



ENGEES

Ecole Nationale du Génie de
l'Eau et de l'Environnement
de Strasbourg



Centre National de la
Recherche Scientifique



Laboratoire
GEOgraphie **PH**ysique
et **EN**vironnement

UMR
Littoral – Environnement –
Télédétection – Géomatique

Influence de la végétation arborée sur l'activité de glissements de terrain superficiels

**Exemple du bassin de Barcelonnette,
Alpes de Haute Provence (04)**

Mémoire de Master Recherche « Géosciences, Environnement et Risques »
et d'Ingénieur ENGEES

Sous la direction de Monsieur Jean-Philippe Malet
et la co-direction de Monsieur Olivier Maquaire

Présenté le 14 septembre 2007 devant le jury composé de :
Madame Anne-Véronique Auzet
Monsieur Jean-Marc Strauss
Madame Corinne Grac

Fanny ARNAUD

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	- 2 -
SYMBOLES ET ABREVIATIONS	- 3 -
LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES	- 3 -
INTRODUCTION	- 5 -
AVANT-PROPOS	- 6 -
PREMIERE PARTIE Cadre de l'étude et démarche méthodologique	- 7 -
A. Etat synthétique des connaissances sur le sujet	- 7 -
1. La forêt indicatrice des processus géomorphologiques	- 7 -
2. Les actions de la forêt sur le cycle de l'eau	- 8 -
3. Les actions mécaniques de la forêt sur les sols	- 9 -
B. Objectifs de la recherche et démarche méthodologique	- 10 -
1. Le contexte scientifique dans le bassin de Barcelonnette	- 10 -
2. La méthodologie développée	- 11 -
C. Le site d'étude : le bassin de Barcelonnette	- 11 -
1. Localisation et présentation du site	- 11 -
2. Contexte géologique	- 12 -
3. Climat	- 13 -
4. Un paysage modifié par l'homme - premier aperçu de l'évolution de la végétation	- 13 -
D. L'activité de glissements de terrain dans le bassin de Barcelonnette	- 14 -
DEUXIEME PARTIE Analyse de la relation entre glissements de terrain et végétation arborée à l'échelle régionale	- 16 -
A. L'occupation des sols dans le bassin de Barcelonnette en 2004	- 16 -
1. Travail cartographique	- 16 -
2. Analyse spatiale de l'occupation des sols	- 18 -
B. La dynamique de la végétation depuis le début du 20 ^{ème} siècle	- 19 -
1. L'état de la forêt jusqu'à la moitié du 20 ^{ème} siècle	- 20 -
2. L'évolution de la végétation entre 1974 et 2004	- 20 -
C. Evolution de la végétation et localisation des glissements de terrain dans le bassin de Barcelonnette	- 22 -
1. Discussion sur la fiabilité de la cartographie des glissements de terrain	- 22 -
2. Analyse spatiale de la répartition des glissements de terrain	- 23 -
3. Analyse spatiale et temporelle de la relation entre végétation et glissements de terrain	- 24 -
TROISIEME PARTIE Caractérisation de l'activité de glissement de terrain à l'échelle locale – Etude dendrogéomorphologique et analyse de la stabilité de versants en relation avec les caractéristiques de la couverture forestière	- 26 -
A. Présentation des sites	- 26 -
1. Le secteur des Aiguettes (commune de Saint Pons)	- 26 -
2. Le secteur du Plan (commune de Jausiers)	- 27 -
B. Matériels et méthodes pour l'analyse dendrogéomorphologique	- 28 -
1. Principes généraux	- 28 -
2. Prélèvement, préparation des échantillons et lecture des cernes	- 29 -
3. Démarche méthodologique pour l'analyse	- 29 -
C. Analyse dendrogéomorphologique	- 29 -
1. Analyse du site des Aiguettes	- 30 -
2. Analyse du site du Plan	- 33 -
D. Matériels et méthodes pour l'analyse des caractéristiques hydromécaniques des sols	- 35 -
1. Fosse pédologique	- 35 -
2. Cohésion et angle de frottement interne	- 36 -
3. Conductivité hydraulique à saturation	- 36 -
E. Analyse des résultats	- 37 -
F. Modélisation de l'état de stabilité des secteurs : Résultats et discussion	- 37 -
1. Description du modèle et méthodologie développée	- 37 -
2. Simulations	- 38 -
CONCLUSION GENERALE	- 40 -
BIBLIOGRAPHIE	- 41 -
LISTE DES PLANCHES ET ANNEXES	Erreur ! Signet non défini.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je désire vivement remercier Monsieur Jean Philippe Malet, chargé de recherche CNRS, pour m'avoir proposé ce sujet, et m'avoir intégré au sein de son équipe. Je le remercie pour son encadrement, pour les précieux conseils qu'il m'a donné, et pour la confiance qu'il m'a accordé, en particulier lors des campagnes de terrain. Je lui suis enfin reconnaissante de m'avoir fait découvrir le bassin de Barcelonnette et la complexité de ses processus géomorphologiques ; ce fut un véritable plaisir que de mener une étude sur cette région, cela concrétisa un souhait de longue date, celui de travailler sur un milieu de montagne.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur Olivier Maquaire, professeur, pour m'avoir fait partager ses nombreuses connaissances en géomorphologie, au sein du laboratoire et lors de missions de terrain.

Une collaboration de qualité avec les acteurs locaux est d'autant plus essentielle, quand le terrain d'étude est situé à 1000 kilomètres du laboratoire ... Je tiens donc à remercier toutes les personnes de la région de Barcelonnette qui m'ont aidé dans la réalisation de cette étude. En particulier, mes remerciements vont vers le personnel de l'Office National des Forêts et du service RTM à Barcelonnette : merci à Monsieur Serge Rumèbe, pour m'avoir accueilli très amicalement au sein de son service et avoir mis à ma disposition de nombreux documents ; Messieurs Reynaut et Guiter, pour le temps qu'il m'ont consacré, en m'emmenant à plusieurs reprises sur le terrain et en m'ayant fait partager leur connaissance de la vallée et du bassin versant du Riou Bourdoux ; également, je voudrais remercier Monsieur Serge Rebattu, pour m'avoir permis d'effectuer des prélèvements d'arbres et de sol sur ses parcelles.

Je suis reconnaissante envers le personnel de l'Unité de Recherche « Ecosystèmes Montagnards » du Cemagref de Grenoble, pour m'avoir accueilli dans leur laboratoire et permis d'utiliser la chaîne de mesures dendrométriques.

Je remercie le laboratoire d'Analyse des Sols de la Faculté de Géographie et d'Aménagement de Strasbourg, en particulier Martine Trautmann, pour avoir réalisé les mesures de conductivité hydraulique à saturation sur les échantillons prélevés.

J'adresse également mes remerciements au personnel de l'Université d'Utrecht, pour avoir réalisé les essais de cisaillement direct sur les échantillons.

Je remercie Yannick Thiery et Alexandre Remaître, pour leurs conseils tout au long de ce stage.

Merci également à Jérôme Lopez, pour son aide sur le terrain et ses conseils précieux en dendrogéomorphologie ; à Dorine, pour m'avoir accompagné sur le terrain et pour avoir creusé avec moi, dans la joie et la bonne humeur ...

Je remercie mon père et ses talents de menuisier, sans lesquels la préparation des échantillons pour l'analyse dendrogéomorphologique aurait été impossible ; et merci enfin aux autres personnes qui m'ont aidé, de près ou de loin, mais que j'ai certainement oublié, en cette fin de rédaction ...

