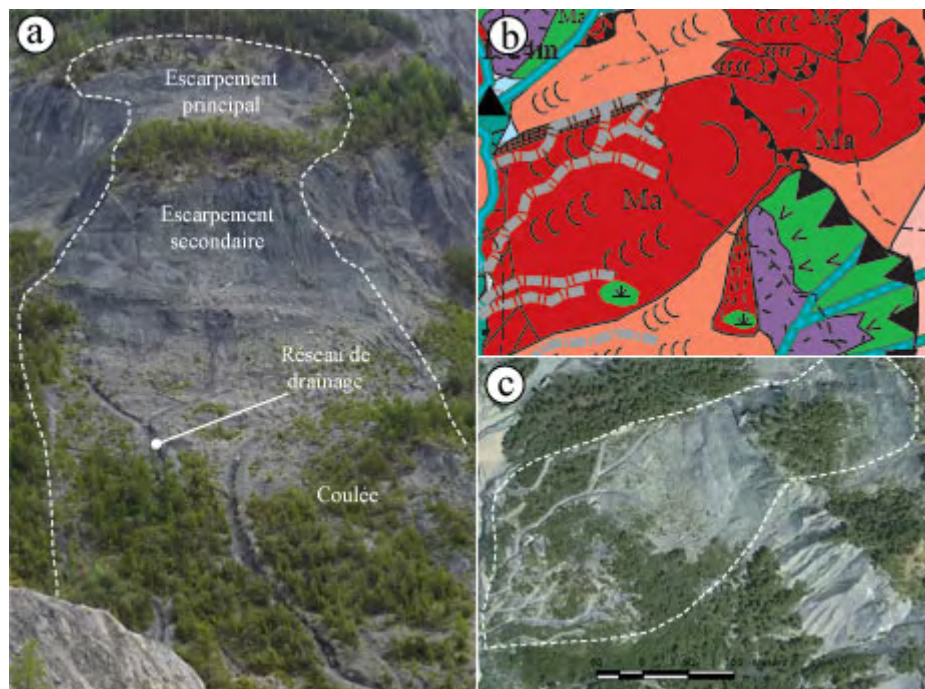
3.1.3. Les mouvements de versants.

Tout comme le bassin de *Barcelonnette*, le *Riou-Bourdoux* concentre tous les facteurs propices à une instabilité généralisée (cf. partie 1.2.2). Un certain nombre de 'mouvements de versants', de typologie et d'activité variées, ont donc été observés. L'observation sur le terrain a été facilitée et guidée par le recensement des 'mouvements de versants' effectué par Thierry sur les torrents voisins du *Riou-Bourdoux* (*Faucon, Bourget, Sanières*). À partir de ce recensement, une typologie des phénomènes observés a été dressée. En raison de la proximité des sites d'étude et de leurs conditions environnementales similaires (lithologie, climat, etc.), cette typologie a pu être reprise et légèrement adaptée pour le *Riou-Bourdoux*.

a. Les glissements-coulées.

Ce type de glissement associe en amont un glissement, banc sur banc ou rotationnel, et en aval une coulée. **L'évolution en coulée des panneaux glissés est favorisée par le comportement rhéologique des marnes noires** (Malet, 2003). Aussi, la majorité des glissements-coulées observés se déclenchent dans les secteurs de 'badlands' : c'est le cas des glissements du secteur de *Pra Bellon, des Fraissinets et de Guérin*. D'autres phénomènes ont été observés en amont des *Fraissinets* en rive gauche du *Riou-Chamous* mais ils se déclenchent dans les flyschs des nappes de charriage. La composante banc sur banc se caractérise par une zone d'accumulation en amas de blocs hétérogènes plus ou moins désagrégés (Thierry, 2007). Se développant sur des discontinuités lithologiques ou des diaclases, elle est peu représentée sur l'ensemble des glissements-coulées au profit de la composante rotationnelle. La morphologie de la coulée est très reconnaissable : elle présente une **topographie chaotique, un bourrelet frontal** et éventuellement des bourrelets latéraux. Dans tous les cas observés, **la coulée est le siège d'infiltrations et de circulations d'eau qui entretiennent son activité**. Cette eau provient très souvent d'une ligne de source, apparue

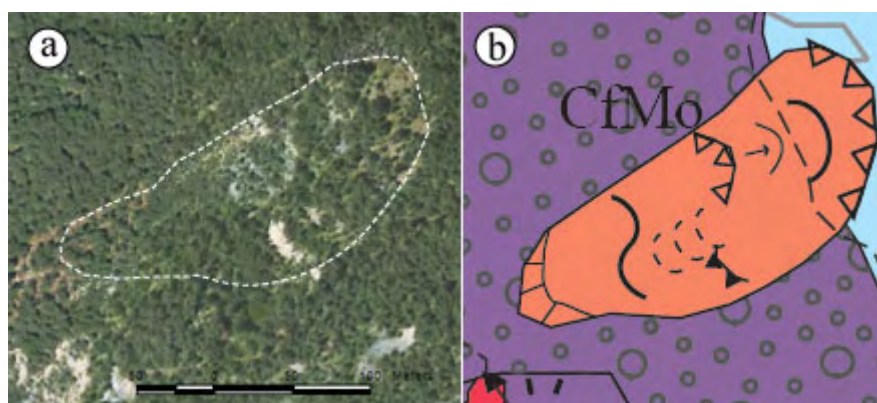
suite à un contraste de perméabilité, qui a déclenché le glissement initial. Mais elle peut provenir également d'épisodes pluvieux et de la fonte des neiges. La coulée se prolonge, en aval, par un ruissellement très chargé en matières en suspension (marnes) qui sont déposées plus loin. L'apport constant d'eau entretient l'activité du glissement-coulée. C'est ce type de glissement qui, en 1970, a engendré un risque d'obstruction du *Riou-Bourdoux* (Delsigne, 1999 ; Delsigne *et al.*, 2001). Cet événement est à l'origine de la construction du barrage à quatre marches dès 1971 afin de caler le pied de la coulée qui, par ailleurs, a été drainée par des fossés anthropiques creusés à la pelle mécanique.



a. Caractéristiques principales du glissement en 2009. b. Extrait de la carte morphodynamique. c. Orthophoto du secteur (IGN, 2004) où apparaît l'important réseau de drainage qui évacue l'eau de la coulée.

Fig.19. Illustration d'un glissement-coulée à composante rotationnelle.

b. Les glissements translationnels complexes.



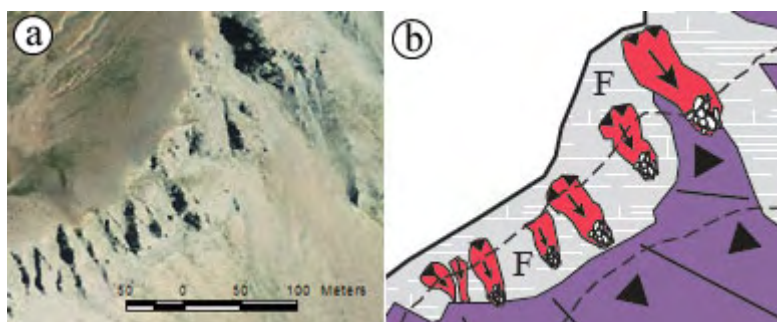
a. Orthophoto (IGN, 2004) d'un glissement translationnel complexe. b. Extrait de la carte morphodynamique.

Fig.20. Illustration d'un glissement translationnel complexe.

Selon Thiery (2007) c'est le type de mouvement le plus répandu dans le bassin de *Barcelonnette*. Sur le *Riou-Bourdoux*, seulement deux phénomènes ont été identifiés comme tel. Ce type de glissement peut être superficiel ou profond et se déclenche dans la couverture morainique. Il se caractérise par une double composante : la composante verticale est représentée par un ou plusieurs glissements rotationnels en amont ; la composante horizontale est représentée par un glissement translationnel en aval. Les deux mouvements identifiés sur le *Riou-Bourdoux* affectent les dépôts morainiques qui semblent être recouverts par des colluvions mis en mouvement du fait des pentes fortes sur lesquels évoluent ces deux glissements.

c. Les écroulements.