SYMBOLES ET ABREVIATIONS

c' : cohésion	S : section
Fs : facteur de sécurité	V : volume
H : charge	Φ' : angle de frottement interne
K_{sat} : conductivité hydraulique à saturation	γ_d : poids volumique sec
L : hauteur	κ : perméabilité intrinsèque
n : nombre d'échantillons	σ : contrainte normale
Q : débit	τ : contrainte tangentielle

ALARM : Assessment of LANDslide Risk and mitigation in Mountain areas
CEMAGREF : CEntre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural et des Eaux et Forêts
CERG : Centre Européen sur les Risques Géomorphologiques
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
GACH2C : Glissements Alpins à Contrôle Hydrologique et Changement Climatique.
GEOPHEN : GEOgraphie Physique et ENvironnement
IE : indice d'excentricité
IFN : Inventaire Forestier National
IGN : Institut Géographique National
LETG : Littoral – Environnement – Télédétection – Géomatique
ONF : Office National des Forêts
RTM : Restauration des Terrains en Montagne
SIG : Système d'Information Géographique

LISTE DES TABLEAUX

-Tableau 1 : Effets positifs et négatifs de la forêt sur l'activité de glissements de terrain.....	10
- Tableau 2 : Les différents types de mouvements de terrain dans le bassin de Barcelonnette (MATE/MATL, 1999, Walstra, 2006).....	14
- Tableau 3 : Description des données disponibles.....	16
- Tableau 4 : Nomenclature simplifiée de la cartographie d'occupation des sols dans le bassin de Barcelonnette en 2004.....	17
- Tableau 5 : Essences forestières cartographiées dans le bassin de Barcelonnette.....	17
- Tableau 6 : Etats d'activité des mouvements de terrain définis par le CERG (d'après Maquaire, 2002).....	23
- Tableau 7 : Période de retour et âge associé à l'état d'activité (d'après Flageollet, 1996).....	23
- Tableau 8 : Caractéristiques des deux sites et prélèvements réalisés.....	28
- Tableau 9 : Ordre de grandeur de la conductivité hydraulique à saturation dans divers sols (Musy et al,1992).36	
- Tableau 10 : Caractéristiques hydromécaniques mesurées sur les secteurs du Plan et des Aiguettes (gd : poids volumique sec, n : nombre d'échantillons).....	37

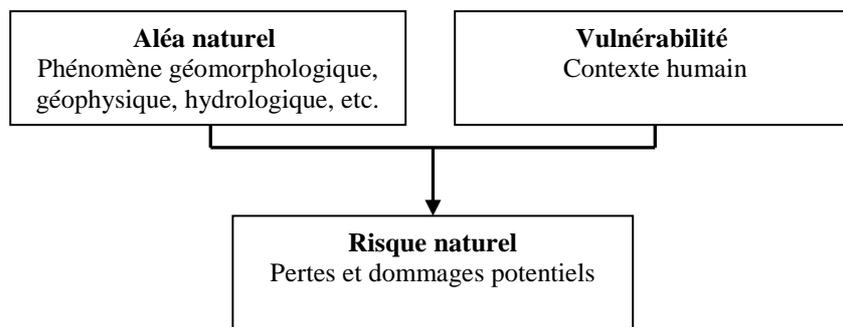
LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Courbure d'un arbre et excentricité des cernes en réponse à un glissement de terrain (Braam et al., 1987b).....	7
- Figure 2 : Le cycle de l'eau sur un versant non boisé (a) et boisé (b) (d'après Ambroise, 1999)	
- Figure 3 : Cheminement de l'eau dans le cas d'un pendage non conforme à la pente (a) et conforme à la pente (b) (Rice, 1977).....	8
- Figure 4 : Organigramme de la méthodologie développée pour le travail de recherche.....	9
- Figure 5 : Localisation du bassin de Barcelonnette (Source : fond topographique IGN 1 :25,000e, 2000).....	11
- Figure 6 : Terres Noires en amont de Faucon-de-Barcelonnette (cliché F. Arnaud, mai 2007).....	12
- Figure 7 : Précipitations (période 1928-2004) et températures (période 1961-1993) moyennes mensuelles interannuelles. Station de Barcelonnette (altitude 1155 m).....	12
- Figure 8 : Cartographie des mouvements de terrain dans le bassin de Barcelonnette (Sources : inventaire des glissements de terrain Y. Thiery 2002, Université d'Utrecht 1988).....	13
Figure 8' : Localisation des secteurs des Aiguettes (a) et du Plan (b) (Source : fond topographique IGN 1 :25,000°, 2000).....	13
- Figure 9 : Pourcentage des classes d'occupation des sols dans le bassin.....	15
- Figure 10 : Types de forêts dans le bassin, en pourcentage de la superficie totale de forêts.....	18
- Figure 11 : Essences forestières dans le bassin, en pourcentage de la superficie totale de forêts.....	18
Figure 12 : Répartition des essences, en pourcentage de la superficie de chaque tranche d'altitude.....	18
- Figure 13 : Evolution de la forêt - glissement-coulée de Poche et secteur de la Frache. a : situation en 1924 (Cliché Mr. Borelli). b : situation en 2007 (Cliché F. Arnaud, avril 2007).....	19
- Figure 14 : Evolution de la forêt – bassin versant du Riou Bourdoux a : situation en 1881 (Administration des forêts, plan d'ensemble, périmètre de St Pons). b : situation en 2004.....	20
- Figure 15 : Méthode de rétro-interprétation de l'occupation des sols (d'après Andreassian, 2002).....	20
- Figure 16 : Evolution des pourcentages de secteur occupés par une classe d'occupation des sols.....	21
- Figure 17 : Evolution des pourcentages de secteur occupés par la forêt.....	21
- Figure 18 : Progression et recul de la forêt entre 1974 et 2004 en fonction de l'altitude, en pourcentage de la superficie totale d'avancée de la forêt pour chaque période (adret).....	21
- Figure 19 : Répartition des glissements en fonction de l'occupation du sol (adret+ubac).....	22
- Figure 20 : Répartition des glissements actifs et latents en fonction de l'évolution de l'occupation des sols entre 1982 et 2004.....	24
- Figure 21 : Partie amont du glissement de terrain des Aiguettes (orthophotographie 1982, IFN).....	25
- Figure 22 : Les Aiguettes en 1974 (a) et 2000 (b) (orthophotographies IGN/IFN).....	26
Figure 23 : Secteur du Plan (orthophotographie 1982, IFN).....	27
- Figure 24 : Le secteur du Plan en 1948 (a) et 2000 (b) (photographies IGN).....	27
- Figure 25 : secteur du Plan. a : arbres droits, secteur de référence. b : arbre courbé, secteur instable (clichés F. Arnaud, avril 2007).....	28
- Figure 26 : Sondage à la tarière de Pressler, secteur des Aiguettes (cliché F. Arnaud, avril 2007).....	28
- Figure 27 : Echantillons préparés (cliché F. Arnaud, mai 2007).....	29
- Figure 28 : Largeurs de cernes et indices d'excentricité. Séries moyenne de référence et des Aiguettes.....	29
- Figure 29 : Réponse des arbres du secteur des Aiguettes (indice d'excentricité IE).....	30
- Figure 30 : Périodes et années de forte excentricité, sur les sites du Plan et des Aiguettes	31
- Figure 31 : talus (à gauche) et zone remaniée (cliché F. Arnaud, mai 2007).....	31
- Figure 32 : Hyétoqramme (station de Barcelonnette, 1155 m) et périodes d'excentricité de 1928 à 2004.....	32
- Figure 33 : Largeurs de cernes moyennes des sites du Plan et des Aiguettes.....	32
- Figure 34 : Réponse des arbres du secteur du Plan (indice d'excentricité IE).....	33
- Figure 35 : Comparaison des hyétoqrammes de Jausiers et Barcelonnette sur la période 1960-2004.....	34
- Figure 36 : Prélèvement d'échantillons de sol non remaniés dans une fosse pédologique (cliché F. Arnaud, mars 2007).....	35
- Figure 37 : Courbe intrinsèque (courbe de rupture) d'un sol.....	36
- Figure 38 : Positionnement de la surface de glissement. a : site des Aiguettes. b : site du Plan (réalisation J.P. Malet).....	38
- Figure 39 : Simulation de la stabilité du secteur du Plan pour une couverture de pins sylvestres (a), et une couverture mixte pins/graminées (b) (réalisation J.P. Malet).....	39
- Figure 40 : Analyse de sensibilité de la résistance racinaire et du coefficient d'interception, site des Aiguettes (Réalisation J.P. Malet).....	39

INTRODUCTION

Les glissements de terrain sont des phénomènes géomorphologiques présents dans de nombreuses régions du globe. Ils constituent un risque majeur pour les populations, car ils peuvent engendrer des dommages conséquents aux biens et provoquer dans certains cas des catastrophes. Ils correspondent à des déplacements d'une masse de terrain cohérente le long d'une surface de rupture (MATE/MATL, 1999). Les volumes de sol mis en jeu sont très variables, ils dépendent de la profondeur de la surface de glissement, allant de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres de profondeur. Ainsi, l'extension des glissements de terrain peut varier du simple glissement de talus très localisé, au mouvement de grande ampleur concernant l'ensemble d'un versant. Les déplacements sont lents (quelques millimètres par an à quelques mètres par jour) en comparaison avec des mouvements de terrain rapides et brutaux tels que les chutes de blocs ou les laves torrentielles.