Les écroulements se développent presque exclusivement dans les flyschs à *Helminthoïdes* très fracturés par l'intensité des alternances gel-dégel à cette altitude (près de 3000m). Il n'a pas été possible d'en observer sur le terrain en raison de la couverture neigeuse qui persistait encore à la fin du mois de mai. Leur localisation est le résultat d'interprétations de photos aériennes (stéréoscopie) et d'orthophotos effectuées avant et après la mission de terrain. Ils sont considérés comme actifs intermittents, leur activité semble être dictée par le rythme saisonnier des cycles gel/dégel et de la fonte annuelle des neiges. La zone d'ablation est presque verticale. En contrebas, la zone d'accumulation présente un chaos de blocs reposant sur les tabliers d'éboulis.

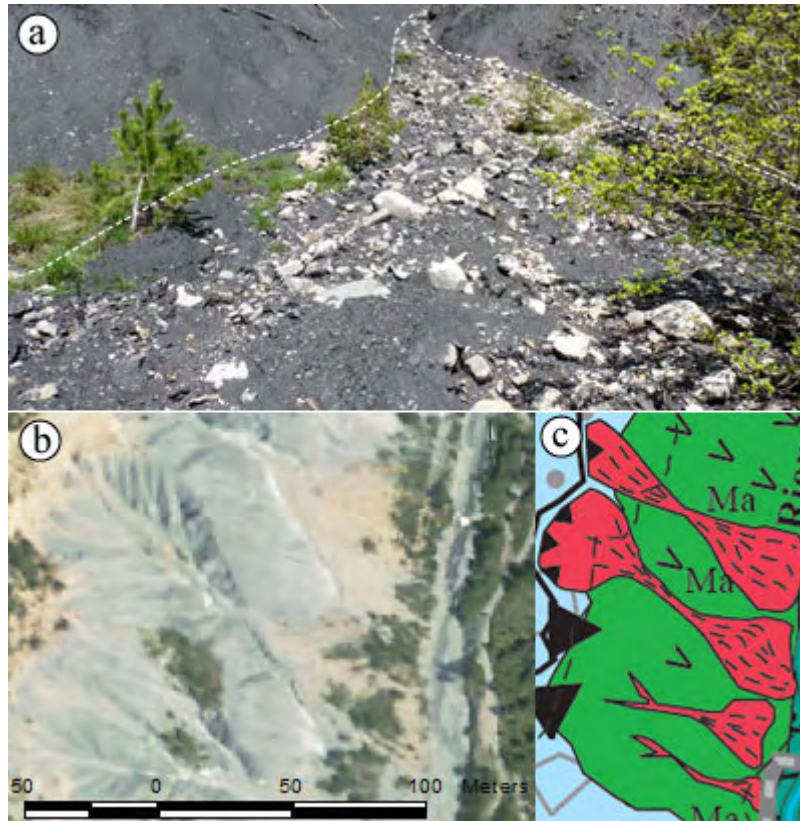


a. Orthophoto(IGN, 2004) des écroulements dont la masse éboulée alimente les éboulis en contrebas. b. Extrait de la carte morphodynamique.

Fig.21. Illustration du phénomène d'écroulement.

d. Les coulées de débris.

Surtout présentes en rive droite du chenal principal du *Riou-Bourdoux*, les coulées de débris se développent à l'interface moraines/roche saine et dans un secteur de 'badlands'. Leur déclenchement est certainement dû à l'érosion régressive des marnes par ravinement qui, localement, perdent de leur cohésion et mettent en déséquilibre la couverture morainique sus-jacente (Malet *et al.*, 2002). Les coulées de débris font partie des **glissements de type écoulement** au même titre que les glissements-coulées et les laves torrentielles : le fonctionnement de ce type de glissement est détaillé dans Malet *et al.* (2002), Malet (2003) et Remaître (2006). Les coulées de débris sont des écoulements superficiels et rapides (Malet *et al.*, 2002) qui ne sont pas chenalisés, à l'inverse des laves torrentielles qui évoluent dans le lit d'un torrent. Cependant la morphologie des 'badlands', caractérisée par une succession d'interfluves et de talwegs, permet de guider l'écoulement.



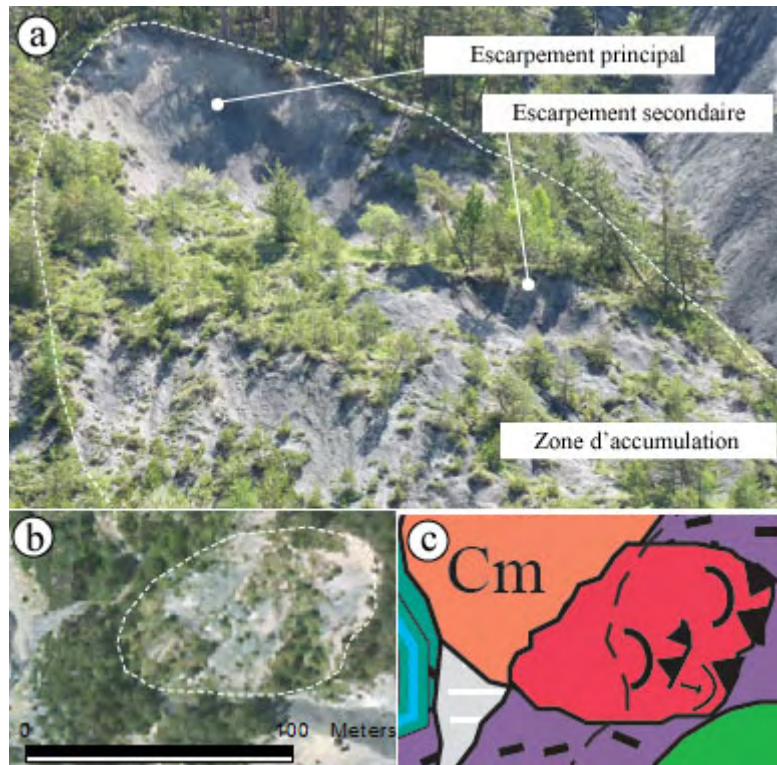
a. Dépôts, essentiellement marneux, de coulée de débris en rive droite du Riou-Bourdoux. b. Orthophoto du secteur (IGN, 2004). c. Extrait de la carte morphodynamique.

Fig.22. Illustration d'une coulée de débris.

e. Les glissements rotationnels.

Les mouvements rotationnels sont largement représentés dans le *Riou-Bourdoux*. Caractérisés par une surface de glissement plus ou moins circulaire et un escarpement à la forme semi-circulaire, ils sont parfois accompagnés d'une contre-pente propice au développement d'une sagne. Dans la plupart des cas, les glissements sont superficiels (de 2 à 6m d'épaisseur) et se déclenchent dans les moraines ou au contact moraines/roche saine.

Le glissement rotationnel peut être 'de berge' ou 'd'interfluve' : sur la carte la distinction entre les deux types n'est pas illustrée car, en raison de la petite taille des phénomènes, il est difficile de les représenter par des signes distinctifs à l'échelle du 1/10000^{ème} (Thiery, 2007). Les glissements rotationnels de berge se situent le long des berges des torrents et ils sont entretenus par sapement de berge et suppression de butée. Tous les phénomènes 'de berge' observés ne possédaient pas de zone d'accumulation, celle-ci étant continuellement emportée par le torrent. Les phénomènes 'd'interfluve' sont relativement simples : ils présentent un escarpement à l'aspect circulaire, une zone de replat avec ou sans contre-pente. Ils se déclenchent dans une couverture morainique plutôt épaisse. La zone d'accumulation forme une topographie bosselée accompagnée de fissures quand le mouvement est actif.



a. Glissement rotationnel en rive gauche du Riou-Bourdoux. b. Orthophoto du secteur (IGN, 2004). c. Extrait de la carte morphodynamique.

Fig.23. Illustration d'un glissement rotationnel.

f. Les glissements translationnels 'superficiels'.

Ces glissements sont dit '*superficiels*' (< 2m) pour les distinguer des glissements translationnels complexes décrits précédemment. **Contrairement aux rotationnels, les translationnels se caractérisent par une surface de glissement plane.** La plupart des mouvements observés se déclenchent dans des dépôts morainiques peu épais ou dans des colluvions. Leur déclenchement peut être favorisé par une discontinuité entre les formations superficielles et la roche saine (Thiery, 2007). C'est notamment le cas des glissements translationnels du *Ravin de l'Eglise* et du *Ravin des Aiguettes*. La zone d'accumulation se caractérise par des débris hétérogènes apparemment non triés. Tout comme les rotationnels, il est possible de distinguer les phénomènes '*de berge*' et '*d'interfluve*'.



Fig.24. Exemple de glissement translationnel.

g. La solifluxion.

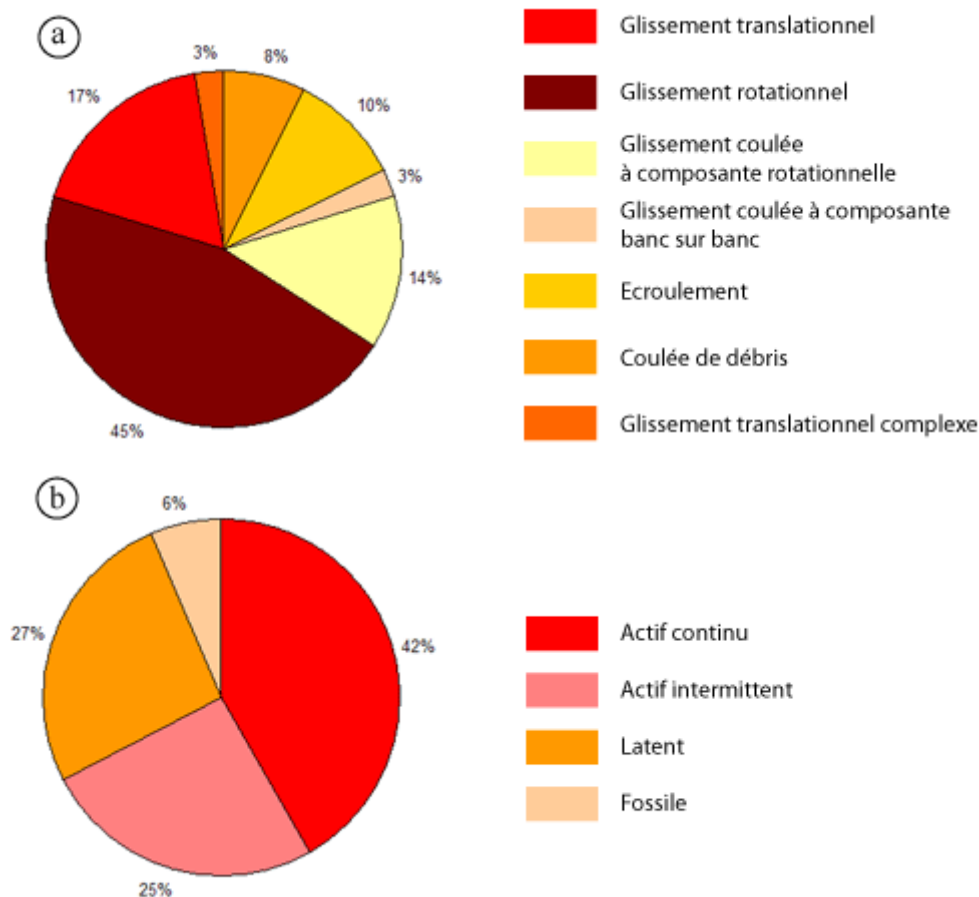
La solifluxion est un phénomène d'instabilité superficiel. Elle s'observe dès 2000m environ sur une végétation de type '*pelouse alpine*' et sur des pentes faibles. Elle correspond au fluage de la tranche superficielle du sol qui s'est imbibé d'eau suite à la fonte des neiges et qui avait préalablement été déstructuré par les processus de gel/dégel. La solifluxion donne au versant un modelé arrondi et bosselé. Contrairement aux autres '*mouvements de versants*', elle es simplement représentée par un figuré 'S' sur la couverture morainique et non par un aplat de couleur.

3.1.4. Synthèse statistique

Cette synthèse présente succinctement les statistiques sur les deux informations principales que la carte morphodynamique a apporté par rapport aux documents existants sur l'aléa dans le bassin-versant du *Riou-Bourdoux*. Ces informations sont : une **typologie** précise des '*mouvements de versants*' et une classification selon le **degré d'activité**.

Les '*mouvements de versants*' qui ont pu être identifiés affectent le *Riou-Bourdoux* sur une surface totale de 111060m². Sur les 79 mouvements observés, la majorité (45%) sont de type rotationnel (rotationnel simple, de berge et d'interfluve), ce qui est représentatif des observations effectuées par Thiery sur d'autres bassins-versants voisins. Les mouvements translationnels sont, quant à eux, peu représentés (17%) alors que sur les sites étudiés par Thiery ils sont aussi présents que les mouvements rotationnels. La particularité du *Riou-Bourdoux*, si nous le comparons à ses torrents voisins, c'est le nombre important de glissement-coulée, à composante rotationnelle ou banc sur banc, qui s'y développent. Ils représentent 17% des '*mouvements de versants*' observés. Cela s'explique par le fait que ces mouvements se déclenchent surtout dans les marnes noires, formation qui affleure sur de grandes surfaces dans le *Riou-Bourdoux*. La figure 25a illustre la répartition très inégale des types de '*mouvements de versants*'.

La figure 25b indique que 67% des phénomènes observés sont actifs, intermittents ou continus. C'est beaucoup moins que les 81% observés par Thiery sur les torrents de *Faucon*, des *Sanières* et du *Bourget* réunis. La majorité des phénomènes actifs sont localisés près des torrents (*Riou-Chamous*, *Ravin des Aiguettes*, etc.) ou sur des circulations d'eau (lignes de sources, infiltrations, etc.) qui entretiennent un état de déséquilibre constant. Presque tous les mouvements actifs affectent des pentes moyennes supérieures à 25%.



a. Distribution par type des 'mouvements de versants'. b. Distribution par degré d'activité des 'mouvements de versants'.

Fig.25. Caractéristiques principales des 'mouvements de versants' du Riou-Bourdoux.

3.2. Vers une carte 'expert' (qualitative) des 'mouvements de versants'.

La cartographie morphodynamique est une première étape, d'inventaire, pour évaluer l'aléa 'mouvements de versants'. Les principales informations qu'elle apporte (typologie et degré d'activité) peuvent être croisées avec un certain nombre de données (topographie, occupation du sol, etc.) afin de produire une carte 'expert' basée sur des classes de susceptibilité : ce document est utilisé dans le cadre de la procédure PPR en France.

La méthode adoptée consiste à déterminer quatre niveaux de susceptibilité (nul, faible, moyen, fort), auxquels correspondent un certain nombre de règles, puis à les digitaliser sous SIG (Malet *et al.*, 2006). Les polygones obtenus rassemblent des caractéristiques environnementales proches et constituent une 'facette' (Thiery, 2007). À chaque 'facette' est associée plusieurs informations, notamment : **le degré d'activité des mouvements, la pente, l'occupation du sol et sa dégradation**. Chaque polygone digitalisé dans une classe de susceptibilité présente donc des caractéristiques précises. L'annexe 7 présente les différentes règles adoptées pour chaque classe.

La carte de susceptibilité du Riou-Bourdoux a été réalisée selon cette méthode. Les informations utilisées sont, (i) la répartition des mouvements actifs (intermittents et continus) à partir de la carte morphodynamique, (ii) une carte des pentes dérivée d'un MNT¹¹, (iii) la base de donnée *ALARM* sur l'occupation du sol, (iv) une carte simplifiée de la géologie. Le résultat cartographique obtenu est présenté par la figure 26.