Le risque naturel résulte du croisement d'un aléa naturel et d'une vulnérabilité :



Gérer le risque passe par une meilleure compréhension des mécanismes de fonctionnement de l'aléa naturel. Dans ce contexte, le présent travail de fin d'études propose de mieux comprendre certains des mécanismes impliqués dans l'activité de glissements de terrain. Le site permettant d'illustrer cette recherche est le bassin de Barcelonnette, localisé dans la vallée de l'Ubaye, dans le département des Alpes de Haute Provence. Territoire de montagne, soumis à des conditions géographiques et météorologiques difficiles, il est particulièrement concerné par les risques géomorphologiques, glissements de terrain et laves torrentielles, et fait l'objet d'études scientifiques depuis une vingtaine d'années.

De nombreux paramètres, naturels ou anthropiques, conditionnent l'apparition et le développement des glissements de terrain : la géologie, la pente, l'hydrogéologie, etc. Dans le bassin de Barcelonnette, si les rôles de ces paramètres ont été étudiés en détail sur différents secteurs instables, le lien entre glissements de terrain et végétation arborée n'a par contre pratiquement pas été analysé. Le développement de recherches dans ce domaine s'avère pourtant essentiel, compte tenu de la superficie de forêts dans le bassin de Barcelonnette (41 %) et du fait que des glissements sous forêt sont observés. Cette étude consiste donc en **l'analyse des implications potentielles de la végétation arborée dans les phénomènes de glissements de terrain**. Les glissements de terrain *superficiels* sont considérés, c'est-à-dire ceux dont la profondeur de la surface de glissement est de quelques mètres. La recherche est développée en envisageant deux types d'implications : la forêt en tant qu'*indicateur* temporelle de l'activité géomorphologique d'un versant, et la forêt *stabilisatrice* potentielle d'un versant.

Ce mémoire s'articule en trois parties : une présentation du contexte scientifique et de la méthodologie développée ; une analyse de la relation entre glissements de terrain et végétation arborée à l'échelle « régionale », celle du bassin de Barcelonnette ; et enfin, sur des secteurs cibles, une étude de la forêt indicatrice des instabilités de versant, ainsi qu'une analyse du rôle de la forêt contre les instabilités.

AVANT-PROPOS

La structure d'accueil : l'UMR CNRS Littoral-Environnement-Téledétection-Géomatique

Ce travail de fin d'études a été réalisé au sein de l'Unité Mixte de Recherche 6554 du CNRS Littoral-Environnement-Téledétection-Géomatique. C'est une unité multisite constituée de quatre laboratoires, à Brest, Nantes, Rennes et Caen. Les recherches portent sur l'analyse et la compréhension des dynamiques des systèmes complexes, à l'interface entre nature et société. Les espaces et territoires d'étude privilégiés sont le littoral et le continuum continent-océan. Le laboratoire GEOgraphie PHysique et Environnement, structure d'accueil de ce travail de recherche, est la composante caennaise de l'UMR LETG ; il regroupe des géographes, climatologues, géoarchéologues et géomorphologues, qui travaillent autour de l'étude des paysages, de la géomorphologie fluviale et du fonctionnement des hydrosystèmes, en Normandie essentiellement.

Depuis quelques années, le laboratoire a élargi ses recherches vers les aléas géomorphologiques en milieu de montagne (glissements de terrain, laves torrentielles), avec l'arrivée de Monsieur Olivier Maquaire, professeur à la Faculté de Géographie et d'Aménagement de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, et membre du Centre Européen sur les Risques Géomorphologiques (CERG) à Strasbourg. Le CERG a initié les premières investigations sur les aléas géomorphologiques et géo-hydrologiques en Europe à la fin des années 80, et notamment dans le bassin de Barcelonnette. Les nombreux projets conduits depuis cette date ont pour objectif d'améliorer les connaissances sur les mécanismes impliqués dans les phénomènes de mouvements de terrain, et d'approfondir les recherches sur les concepts de vulnérabilité et d'évaluation du risque. C'est dans ce contexte que le travail de fin d'études présenté dans ce mémoire a été réalisé, sous la direction de Monsieur Jean-Philippe Malet, chargé de recherche CNRS, géomorphologue et membre du CERG, et sous la co-direction de Monsieur Olivier Maquaire.

Le contexte de l'étude : le projet GACH2C

Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre du projet GACH2C : Glissements Alpains à Contrôle Hydrologique et Changement Climatique. Il s'agit d'un projet multi-disciplinaire d'étude de l'aléa gravitaire qui a pour objectif **d'analyser les relations entre le climat et l'activité des glissements de terrain à contrôle hydrologique, depuis les cinquante dernières années et dans le futur**. Les glissements de terrain affectant des roches cohésives tendres (argiles, marnes) dans la vallée de l'Ubaye et dans la région du Trièves sont étudiés. Le projet, financé pour une durée de trois ans (2004-2007), est réalisé dans le cadre du programme national Action Concertée Incitative « Aléas et Changements Globaux » de l'Institut National des Sciences de l'Univers du CNRS et du Fonds National de la Science.

L'UMR LETG (laboratoire GEOPHEN) est coordinatrice du projet. Ce projet regroupe également des chercheurs et ingénieurs d'autres organismes, tels que le Laboratoire des Sciences de la Terre (Lyon), l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg, la Faculté de Géosciences de l'Université d'Utrecht (Pays-Bas), le Centre d'Étude de la Neige (Grenoble).

Un des axes de recherche du projet GACH2C est **la détermination du lien entre activité de glissement de terrain et végétation**. Ainsi la présente étude cherche à analyser l'influence de la végétation arborée sur l'activité de glissements de terrain dans le bassin de Barcelonnette.

PREMIERE PARTIE

Cadre de l'étude et démarche méthodologique

Chercheurs et ingénieurs sont très partagés quant à l'influence positive ou négative de la forêt sur la stabilité d'un versant. Les interactions existant entre forêt et glissement de terrain peuvent se résumer en deux aspects : les effets sur le **cycle de l'eau**, et les effets **mécaniques** sur les sols. La forêt est également étudiée comme *indicateur*, pour **dater** les processus géomorphologiques. Le paragraphe qui suit a pour objectif de fournir un aperçu de l'état actuel des connaissances sur le lien entre forêt et activité de glissements de terrain.

A. Etat synthétique des connaissances sur le sujet

Une évaluation de l'aléa glissement de terrain nécessite de savoir repérer *in situ* les indices d'une instabilité : niche d'arrachement, paysage en « gradins », fissures, bourrelets, sorties d'eau, etc. L'observation de la **végétation** peut fournir également des informations précieuses.

1. La forêt indicatrice des processus géomorphologiques

Un sol instable a différentes conséquences sur la forêt : il peut entraîner des troncs partiellement enterrés, un déracinement des arbres, et le plus fréquemment des arbres « **courbés** » ; sur un sol en mouvement, l'arbre tend à s'incliner dans la direction du mouvement. Pour maintenir une croissance verticale, l'arbre se courbe, d'où un tronc en forme de « crosse » (figure I.1). Un arbre courbé permet ainsi d'estimer la ou les directions d'un glissement de terrain (direction des courbures), ainsi que l'amplitude du mouvement (angle d'inclinaison) (Braam et al., 1987b). Il faut néanmoins être attentif aux autres conditions du secteur, une pente forte, le vent, la neige, la compétition avec les arbres voisins pouvant causer également une courbure (Schweingruber, 1993).

Il est connu que le tronc d'un arbre s'accroît par cernes annuels concentriques. La courbure a pour conséquence la déformation des cernes. Cela est permis grâce à la formation de **bois de réaction**, bois plus foncé dont la structure des cellules a été modifiée. Chez les conifères, ce bois se forme dans le sens du mouvement, d'où une asymétrie des cernes du côté « aval » du tronc (figure 1).

L'analyse de l'excentricité des cernes est une science à part entière, la **dendrogéomorphologie**, considérée comme une méthode très précise pour dater les processus géomorphologiques (Lang et al., 1999). Elle est dérivée de la **dendrochronologie** (du grec *dendron* : arbre, *chronos* : temps, *logos* : étude). Dans les Alpes, elle a été utilisée à de

nombreuses reprises pour dater des glissements de terrain (Braam et al., 1987b ; Kirschoffer, 1994 ; Astrade et al., 1998 ; Lopez Saez, 2006). Les résultats -dates d'activité de glissements - étant précis, ils peuvent être intégrés dans des modèles de stabilité de versant et servir à les caler (Van Asch et al., 1997 ; Buma, 2000). D'autre part, l'analyse des cernes permet de mettre en relation croissance de l'arbre, activité de glissement et conditions climatiques. Ainsi, il est possible de déterminer l'impact de l'évolution du climat sur les glissements de terrain, dans un contexte de changement climatique.