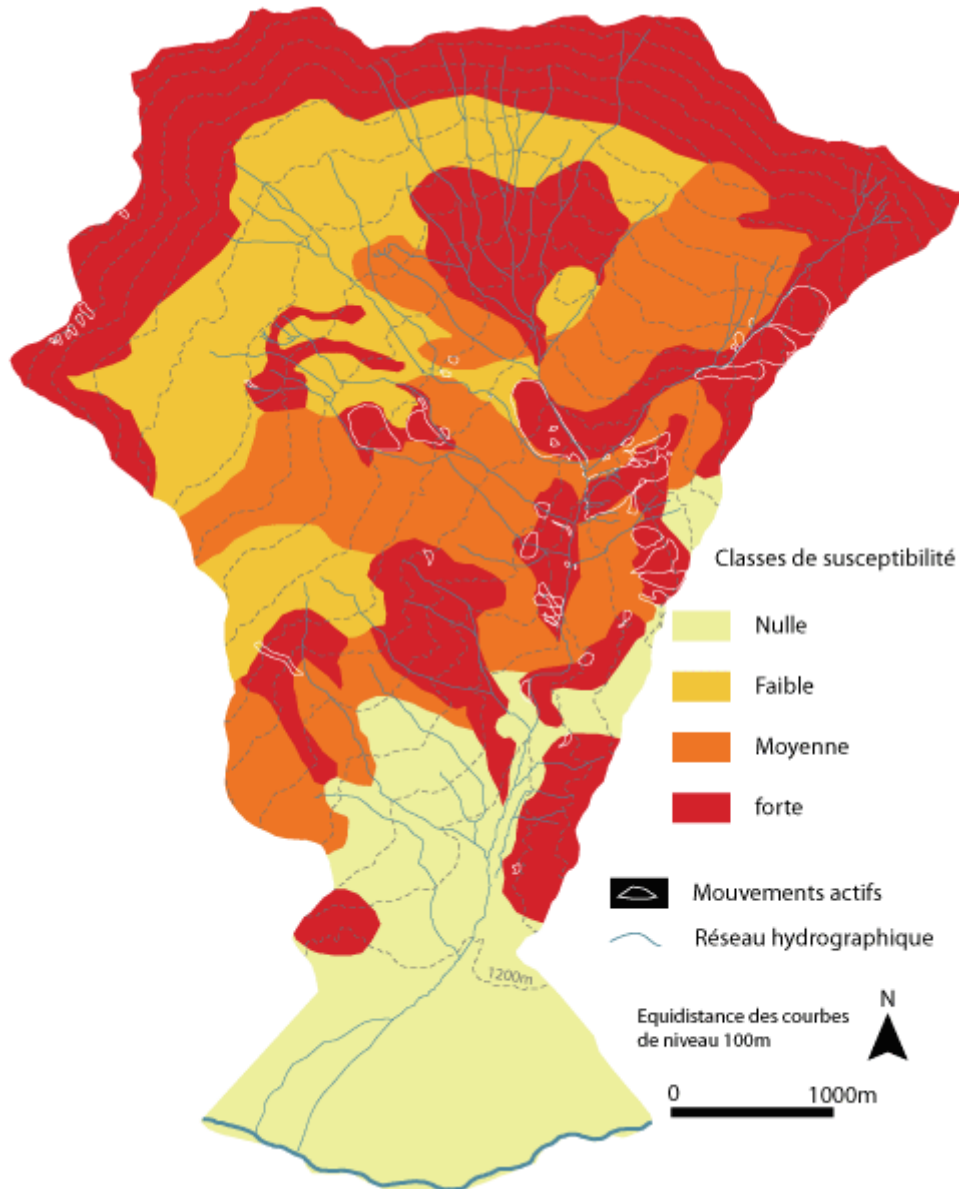


Fig.26. Carte de susceptibilité aux 'mouvements de versants' (Riou-Bourdoux).

¹¹ MNT : *Modèle numérique de terrain.*

Conclusion

Au cours de ce stage, 79 '*mouvements de versants*' ont pu être observés dans le bassin du *Riou-bourdoux*. Ils ont été cartographiés selon la méthode '*morphodynamique*' élaborée par Thiery au cours de sa thèse. **Cette cartographie au 1/10000^{ème} permet d'avoir un outil de base pour l'évaluation de l'aléa dans le cadre de la procédure PPR : la carte morphodynamique est, à ce titre, considérée comme une forme élémentaire de carte d'aléa.** Ce stage a permis de compléter l'inventaire '*mouvements de versants*' initié par Thiery sur les bassins-versants des torrents *d'Abriès, de Faucon, du Bourget et des Sanières*, principaux organismes torrentiels de la vallée de *l'Ubaye* avec le *Riou-Bourdoux*.

Outre son intégration dans l'aspect '*juridique*' de la gestion du risque gravitaire, la cartographie morphodynamique a permis d'obtenir des informations relativement précises sur **la typologie des mouvements et leur degré d'activité**. Ces deux principales informations permettant d'évaluer l'aléa étaient mal identifiées sur les documents cartographiques déjà existants. Documents qui, de plus, avaient été réalisés selon des méthodes et à des échelles différentes. **La carte morphodynamique constitue donc une base 'saine' pour développer une évaluation de l'aléa à l'échelle du bassin-versant.**

Sur le *Riou-Bourdoux*, cette cartographie d'inventaire a mis en avant **la prépondérance des mouvements de type 'glissement rotationnel'**. Ces glissements se déclenchent souvent au contact moraine/roche saine à la faveur d'un contraste de perméabilité. Cette observation permet de faire ressortir une disposition aux '*mouvements de versants*' caractéristique du bassin de *Barcelonnette* : la surface importante occupée par la couverture morainique perméable sur les '*Terres Noires*'. Les glissements translationnels, moins représentés dans le *Riou-Bourdoux*, peuvent toutefois se déclencher dans la même situation.

La plupart des mouvements actifs (intermittents ou continus) observés sont localisés à proximité des torrents. Ce constat souligne le rôle de la torrentialité dans le déclenchement et l'évolution des '*mouvements de versants*' par les processus de **sapement de berge et de suppression de butée**. Par ailleurs, l'incision torrentielle et le ravinement dans les marnes noires engendrent, par érosion régressive, la formation de pentes très raides qui constituent un facteur de prédisposition déterminant pour définir la susceptibilité d'un site aux '*mouvements de versants*'.

La cartographie morphodynamique s'est inscrite dans une **approche qualitative** de l'évaluation de l'aléa. Rapide à mettre en œuvre et ne nécessitant pas de moyens et d'appareillage '*démesurés*', elle repose sur l'analyse de différents documents existants et sur les observations de terrain pour réaliser la carte. Cependant, son inconvénient réside dans son **aspect 'subjectif' de l'évaluation de l'aléa**. L'estimation et l'interprétation des phénomènes dépendent de l'opinion de la personne qui effectue les levés de terrain. Ainsi, même avec une méthodologie commune (légende morphodynamique, etc.) le résultat cartographique peut être différent selon l'observateur. Par exemple, si Thiery a indiqué les cônes de déjection dans le domaine fluvial, celui du *Riou-Bourdoux* est indiqué dans le domaine torrentiel.

L'aspect '*subjectif*' de la méthode se fait ressentir également lorsqu'il faut définir le type de mouvement et son activité. Les travaux scientifiques concernant ces deux concepts aboutissent à des critères de classification parfois différents obligeant à faire un compromis entre les approches jugées les plus pertinentes pour notre travail. C'est pourquoi un certain nombre d'indicateurs qualitatifs relevés sur le terrain (attributs qualitatifs de la base de données) peuvent permettre de s'affranchir des différentes approches scientifiques en privilégiant la pertinence des observations de terrain pour définir le type et l'activité d'un phénomène.

De même, l'observation des mouvements de versants par photo-interprétation connaît des limites dont l'étape de terrain permet de s'affranchir quand le site est accessible, ce qui n'est pas toujours le cas. Par exemple, ce qui pourrait ressembler à des fissures de régression en amont d'un escarpement sur la photographie aérienne sont en fait de petits chemins formés par les troupeaux d'alpage qui suivent les 'courbes de niveau' pour se déplacer.

Malgré ces quelques limites, cette méthode reste très pratique par sa mise en place qui **permet de cartographier des secteurs importants avec peu de moyens et pour des résultats assez fiables**. La carte morphodynamique qui en découle est d'ailleurs utilisée dans l'élaboration d'une **carte de susceptibilité aux '*mouvements de versants*'** en la croisant avec d'autres informations déterminantes (topographie, occupation du sol, etc.). **Le document obtenu est directement utilisable dans le cadre de la réglementation PPR.**

Table des figures

<i>Fig.1. Synthèse et caractéristiques des documents cartographiques sur l'aléa et le risque gravitaire pour le Riou-Bourdoux.</i>	4
<i>Fig. 2. Extraits des différents documents cartographiques illustrant le glissement des Aiguettes.</i>	5
<i>Fig.3. Exemple de cartographie morphodynamique. Glissement des Aiguettes.</i>	6
<i>Fig.4. Carte géomorphologique simplifiée du bassin de Barcelonnette (modifié de Remaître, 2006).</i>	8
<i>Fig.5. Caractéristiques principales des marnes noires illustrées par le Riou-Bourdoux.</i>	9
<i>Fig.6. Profil en long du Riou-Bourdoux.</i>	11
<i>Fig.7. Prises de vue sur l'état du bassin-versant au début dans les années 1900-1910.</i>	12
<i>Fig.8. Caractéristiques principales du Riou-Bourdoux.</i>	14
<i>Fig.9. Systèmes de légende à l'origine de la carte morphodynamique (Thiery, 2007).</i>	16
<i>Fig.10. Exemple de base de données pour un phénomène identifié.</i>	18
<i>Fig.11. Indicateurs de l'activité : la morphologie.</i>	20
<i>Fig.12. Indicateurs de l'activité : la végétation.</i>	20
<i>Fig.13. Sapement de berge par le Riou-Bourdoux en aval du 'gouffre'.</i>	21
<i>Fig.14. Processus morphogénétiques retenus pour le Riou-Bourdoux (adapté de Thiery, 2007).</i>	22
<i>Fig.15. Légende adoptée pour les degrés d'activité des 'mouvements de versants' (Thiery, 2007).</i>	23
<i>Fig.16. Orthophoto (IGN, 2004) du glacier pierreux au lieu dit 'Les Issaps'.</i>	24
<i>Fig.17. Illustration d'un processus périglaciaire : les éboulis.</i>	25
<i>Fig.18. Illustration du chenal principal du Riou-Bourdoux.</i>	26
<i>Fig.19. Illustration d'un glissement-coulée à composante rotationnelle.</i>	27
<i>Fig.20. Illustration d'un glissement translationnel complexe.</i>	27
<i>Fig.21. Illustration du phénomène d'écroulement.</i>	28
<i>Fig.22. Illustration d'une coulée de débris.</i>	29
<i>Fig.23. Illustration d'un glissement rotationnel.</i>	30
<i>Fig.24. Exemple de glissement translationnel.</i>	30
<i>Fig.25. Caractéristiques principales des 'mouvements de versants' du Riou-Bourdoux.</i>	32
<i>Fig.26. Carte de susceptibilité aux 'mouvements de versants' (Riou-Bourdoux).</i>	33

Bibliographie

- Cruden D.M., Varnes D.J. 1996. *Landslide types and processes*. In Turner, A.K., Shuster, R.L., (Eds), *Landslides : Investigation and mitigation*. Transportation Research Board, Special Report 247, 36-75.
- Delsigne, F. 1999. *Eléments de morphodynamique torrentielle et cartographie des instabilités de surface dans le bassin versant du Riou Bourdoux*. Mémoire de DEA Géographie, Université des Sciences et Technologies de Lille, 126 p.
- Delsigne, F., Lahousse, P., Flez, C., Guiter, G. 2001. *Le Riou Bourdoux : un "monstre" alpin sous haute surveillance*. Revue forestière française, LIII: 527-540.
- Dikau R., Brunsden D., Schrott L., Ibsen M.-L., 1996 (edited by). *Landslide recognition. Identification, movement and causes*. Wiley, 251 p.
- Etienne, D. 2007. *Evaluation quantitative et cartographie du risque 'glissement de terrain'. Application au Bassin de Barcelonnette*. Mémoire de Master 2 Risques Naturels, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 58 p.
- Flageollet, J.-C., Maquaire, O., Martin, B., Weber, D. 1999. *Landslides and climatic conditions in the Barcelonnette and Vars basins (Southern French Alps, France)*. *Geomorphology*, 30: 65-78.
- Flageollet, J-C. 1989. *Les Mouvements de Terrain et leur Prévention*. Masson, Paris, 224p.
- Gueremy, P., Marre, A., 1996. *Une nouvelle méthode de cartographie géomorphologique applicable aux aléas naturels*. Travaux de l'Institut Géographique de Reims, 94-96, 5-45.
- Joly, F. 1997. *Glossaire de Géomorphologie, Base de données sémiologiques pour la cartographie*. Armand Colin, Paris, p 91-168.
- Lefevre, C et Schneider, J.L 2002 *Les risques naturels majeurs*. Collection Géosciences, éditions scientifiques GB, Paris, 306p.
- Légier, A. 1977. *Mouvement de terrain et évolution récente du relief dans la région de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence)*. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 163 p.
- 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.
- Malet, J.-P., Thiery, Y., Maquaire, O., Puissant, A. 2006. Landslide susceptibility, vulnerability and risk assessment through GIS procedures: a tentative application in the South French Alps. *Revue Internationale de Géomatique, European Journal of GIS and Spatial Analysis*, 16(3-4): 499-525.

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 I, 363 p.

Maquaire, O. 2002. *Aléas géomorphologiques (mouvements de terrain) - processus, fonctionnement, cartographie*. Diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 223 p.

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, 487 p.