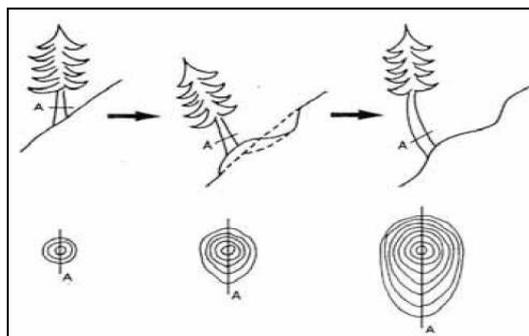


Figure 1 : Courbure d'un arbre et excentricité des cernes en réponse à un glissement de terrain (Braam et al., 1987b)

2. Les actions de la forêt sur le cycle de l'eau

L'eau joue un rôle primordial dans le déclenchement des instabilités. La figure 2 présente les différents processus intervenant dans le bilan hydrique d'un versant non boisé et boisé. Seuls les principaux processus sont considérés.

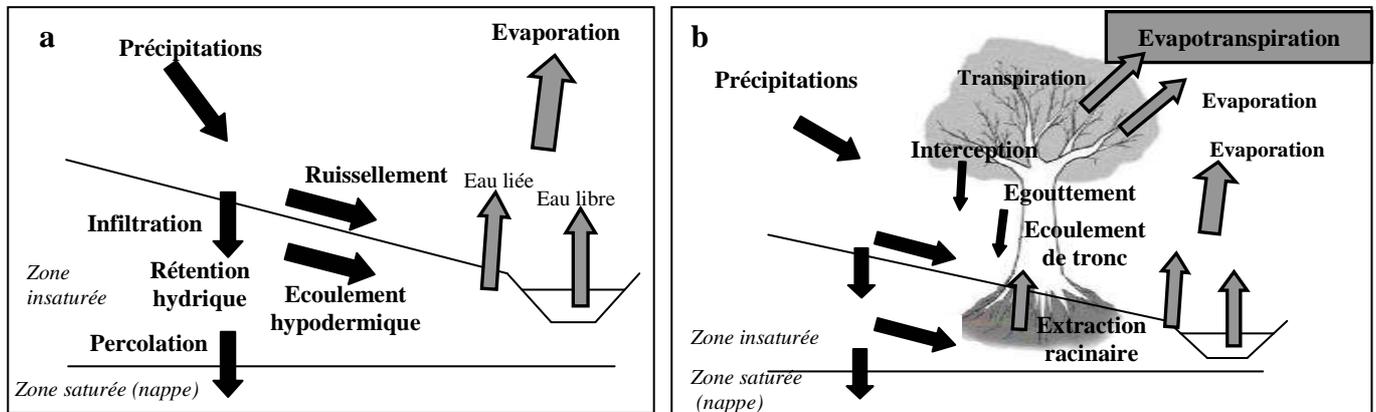


Figure 2 : Le cycle de l'eau sur un versant non boisé (a) et boisé (b) (d'après Ambroise, 1999)

Les **précipitations** sont le principal apport d'eau dans le système (figure 2, a). A la surface, l'eau tend à pénétrer dans le sol par **infiltration**, sous l'effet de la gravité. Elle est soit **stockée**, soit elle **percole** en profondeur et recharge les nappes. Cette percolation peut être bloquée par un niveau moins perméable, qui favorise alors l'existence d'un **écoulement hypodermique** latéral. En surface, dès que l'intensité des pluies dépasse l'infiltrabilité du sol, il y a déclenchement d'un « **ruissellement par dépassement de l'infiltrabilité** ». Enfin, l'**évaporation** est un retour différé de l'eau à l'atmosphère, qui constitue la principale sortie d'eau du système et qui a un rôle majeur dans le cycle de l'eau.

En présence de végétation, le cycle est profondément modifié (figure 2, b), ce qui a des conséquences positives et négatives sur la stabilité des versants. Une partie des précipitations est **interceptée** par le couvert végétal, le reste atteignant le sol par égouttement des feuilles et écoulement sur le tronc. La conséquence est une **protection directe du sol** contre les effets des gouttes (Berger et al., 2006b).

De plus, la présence d'arbres participe à la **réduction de l'énergie du ruissellement superficiel**. Après captage par la végétation, une partie des eaux de pluie séjourne dans le sol et est ensuite diffusée progressivement jusqu'à l'exutoire (Mériaux, 1984). C'est tout l'intérêt de la lutte contre les crues par le reboisement. Ceci dit, ce phénomène étudié dans le détail pose problème pour la stabilité des pentes. En effet, en ralentissant l'érosion, la forêt **favorise l'accumulation de matériaux détritiques** due à l'altération des roches, particulièrement dans le cas des marnes. Les produits de l'altération constituent un sol qui a des caractéristiques mécaniques médiocres et qui est susceptible d'être entraîné par glissement (Garczynski, 1984).

La présence d'arbres **favorise l'infiltration**. Des mesures réalisées dans une forêt artificielle ont montré que les 30 cm de sol créés avaient une perméabilité 10 à 100 fois supérieure à celle des couches inférieures (Berger et al., 2006b) ; cela est un facteur défavorable pour la stabilité des versants. Jean Goguel de l'Académie des Sciences (1943) accusait les forêts d'être responsables des glissements de terrain : « Ces résultats – la diminution de l'érosion par ruissellement grâce au reboisement – sont obtenus parce que l'eau de pluie, retenue par le tapis végétal, séjourne à la surface du sol un temps suffisant pour s'infiltrer en grande partie, et parce que les racines retiennent les particules qui pourraient être entraînées par les eaux pluviales qui ruissellent. Mais les mêmes facteurs **facilitent les glissements de terrain**, c'est-à-dire le déplacement lent et progressif d'une tranche épaisse de terrain argileux imbibée d'eau et ramollie (...) ». La question de savoir si la lutte contre le ravinement superficiel est compatible avec la stabilisation à long terme des versants fait encore débat à l'heure actuelle (Mériaux, 1984).

Paradoxalement, grâce à la transpiration des arbres (eau puisée dans le sol par extraction racinaire et transpirée au niveau des feuilles), la forêt présente un **rôle de pompe très puissant qui élimine l'eau** contenue dans un terrain. Cependant, cette action ne peut exister qu'en période de végétation, elle est donc limitée dans le temps. De plus, elle diminue avec l'âge de l'arbre ; elle atteint son maximum entre 40 et 60 ans selon les espèces, et décroît ensuite fortement. Sur le site de Roissard, dans l'Isère, des glissements de terrain se déclenchèrent dans les années 80 sous un peuplement artificiel de pins noirs planté en 1870. Ce fut certainement le vieillissement de la forêt qui provoqua l'instabilité du secteur, associé à l'accumulation d'argiles d'altération constituant une couche instable (Mazet-Brachet, 1984, Mériaux, 1984).

3. Les actions mécaniques de la forêt sur les sols

Les racines permettent de **stabiliser les sols par ancrage** vertical, en augmentant leur résistance au cisaillement. De nombreuses recherches montrent les effets néfastes des coupes forestières sur l'activité de glissement de terrain : sur l'île de Vancouver, au Canada, sur 1004 glissements de terrain s'étant produits au cours des vingt dernières années, Jakob (2000) a constaté que la fréquence des glissements dans les zones déboisées était neuf fois plus élevée que dans les forêts naturelles. En octobre 1999, des événements pluvieux extrêmes affectèrent une province du Mexique, et provoquèrent de nombreux mouvements de terrain. Une analyse diachronique de l'occupation des sols effectuée par Alcantara-Ayala et al. (2006) a montré une très forte réduction de la végétation (70 %) entre 1989 et 1999, due à la déforestation. Or, 72 % des glissements de terrain enregistrés se sont produits dans des zones de très faible densité de végétation. La disparition des forêts semble donc très néfaste pour la stabilité des versants.