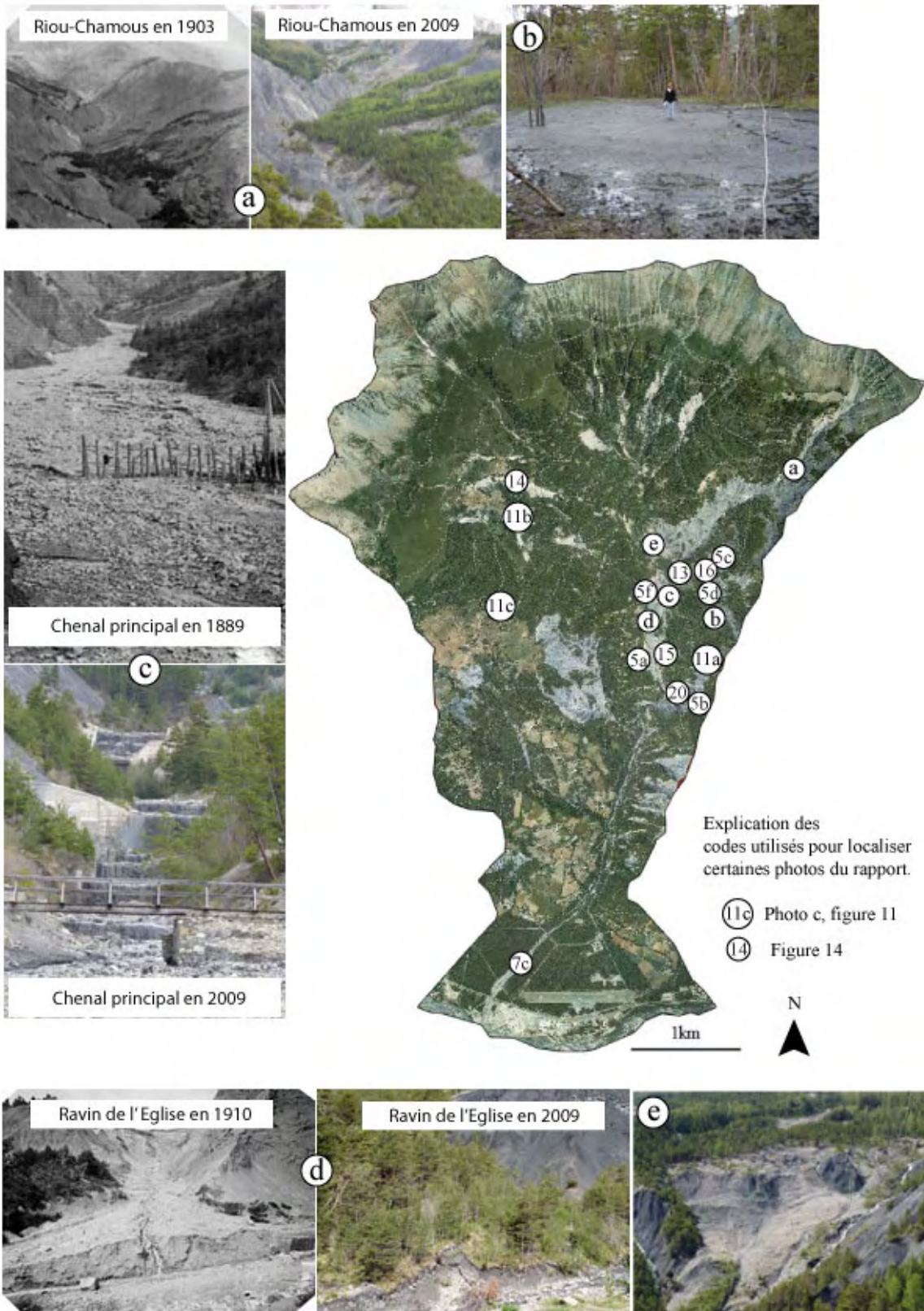
Stein, D. 2001. *Glissements de terrains et enjeux dans la vallée de l'Ubaye et le pays de Seyne*. Rapport RTM, juin 2001, 218 p.

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, 445 p.

Veyret, Y. 2004 *Géographie des risques naturels en France : De l'aléa à la gestion*. Collection Initial, édition Hatier, Paris, 251p.

Annexes

Annexe 1 : Carte de photographies.



Annexe 2 : Tableau comparatif des différentes approches pour évaluer l'aléa gravitaire.

En blanc : évaluation de la susceptibilité ; en grisé : évaluation de l'aléa. SIG : Utilité du SIG ; H : haute ; I : intermédiaire ; R : restreinte. Echelle de travail : R : régionale ; M : moyenne ; L : large ; Lo : locale. Op : optimale ; Na : non adaptée ; Rec : développement de procédures spécifiques pour la recherche. Nota : les n° reprennent ceux des différents paragraphes.

Approches		Avantages	Inconvénients	SIG	Echelle				
					R	M	L	Lo	
1.2. QUALITATIVE	1.2.1. Carte d'inventaire	Information sur la localisation des phénomènes. Base pour toutes les autres approches.	Aucune évaluation de la susceptibilité et de l'aléa.	R	R	Op	Op	Op	
	1.2.2. Analyse géomorphologique	Evaluation rapide tenant compte d'un grand nombre de facteurs.	Méthodologie subjective utilisant des règles implicites qui empêchent une analyse critique des résultats. Méthode peu transposable sur d'autres sites.	I	Na	R	Op	Op	
	1.2.3. Combinaison de cartes d'index	Diminue le problème des règles subjectives Totale automatisation des étapes. Standardisation de la gestion des données.	Subjectivité dans l'attribution des poids des valeurs des classes de chaque facteur. Méthode peu transposable sur d'autres sites.	I	R	R	Op	Op	
1.3. SEMI-QUANTITATIVE	1.2.4 Logiques floues	Diminue le problème des règles subjectives. Permet une transposition dans des environnements similaires	Subjectivité dans l'attribution des pondérations des classes de chaque facteur. Recherche des règles combinatoires longues à mettre en œuvre	H	Op	Op	Rec	R	
1.4. QUANTITATIVE/PROBABILISTE	1.4.1. BIVARIEE	1.4.1.1. 'Méthode de susceptibilité'	Simplicité de mise en place, rapidité des calculs. Permet l'introduction de l'opinion 'expert' pour améliorer les résultats. Possibilité d'automatiser la procédure.	Collecte systématique de certaines données. Evaluation de la dépendance conditionnelle des données d'entrée.	H	Op	Op	R	R
		1.4.1.2. Méthode par pondération de l'information	Simplicité de mise en place, rapidité des calculs. Permet l'introduction de l'opinion 'expert' pour améliorer les résultats. Possibilité d'automatiser la procédure.	Collecte systématique de certaines données. Evaluation de la dépendance conditionnelle des données d'entrée.	H	Op	Op	R	R
		1.4.1.3. Méthodes Bayésiennes	Technique la plus souple et modulable pour la modélisation. Permet l'introduction de l'opinion 'expert' pour améliorer les résultats. Possibilité d'automatiser la procédure.	Collecte systématique de certaines données. Evaluation de la dépendance conditionnelle des données d'entrée. Procédure à adapter pour l'échelle large.	H	Op	Op	Rec	R
	1.4.2. MULTIVARIEE	1.4.2.1. Analyse discriminante	Résultats très fiables si les facteurs les plus influents sont caractérisés avant le calcul. Généralisation aisée à un site large si les unités homogènes sont bien définies avant le calcul.	Collecte systématique de certaines données. Nécessite un large jeu de données Nécessite de caractériser les facteurs les plus influents avant le calcul Calcul par cellules déconseillé. Nécessite un traitement par logiciel externe au SIG.	H	Op	Op	R	R
		1.4.2.2. Régressions multiples	Résultats très fiables si les facteurs les plus influents sont caractérisés avant le calcul. Généralisation aisée à un site large si les unités homogènes sont bien définies avant le calcul.	Collecte systématique de certaines données. Nécessite un large jeu de données Calcul par cellules déconseillé. Généralisation des facteurs trop grande si unités homogènes par polygones (slope-units) utilisées. Résultats peu acceptables si le site est complexe. Nécessite un traitement par logiciel externe au SIG.	H	Op	Op	R	R
		1.4.2.3 Régressions logistiques	Possibilité de calcul cellules par cellules. Pas d'analyse préalable sur les facteurs. Modules développés sous SIG existants.	Nécessite un large jeu de données Adaptation d'une stratégie spécifique si le terrain est complexe. Les distributions des probabilités sont difficiles à analyser pour de faible niveau d'aléa.	H	Op	Op	Rec	R