Cependant, l'effet d'ancrage est **limité par la profondeur des racines**. Pour cette raison, Berger et al., dans leur *Guide de gestion des forêts de protection contre les risques naturels dans les Alpes du Sud françaises* (2006a), pensent que la forêt ne peut maîtriser que les glissements d'une profondeur inférieure à 2 mètres. Ils concluent également que sur un glissement déclaré, la forêt n'a que des effets négatifs en augmentant les capacités d'infiltration et l'écoulement hypodermique ; et que dans tous les cas, l'action de la forêt reste limitée par la pente (40°).

D'autre part, le système racinaire est accusé de déstabiliser les sols car il crée des **cheminements préférentiels pour l'eau d'infiltration**. Et les effets de cette infiltration sont aggravés en fonction de la stratigraphie du milieu : si le pendage des couches est conforme à la pente, l'eau infiltrée circule dans le sens de la pente, ce qui favorise le glissement du terrain (Rice, 1977) (figure 3).

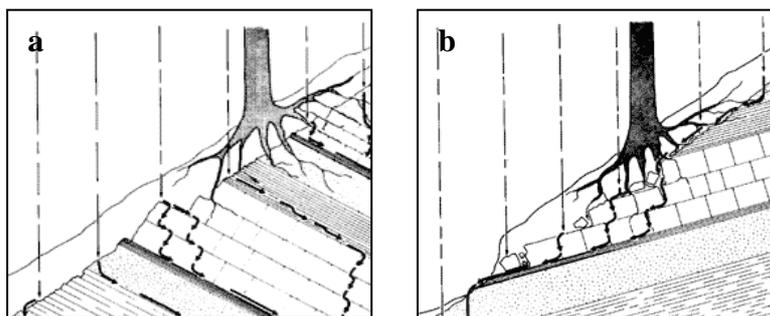


Figure 3 : Cheminement de l'eau dans le cas d'un pendage non conforme à la pente (a) et conforme à la pente (b) (Rice, 1977)

La forêt, quand elle vieillit, est davantage sensible au vent, qui peut **déraciner les arbres et perturber le sol** (fissures). Ces chablis créent des zones d'infiltration privilégiée. L'action amplifiée du vent suite au déboisement de parcelles est une explication aux glissements déclenchés en bordure de coupes forestières à Vancouver (Jakob, 2000).

Enfin, le risque de surcharge des terrains par la forêt doit être évoqué, en tant qu'effet négatif « logique ». Pourtant, ce risque est quasi inexistant : un peuplement de montagne, d'une densité de 500

tiges à l'hectare, équivaut à une couche uniforme de bois de seulement 4,5 cm d'épaisseur à l'hectare (Mazet-Brachet, 1984). Cette couche, comparée à l'épaisseur d'un glissement profond, est négligeable. Le poids de la forêt est donc loin d'influencer de façon significative la stabilité des talus naturels.

En conclusion, force est de constater que la recherche sur les interactions entre végétation arborée et glissements de terrain fait encore débat à l'heure actuelle. Le tableau 1 résume les effets positifs et négatifs de la forêt sur les glissements de terrain évoqués dans ce paragraphe, tout en sachant que cette liste n'est pas exhaustive et que certains effets sont plus complexes qu'expliqués précédemment.

Actions de la forêt	Effets positifs	Effets négatifs
Actions sur la datation des glissements de terrain	- Datation précise des glissements de terrain - Mise en évidence des périodes d'activité de glissement/des variations climatiques	- Analyse plus difficile selon les processus (glissements lents et dont la surface de glissement est parallèle à la pente du terrain : arbres peu touchés) - Analyse des cernes plus difficile selon les espèces (feuillus)
Actions sur le cycle de l'eau	- Réduction de l'énergie pluviale : protection du sol - Réduction de l'énergie du ruissellement superficiel - Evapotranspiration : rôle de pompe	- Accumulation de matériaux détritiques susceptibles de glisser - Augmentation de l'infiltration et de l'écoulement hypodermique : matériau humide davantage susceptible de glisser - Evapotranspiration limitée dans le temps
Actions mécaniques sur les sols	- Ancrage des sols : augmentation de la résistance au cisaillement	- Ancrage limité par la profondeur des racines et par la pente - Augmentation de l'infiltration autour des racines - Action du vent - (Surcharge des terrains)

Tableau 1 : Effets positifs et négatifs de la forêt sur l'activité de glissements de terrain

B. Objectifs de la recherche et démarche méthodologique

1. Le contexte scientifique dans le bassin de Barcelonnette

Dans une optique de prévention du risque de glissement de terrain, une partie des travaux des géomorphologues du CERG et du laboratoire GEOPHEN porte sur le concept de **susceptibilité aux glissements**. Il s'agit de la corrélation spatiale qui existe entre la distribution des glissements sur un territoire donné et des facteurs environnementaux de prédisposition (Thiery et al., 2001). L'occupation des sols est un de ces facteurs. Mais les recherches n'intègrent pas sa dimension **temporelle**, aucune étude sur l'évolution de la forêt et de l'occupation des sols dans le bassin de Barcelonnette n'a donc été réalisée jusqu'à présent. L'analyse du lien entre activité de glissement de terrain et dynamique de végétation n'a pas non plus été effectuée.

De plus, si des recherches ont été menées sur les caractéristiques hydromécaniques des sols marneux instables (Malet et al., 2003), aucun essai n'a été réalisé pour tenter de caractériser le sol sous forêt, et suivant le type d'essences forestières.

Enfin, la dendrogéomorphologie a été peu utilisée dans le bassin. Quelques sondages ont été réalisés sur des secteurs ponctuels, à titre exploratoire essentiellement (Kirschoffer, 1994). Des études complètes ont été menées, mais elles sont anciennes (Braam et al., 1987a, b)

Ce travail de fin d'études se situe donc **dans le contexte de l'état actuel des connaissances sur le lien entre végétation et glissement de terrain, dans le présent contexte du bassin de Barcelonnette, et enfin dans le cadre du projet GACH2C.**

2. La méthodologie développée

La démarche méthodologique développée pour le travail de recherche est présentée sur la figure 4.

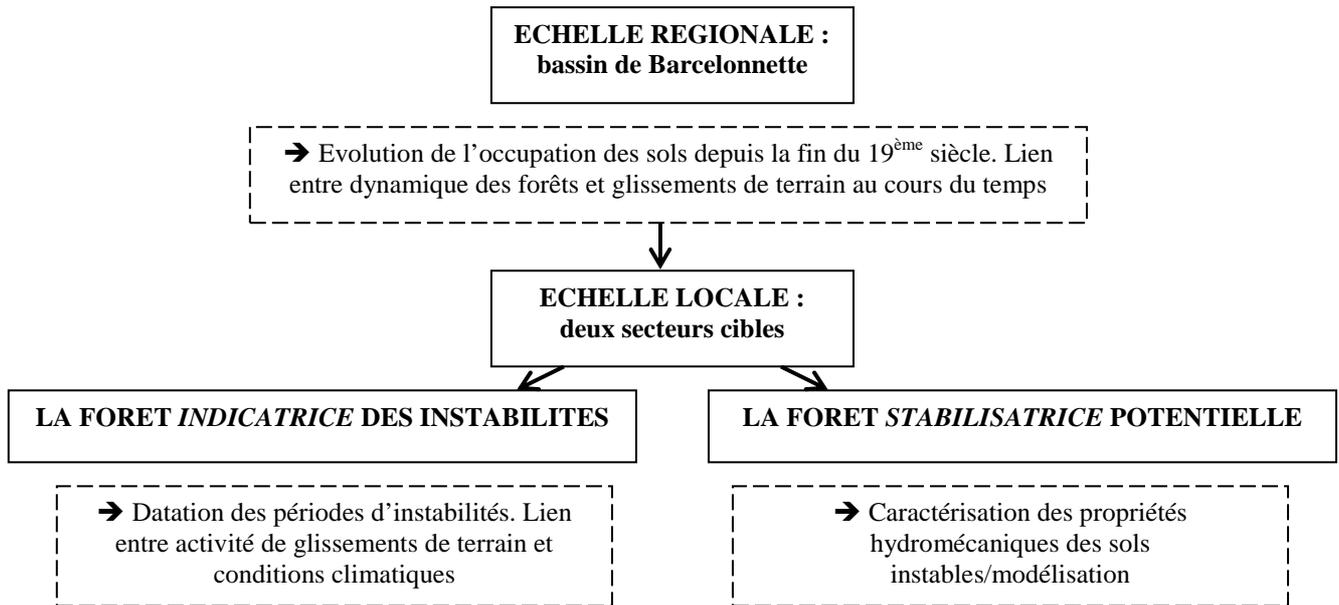


Figure 4 : Organigramme de la méthodologie développée pour le travail de recherche

Cette méthodologie se base sur deux principes :

- **Une analyse à deux échelles** : l'échelle « régionale », celle du bassin de Barcelonnette, et l'échelle « locale », sur deux secteurs cibles, choisis car représentatifs des diversités de végétation et de géomorphologie du bassin
- **L'étude de la végétation arborée pour deux rôles** : la forêt « indicatrice » de l'activité géomorphologique d'un versant, et la forêt « stabilisatrice » (ou non ?) d'un versant

La démarche et les objectifs aux deux échelles d'analyse sont :

- Echelle régionale : caractériser l'occupation des sols dans le bassin de Barcelonnette. Retracer son évolution depuis la fin du 19^{ème} siècle. Confronter **dynamique de la végétation arborée et activité de glissements de terrain au cours du temps (1)**
- Echelle locale : grâce à une étude dendrogéomorphologique, **dater les périodes d'instabilités**. Analyser s'il existe un lien entre conditions climatiques et instabilités (2) ; **déterminer les caractéristiques hydromécaniques des sols instables**, et les intégrer dans un modèle de versant.