Approches		Avantages	Inconvénients	SIG	Echelles			
					R	M	L	Lo
1.5. HYBRIDE	1.5.1. <i>Système de décision multicritères</i>	Diminue le problème des règles subjectives (<i>hidden rules</i>). Rapidité de mise en place. Standardisation de la gestion des données.	Subjectivité dans l'attribution des poids des valeurs des classes de chaque facteur. Méthode peu transposable sur d'autres sites actuellement.	H	R	Op	Rec	R
	1.5.2. <i>Intelligence artificielle (Réseaux de neurones artificiels)</i>	Méthode objective. Ne demande aucune connaissance théorique sur les processus physiques. Peut-être couplé avec d'autres approches.	Approche encore expérimentale. Peut nécessiter un calage long. Demande une vérification systématique de tous les facteurs les plus influents.	H	R	Rec	Rec	Rec
1.6. TEMPORELLE	1.6.1. <i>Analyse de fréquence des précipitations</i>	Information rapide à obtenir. Donne un aperçu de l'influence des précipitations.	Nécessite un inventaire précis des phénomènes.	R	Op	R	Na	Na
	1.6.2. <i>Analyse de fréquence des précipitations couplées aux approches statistiques</i>	Information rapide à obtenir après calcul de la susceptibilité. Donne un aperçu de l'influence des précipitations.	Nécessite un inventaire précis des phénomènes. Les processus physiques ne sont pas pris en compte.	H	Na	R	Rec	R
	1.6.3. <i>Approche par analyse en retour des phénomènes</i>	Permet d'élaborer des scénarii à court et moyen terme.	Nécessite un inventaire historique précis des phénomènes. Les processus physiques ne sont pas pris en compte. Beaucoup d'incertitude entre les périodes de retour et la réalité.	H	Na	Rec	Na	Na
1.7. DETERMINISTE	1.7.1. <i>Approche géotechnique</i>	Méthodologie objective et quantitative. Demande des investigations et des mesures détaillées des paramètres géotechniques.	Besoin de connaissances détaillées de la zone d'étude. Besoin d'une grande expérience pour utiliser les modèles géotechniques. Ne prend pas en compte l'incertitude des variables.	H	Na	Na	Op	Op
	1.7.2. <i>Approche par précipitations critiques</i>	Méthodologie objective et quantitative. Demande des investigations et des mesures détaillées des paramètres géotechniques.	Besoin de connaissances détaillées de la zone d'étude. Ne prend pas en compte l'incertitude des variables. Simplification des processus physique pour certains modèles. Ne prend en compte qu'un type de mouvements de versant.	I	Na	Na	Op	Op
	1.7.3. <i>Approche par zonage dynamique</i>	Méthodologie objective et quantitative. Demande des investigations et des mesures détaillées des paramètres géotechniques. Fournit des champs de pression et de déformations. Permet l'élaboration de scénarii prédictifs.	Besoin de connaissances détaillées de la zone d'étude. Besoin d'une grande expérience pour utiliser les modèles. Besoin de codes de calcul spécifiques, de longs paramétrages. Problèmes d'interface.	H	Na	Na	Rec	Op

Source : Thiery (2007).

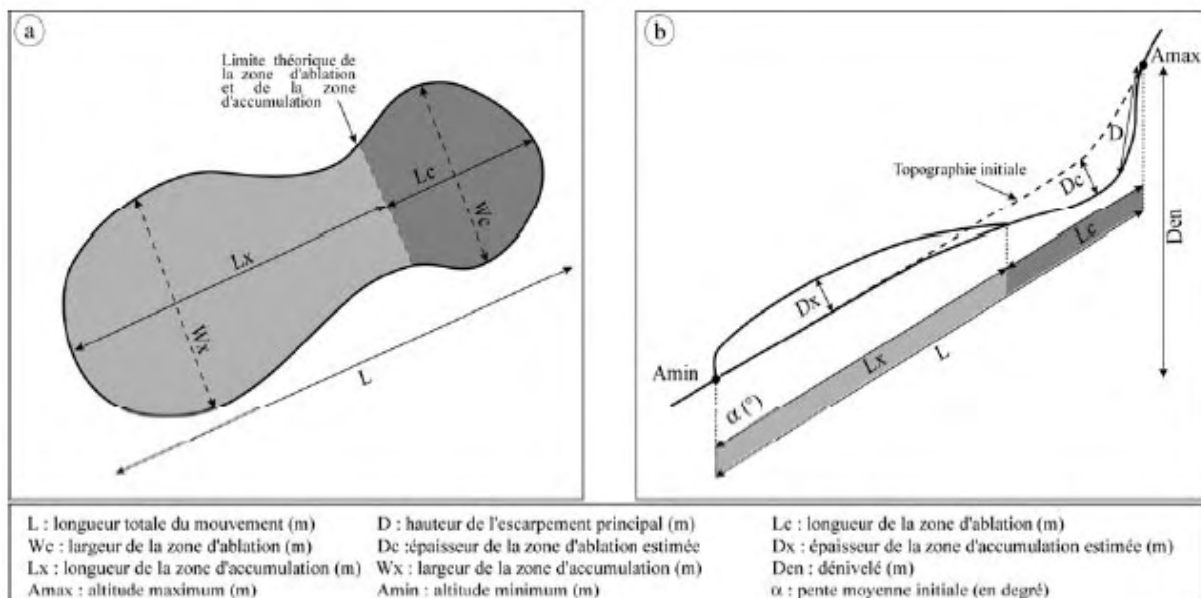
Annexe 3 : Variables qualitatives pour déterminer l'activité d'un mouvement sur le terrain.

<i>Variable explicative</i>	<i>Code</i>	<i>Classes</i>	<i>Coefficient</i>
<i>(i) Etat de dégradation de l'escarpement de tête</i>	ET	1. Forme fraîche complètement déstructurée par des mouvements adjacents	5
		2. Forme nette	4
		3. Forme dégradée par l'érosion / recouverte par des dépôts corrélatifs pour moins de la moitié de sa hauteur / la végétation recouvre peu à peu la forme	3
		4. Forme très dégradée / la pente est très émoussée / la végétation le recouvre	2
		5. Forme à peine visible / l'escarpement est convexe en amont et concave en aval / recouvert par des dépôts corrélatifs / la végétation le recouvre	1
<i>(ii) Etat de dégradation des escarpements mineurs</i>	EM	1. Forme fraîche / déstructuration du sol / sol complètement nu	4
		2. Forme atténuée / recouvert de dépôts corrélatifs / reprise de la végétation	3
		3. Forme très atténuée / la végétation recouvre totalement la forme dégradée	2
		4. Forme très atténuée à peine visible	1
<i>(iii) Etat du bossellement</i>	Bo	1. Topographie très chaotique / roche nue / blocs anguleux bien visibles	4
		2. Topographie chaotique / blocs émoussés / colonisation par une végétation pionnière	3
		3. Topographie bosselée mais les formes douces sont recouvertes par la végétation (landes, arbustes, etc.)	2
		4. Topographie légèrement ondulée recouverte par une végétation abondante ou mise en culture	1
<i>(iv) Etat des fissures de tractions</i>	F	1. Visibles très nettes	4
		2. Emoussées sur les bords / partiellement remplies de sédiments	3
		3. Remplies de sédiments / végétation les recouvrant	2
		4. Peu ou pas visible / forment de très légères saignées dans la masse déplacée (confusion possible avec d'anciens drains)	1
<i>(v) Etat de fissures de régression</i>	FR	1. Présence	2
		2. Absence	1
<i>(vi) Présence de sources</i>	So	1. Présence	2
		2. Absence	1
<i>(vii) Présence de sagnes</i>	Sa	1. Présence	2
		2. Absence	1
<i>(viii) Etat de la végétation (essentiellement les arbres)</i>	V	1. Arbres tous déracinés	6
		2. Arbres déracinés et penchés	5
		3. Arbres penchés	4
		4. Arbres redressés	3
		5. Lande, pelouse alpine dégradées	2
		6. Arbres au port droit	1
		7. Lande, pelouse alpine conservées	1
<i>(ix) Dégradation des routes</i>	R	1. Fortement dégradée / destruction	3
		2. Moyennement dégradée	2
		3. Non dégradée	1
<i>(x) Dégradation du bâti</i>	Ba	1. Fortement dégradée / destruction	3
		2. Moyennement dégradée	2
		3. Non dégradée	1
<i>(xi) Etat des canalisations</i>	C	1. Fortement dégradées / destruction	3
		2. Moyennement dégradées	2
		3. Non dégradées	1

Source : Thier (2007).

Annexe 4 : Principe de calcul des indices dérivés de la table quantitative.