Les objectifs (1), (2) et (3) et les résultats associés sont développés dans les deux prochaines parties de ce mémoire, après la description du site de Barcelonnette et des données disponibles.

C. Le site d'étude : le bassin de Barcelonnette

1. Localisation et présentation du site

Le bassin de Barcelonnette est situé à l'extrémité Nord du département des Alpes de Haute Provence. Ce tronçon du cours moyen de l'Ubaye est enclavé, entre les massifs montagneux des Ecrins, du Queyras et du Mercantour. La rivière Ubaye prend sa source à 2655 m d'altitude et rejoint après 80 km environ le lac de Serre-Ponçon et la Durance. Orientée Est-Ouest, l'Ubaye marque la limite entre l'adret, versant orienté Sud, et l'ubac, versant orienté Nord. Six communes composent le bassin, d'une

superficie totale de 250 km² : Saint Pons, Barcelonnette, Faucon-de-Barcelonnette, Jausiers, Enchastrayes et Uvernet-Fours (figure 5). La population est de 5600 habitants, mais elle peut atteindre plus de 15000 habitants pendant les saisons touristiques. L'économie est centrée sur les loisirs (ski, camping, etc.) et l'agriculture. Une petite activité industrielle ainsi que de services existent également.

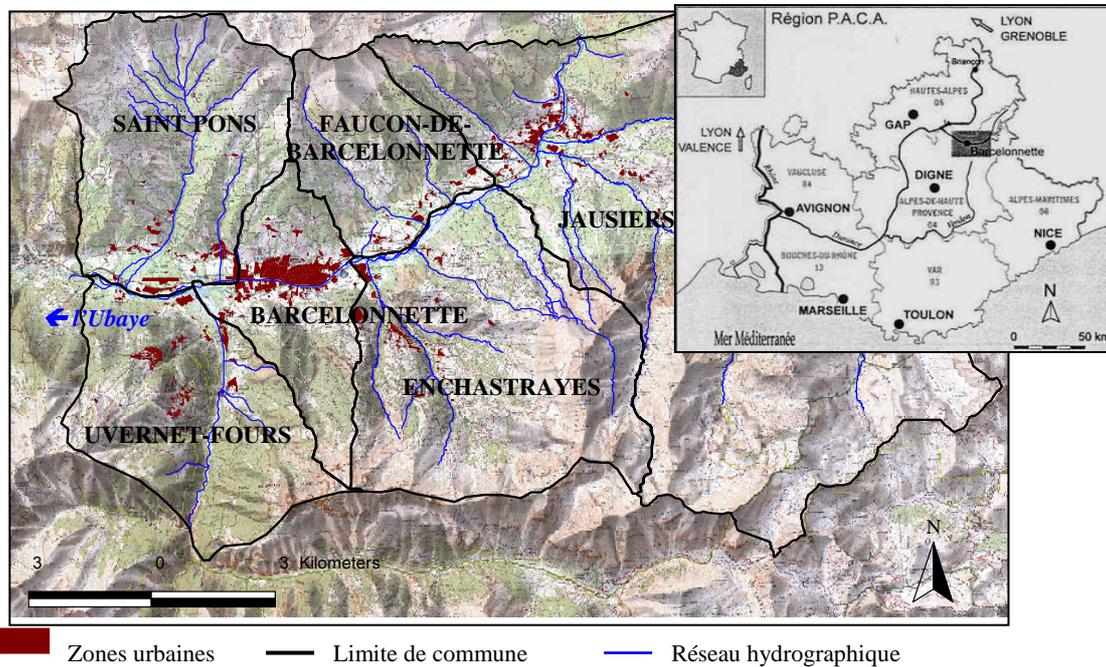


Figure 5 : Localisation du bassin de Barcelonnette
(Source : fond topographique IGN 1 :25,000^e, 2000)

2. Contexte géologique

De vastes processus d'érosion ont créé la **fenêtre de Barcelonnette**, ample dépression laissant apparaître un soubassement autochtone, à travers différents faciès allochtones superposés par des nappes de charriage (Weber, 2001).

L'autochtone correspond aux « **Terres Noires** », roches sédimentaires déposées à l'ère secondaire. Mélanges de calcaire et d'argile, elles sont meubles et friables et donc très sensibles à l'érosion (figure 6). Leur complète imperméabilité (Delsigne, 1999) explique l'apparition de certains glissements de terrain dans le matériau en contact. Les marnes constituent un soubassement de 250 à 300 m d'épaisseur, surmonté par deux **nappes de charriage de l'Embrunais-Ubaye** (Autapie et Parpaillon). Elles sont composées principalement de flyschs, alternance de grès, de calcaires et de marnes qui se débite en feuillets (Esmiol, 2004). Enfin, les glaciers quaternaires qui se sont retirés ont laissé une **couverture morainique** qui masque dans le bassin une grande partie des affleurements marneux, sur des épaisseurs de 1 à 20 m (Malet, 2003). Les dépôts glaciaires sont très souvent affectés par des mouvements superficiels, à cause de leur capacité de rétention en eau élevée. L'annexe 1 fournit une carte simplifiée de la géologie du bassin.



Figure 6 : Terres Noires en amont de Faucon-de-Barcelonnette (cliché F. Arnaud, mai 2007)

3. Climat

Le régime des précipitations rattache le bassin de Barcelonnette au **climat méditerranéen** : un printemps (mai, juin) et surtout un automne (septembre, octobre, novembre) pluvieux, séparés par un été (juillet) et un hiver (février) secs. Le climat est également **montagnard**, avec des froids hivernaux intenses et une température moyenne annuelle de 7,3 °C (figure 7). Comme en basse Provence, les totaux pluviométriques annuels restent inférieurs au mètre (716,3 mm). Les mois d'octobre et novembre représentent à eux seuls près du quart (23 %) des totaux pluviométriques annuels. La durée d'enneigement est d'environ trois mois versant adret, et quatre mois versant ubac (Delsigne, 1999).

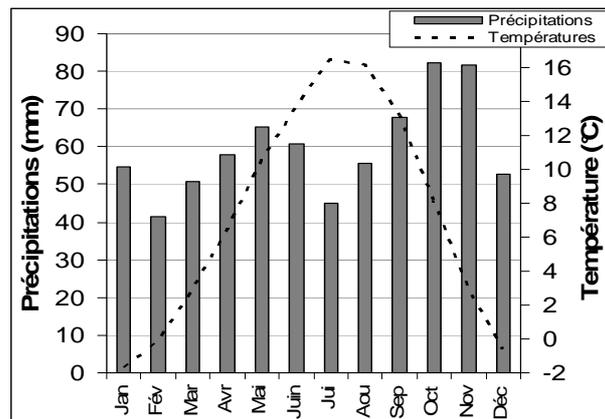


Figure 7 : Précipitations (période 1928-2004) et températures (période 1961-1993) moyennes mensuelles interannuelles. Station de Barcelonnette (altitude 1155 m)

La région est marquée par l'occurrence de **violents orages durant l'été**, susceptibles de provoquer des laves torrentielles. Celles-ci peuvent être également causées par une fonte des neiges subite, en particulier sur les versants adret, plus ensoleillés que les versants ubac (Sivan, 2000). L'adret est en effet le territoire de torrents pouvant être dévastateurs, comme les torrents du Riou Bourdoux, des Sanières, de Faucon et du Bourget (figure 8). Enfin, le bassin de Barcelonnette présente une amplitude thermique diurne élevée, de 15,3 °C en moyenne (Delsigne, 1999). Ce phénomène accélère la fracturation des roches par la répétition de cycles de gel/dégel, et fournit une **abondante charge en matériaux pour les glissements de terrain et les torrents**.

4. Un paysage modifié par l'homme - premier aperçu de l'évolution de la végétation

Dans le bassin de Barcelonnette, la dynamique de la végétation est étroitement liée à la présence humaine particulièrement forte. Les défrichements pour l'installation des populations et la mise en culture des versants furent constants au cours de l'histoire ; ils connurent un maximum au début du 19^{ème} siècle, correspondant à une forte pression démographique et à une augmentation de l'activité agropastorale. Or, entre 1550 et 1850 intervint le « Petit Age Glaciaire », refroidissement climatique au cours duquel les fluctuations climatiques furent exagérées (Chondroyannis, 1992). Ces fortes perturbations, combinées au défrichement intense, entraînèrent une reprise brutale de l'activité des torrents. La progressive dégradation des terrains par les processus de laves torrentielles et d'érosion dans de nombreuses régions de montagne, et en particulier dans le bassin de Barcelonnette, conduisit l'Etat à mettre en œuvre un vaste programme de **Restauration des Terrains en Montagne** à partir de 1882. Un travail bibliographique a été effectué pour comprendre les contextes scientifique, politique et humain de ces travaux qui marquèrent le paysage et les populations de la région. Le compte-rendu de ces recherches est fourni en annexe 2. Il faut noter que les reboisements ont été effectués pour lutter contre **l'érosion des versants**, et non contre les glissements de terrain. Les connaissances dans ce domaine étaient encore restreintes à l'époque. On ne peut donc déterminer à partir de l'étude d'écrits anciens quelle était l'activité de glissements de terrain au 19^{ème} siècle de secteurs aujourd'hui boisés. C'est une donnée importante à prendre en compte dans la réalisation de cette étude.

A la fin du 19^{ème} siècle, le bassin de Barcelonnette connaît une dépopulation, causée par l'émigration pour les activités industrielles et par les guerres mondiales. Les terres labourables et les canaux d'irrigation, régulant la circulation des eaux dans le milieu, sont alors abandonnés (Koehle 1994, Musset et al., 2005). Ces modifications sont à l'origine de la **reprise de l'érosion et de l'augmentation des glissements de terrain**, dans un contexte géologique favorable aux instabilités.

D. L'activité de glissements de terrain dans le bassin de Barcelonnette

Les laves torrentielles ont été citées en I.C.3. Quelques chutes de blocs sont également observées dans le bassin. Les autres processus géomorphologiques peuvent être groupés en quatre types (tableau 2).

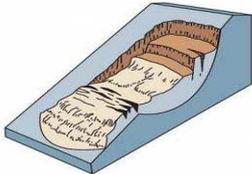
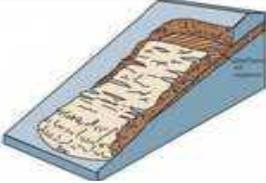
Type de mouvement	Description
Solifluxion	 <p>Mouvement lent de matériaux plastiques sur faible pente, qui résulte d'une déformation gravitaire continue d'une masse de terrain non limitée par une surface de rupture clairement identifiée</p>
Glissement-coulée	 <p>Glissement complexe évoluant en coulée de débris : déplacement en masse, lent ou rapide, d'un mélange hétérogène de matériaux meubles et rocheux selon une ou plusieurs surfaces de cisaillement localisées</p>
Glissement rotationnel (superficiel)	 <p>Déplacement en masse, lent, de sols cohérents (marnes ou argiles) le long d'une surface de cisaillement curviligne</p>
Glissement translationnel (superficiel)	 <p>Déplacement en masse, lent, de sols cohérents (marnes ou argiles) le long d'une surface de cisaillement plane ou complexe</p>

Tableau 2 : Les différents types de mouvements de terrain dans le bassin de Barcelonnette

(MATE/MATL, 1999, Walstra, 2006)

Les glissements-coulées sont des phénomènes de moyenne profondeur, voire très profonds (plusieurs dizaines de mètres), et sont localisés au niveau de talwegs anciens. Il en existe trois dans le bassin : Poche, Super-Sauze et la Valette, ce dernier dominant la ville de Barcelonnette au Nord-Ouest.

Les glissements de terrain rotationnels et translationnels, qui constituent l'objet de cette étude, sont des glissements de versants observés dans des dépôts morainiques, colluviaux, ou au niveau du contact avec l'autochtone, le long de discontinuités.

La figure 8 présente la cartographie des mouvements de terrain dans le bassin de Barcelonnette, issue d'inventaires réalisés par des géomorphologues du CERG et de l'Université d'Utrecht. **601 mouvements de terrain** sont répertoriés ; ils présentent des dimensions très variées, d'une superficie de 10^{-3} ha à 75 ha. Au total, c'est **8 % de la superficie totale du bassin** qui est affectée par des mouvements. Les glissements rotationnels et translationnels représentent **80 %** de la superficie instable totale (annexe G). Sur la figure 8 sont localisés les deux secteurs choisis pour une étude à l'échelle locale. L'activité géomorphologique de ces secteurs est évoquée davantage dans le détail en troisième partie de ce mémoire.

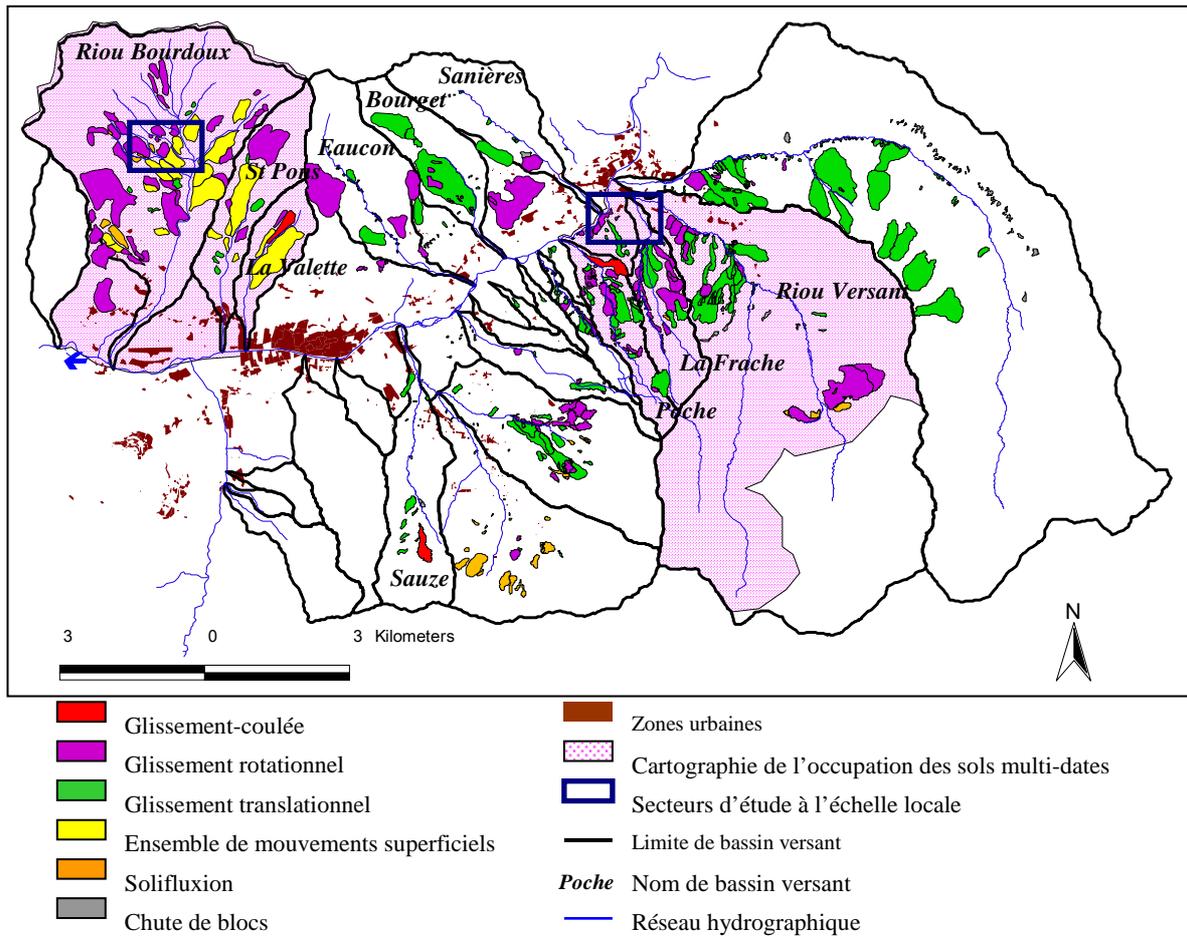


Figure 8 : Cartographie des mouvements de terrain dans le bassin de Barcelonnette (Sources : inventaire des glissements de terrain Y. Thiery 2002, Université d'Utrecht 1988)