Indice	Code	Formules	Signification pour le bassin de Barcelonnette
(i) Indice de profondeur	P	D/L	Plus P est faible, moins le mouvement est profond : cela correspondra aux glissements translationnels complexes ou aux glissements translationnels d'interfluve
(ii) Indice de dilatation	Di	W_x/W_c	Lorsque Di est faible, le mouvement possède une base étroite signifiant une chenalisation des matériaux déplacés. Correspond souvent aux glissements-coulées, parfois à des glissements rotationnels d'interfluve.
(iii) Indice de déplacement	Dé	L_c/L	Si Dé est proche de 1, le mouvement aura une zone d'ablation prépondérante.
(iv) Indice de ténuité	T	L_x/L_c	Plus T est grand plus la zone d'accumulation est étendue ; les glissements d'interfluve comme les glissements translationnels complexes ou rotationnels et les glissements-coulées ont un ratio proche de 1.6.
(v) Indice d'écoulement plastique	EP	$\frac{1}{100} (W_x/W_c) - 11 (L_x/L_c) \times 100$	EP représente un indice d'écoulement plastique théorique, plus EP est petit, plus le glissement est plastique, plus EP est grand, plus le glissement est considéré comme fluide.
(vi) Indice de compacité aval	Cav	W_x/L	Cav indique si le glissement est plus long que large, et si la base est étroite. Un ratio proche de 0 signifie un mouvement étroit dans la partie aval : les glissements chenalisés ou très longs ont un ratio proche de 0.2/0.3 ; au dessus de 1, le mouvement est très large et correspond souvent aux glissements rotationnels ou banc sur banc.
(vii) Indice de compacité amont	Cam	W_c/L	Cam indique si le mouvement est plus long que large comme Cav mais il indique si le mouvement est large dans sa partie amont : un ratio proche de 0 signifie un mouvement étroit de la partie amont et correspond aux mouvements d'interfluve.
(viii) Indice d'étalement	E	W_c/W_x	Lorsque E est supérieur à 1 le mouvement est peu étalé en aval, si E est très grand le mouvement est probablement chenalisé. Ce ratio discrimine très bien les glissements-coulées des autres.
(ix) Dénivelé du glissement.	Den	$A_{max} - A_{min}$	Den représente le dénivelé du mouvement.



Source : Thier (2007).

Annexe 5 : Principe de calcul d' l'indice de confiance cartographique.

Cet indice dépend de la qualité et de la pertinence des informations recueillies. Trois types d'informations sont distingués : les observations de terrain, les observations par photo-interprétation, les informations collectées dans les documents bibliographiques et iconographiques.

Etape 1.

Cpe. = Coefficient de pertinence ; *Cpo* = Coefficient pondérateur.

Variables	Cpe		Cpo.
	Valeur	Signification	
Observations de terrain	1	Formes nettes : aucune ambiguïté sur la reconnaissance du phénomène.	x 6
	0.5	Formes nettes ou estompées : le type, l'état d'activité posent des problèmes d'interprétation et sont sujets à discussion.	
	0	Formes peu visibles sur le terrain : le type, l'état d'activité posent des problèmes d'interprétation et sont sujet à discussion.	
Interprétation des photographies aériennes	1	Formes bien visibles sur les photographies aériennes (topographie chaotique, ruptures de pentes, etc.) : une distinction avec l'environnement alentour est visible.	x 1
	0	Les formes sont assez peu distinguées : elles sont très estompées ou elles sont recouvertes par la forêt. Les traces d'instabilité sont indécélables.	
Analyse de documents (cartes topographiques, rapports, documents anciens, etc.)	1	Plus de 50% des documents consultés mentionnent l'existence d'un phénomène.	x 1
	0	Plus de 50% des documents consultés ne mentionnent pas l'existence d'un phénomène.	

Etape 2.

ICC = Indice de confiance cartographique ; *OT* = Observations de terrain ; *IPA* = Interprétation de photographies aériennes ; *AD* = Analyse de documents ; *Cpo* = Coefficient pondérateur.

ICC	OT	Cpo	IPA	Cpo	AD	Cpo	Pondération finale
ICC1	1	x 6	1 ou 0	x 1	1 ou 0	x 1	[8-7]
ICC2	1	x 6	0	x 1	0	x 1	[6-4]
	0.5		1 ou 0		1 ou 0		
	0		1 ou 0		1 ou 0		
ICC3	0.5	x 6	0	x 1	0	x 1	[3-0.5]
	0		1		1		

Source : Thier (2007).

Annexe 6 : Quelques méthodes pour classer l'activité des 'mouvements de versants'.

ETAT D'ACTIVITE	TYPE D'ACTIVITE	PERIODE DE RETOUR	MODE D'ACTIVITE	PERIODE DE DERNIERE ACTIVITE
INACTIF (FOSSILE/ETEINT)				Pleistocène Début (700 000- 2 000 000 BP)
STABILISE <i>définitivement ou long terme</i>		Fréquence très espacée (1000 ans)		Moyen (125 000-700 000 BP)
LATENT <i>nouvelle rupture</i>	SINGULIER EPISODIQUE irrégulier	Fréquence moyenne (100-1000 ans) Fréquence faible (10-100 ans) Fréquence forte (1-10 ans)	Aléatoire Progressif Brusque	Fin (10 000-125 000 BP)
ACTIF <i>réactivation 1^{er} déclenchement</i>	INTERMITTENT saisonnier ou non régulier CONTINU	Fréquence très forte (< 1 an)		Holocène Ancien (3 000-10 000 BP) Ancien historique (200-3 000 BP) Récents historique (10-200 BP) Actuel

AGE	PERIODE DE RETOUR (return period)	CHANGEMENT MORPHOLOGIQUE	ACTIVITE (activity)	
 Présent ↑ 10 ans ↑ > 1000 ans ↑ Pleistocène	1 jour	 Formes fraîches, la morphologie est distincte des pentours, les fissures sont bien visibles.		Continu (continuous) Intermittent (intermittent) ACTIF (ACTIVE)
	1 an	 La morphologie reste différente de alentours, cependant, les formes sont plus douces que précédemment.		Latent (dormant) INACTIF (INACTIVE)
	10 ans	 Les formes sont modifiées par un drainage de surface, de l'érosion, le glissement se recouvre de végétation.		Latent (dormant) INACTIF (INACTIVE)
	> 1000 ans	 Les formes sont légèrement perceptibles, il ne reste que des traces morphologiques du phénomène.		Fossile (relict) INACTIF (INACTIVE)

Source : Thiery (2007).

Annexe 7 : Règles expertes pour définir les classes de susceptibilité.

<i>Susceptibilité</i>	<i>Définition</i>
<i>S1 : susceptibilité nulle</i>	Aucune possibilité de déclenchement d'un 'mouvement de versant'. Les conditions environnementales locales contribuent à renforcer la stabilité des terrains (association d'un gradient de pente nul à faible [0-10°], de terrains agricoles en cultures permanentes, entretenus et drainés).
<i>S2 : susceptibilité faible</i>	Possibilité faible de déclenchement d'un 'mouvement de versant'. Les conditions environnementales locales (association d'un gradient de pente faible à modéré [10-20°], de pelouses ou d'espaces forestiers entretenus) sont faiblement favorables au déclenchement de glissements de terrain. Néanmoins, l'abandon de l'entretien des terrains ou la présence locale de rupture de pente pourraient conduire à la déstabilisation. Le principe est donc à la prudence notamment concernant la mise en place d'aménagements futurs.
<i>S3 : susceptibilité modérée</i>	Possibilité modérée de déclenchement d'un 'mouvement de versant'. Les conditions environnementales locales sont favorables au déclenchement de glissements de terrain (association d'un gradient de pente modéré à fort [20°-25°], de présence de ruptures de pentes et de bossellements, de pelouses ou d'espaces forestiers non entretenus, d'une absence ou d'un mauvais état des dispositifs de drainage, de sols faiblement dégradés). Les projets de construction sont possibles mais devront être précédés d'études géotechniques détaillées pour définir les travaux de confortement obligatoires (fondations, renforcement des structures, drainage, reboisement).
<i>S4 : susceptibilité forte</i>	Possibilité forte de déclenchement d'un 'mouvement de versant'. Les conditions environnementales locales sont très favorables au déclenchement de 'mouvements de versant' (association d'un gradient de pente fort >25°, de sols fortement dégradés ou ravinés, de l'absence de végétation ou de forêts très mal entretenues). Des glissements très actifs sont présents. Aucun aménagement n'est possible.

Source : Thiery (2007).