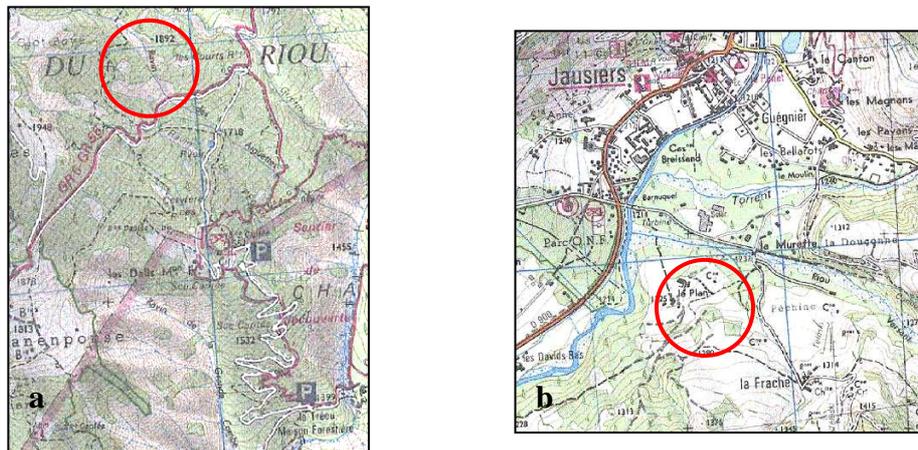


Figure 8' : Localisation des secteurs des Aiguettes (a) et du Plan (b)
(Source : fond topographique IGN 1 :25,000^e, 2000)

Le contexte scientifique et physique du bassin de Barcelonnette ayant été dressé, la deuxième partie présente une étude à l'échelle régionale de la relation entre glissement de terrain et végétation arborée. Dans un premier temps, l'analyse spatiale et temporelle de l'occupation des sols permet de mettre en évidence la dynamique de végétation dans le bassin. Dans un deuxième temps, une analyse fine de l'activité de glissements de terrain est effectuée en fonction des paramètres du milieu, et s'attache notamment à montrer un éventuel lien entre évolution de l'occupation des sols et activité géomorphologique.

DEUXIEME PARTIE

Analyse de la relation entre glissements de terrain et végétation arborée à l'échelle régionale

Préalablement au développement des résultats, le tableau 3 synthétise les données qui étaient à disposition et qui ont permis la réalisation des diverses analyses de cette étude.

Thème	Description de la donnée	Echelle	Date	Source
Photographies	Orthophotographies : bassin de Barcelonnette		2000, 2004	Institut Géographique National
			1974, 1982	Inventaire Forestier National
	Photographie aérienne non orthorectifiée : secteur du Plan		1948	Institut Géographique National
Glissements de terrain	Inventaire (carte) : partie Ouest du versant adret	>1 :10,000 ^e	1988	Université d'Utrecht
	Inventaire (carte) : versant ubac et partie Est du versant adret	1 :10,000 ^e	2002	CNRS/CERG (Y. Thiery)
Occupation des sols	Occupation des sols (carte) : partie Est du bassin	1 :5,000 ^e	2000	CNRS
	Types de formation végétale (carte) : bassin de Barcelonnette	>1 :10,000 ^e	1999	Inventaire Forestier National
	Peuplements forestiers (carte) : forêt domaniale du Riou Bourdoux	1 :10,000 ^e	1996	Office National des Forêts
	Suivi de chaque parcelle (carte) : forêt domaniale du Riou Bourdoux	1 :10,000 ^e	1970-2007	Office National des Forêts
	Travaux de reboisement (ouvrages)		1841-1931	Office National des Forêts
Topographie	Modèle Numérique de Terrain : partie Est du bassin	Pas de 10 m	2002	CNRS
	Cartes topographiques	1 :10,000 ^e 1 :25,000 ^e	2000	Institut Géographique National
Analyse dendrogéomorphologique	Glissement de terrain des Aiguettes		1987	Braam et al.
	Glissement-coulée de Poche		1994	S. Kirschoffer
Données générales	Base de données sous SIG. Rapports techniques, mémoires		1977-2007	CNRS, Restauration des Terrains en Montagne, ONF

Tableau 3 : Description des données disponibles

L'étude de la dynamique de la forêt dans le bassin de Barcelonnette nécessite en premier lieu une compréhension de l'*actuelle* occupation des sols. Le travail cartographique a été effectué sur la base des photographies de la dernière mission de l'Institut Géographique National, en 2004.

A. L'occupation des sols dans le bassin de Barcelonnette en 2004

Une cartographie de l'occupation des sols a été réalisée en 2000 par le CNRS, dans le cadre du projet européen ALARM (Assessment of Landslide Risk and mitigation in Mountain areas, 2001-2004). La cartographie actuelle couvre une superficie plus grande et indique le type de peuplements forestiers.

1. Travail cartographique

Une image satellite multispectrale, issue de la fusion entre une image Landsat TM et une image SPOT P a été analysée pour produire la cartographie, au 1 :10,000^e. Celle-ci a été affinée au 1:5,000^e par interprétation d'orthophotographies de 2000 fournies par l'Institut Géographique National, dans l'environnement SIG ArcView 3.1. La nomenclature se décline en cinq grands ensembles et dix

classes, sur la base de la nomenclature CORINE Land Cover (tableau 4). Pour mieux correspondre à la problématique de l'étude, elle a été simplifiée ; sa description est fournie en annexe 3.

Ensembles	Classes
A. Forêts et milieux naturels	1. Forêt de conifères dense 2. Forêt de conifères peu dense 3. Forêt de feuillus 4. Prairies et pelouses
B. Territoires agricoles	5. Cultures permanentes
C. Affleurements rocheux	6. Roches nues ou sols nus 7. Marnes noires
D. Territoires artificialisés	8. Territoires artificialisés
E. Surfaces en eau	9. Cours d'eau et plans d'eau 10. Alluvions

Tableau 4 : Nomenclature simplifiée de la cartographie d'occupation des sols dans le bassin de Barcelonnette en 2004

La cartographie de 2000 couvrait une superficie de **13740 ha**. Elle a été étendue à la partie Ouest du bassin et couvre à présent une superficie de **19150 ha**. L'extension a été réalisée à partir d'orthophotographies de 2004, la qualité étant supérieure à celles de 2000 ; dans la perspective d'une cartographie multi-dates, l'occupation des sols de 2004 est considérée comme étant la même qu'en 2000, les grands ensembles (forêts, affleurements rocheux, territoires artificialisés) n'ayant pas évolué. La cartographie de l'occupation des sols dans le bassin de Barcelonnette est fournie en planche 1.

Dans le cadre de l'étude, il est important de pouvoir **distinguer les types de peuplements forestiers**. Les espèces de feuillus n'ont pas été distinguées, étant donné leur très faible superficie par rapport à l'ensemble des forêts (6,4 %). Pour information, les essences les plus rencontrées sont le hêtre, le chêne pubescent et le peuplier tremble (Chondroyannis, 1992). On rencontre les feuillus mélangés aux forêts de conifères, ou en petites formations dans les prairies et près des zones urbanisées.

L'**Inventaire Forestier National** est un organisme qui a en charge l'inventaire permanent des ressources forestières nationales, indépendamment de toute question de propriété (MAP/IFN, 2006). Pour les besoins de l'étude, le CNRS a commandé à l'IFN la **cartographie des types de formation végétale** dans le bassin. Moins précise que celle du CNRS, elle a été croisée avec les couches « forêts », de manière à conserver la précision des contours. La cartographie de l'IFN compte 27 types différents, elle a été simplifiée et renseigne sur la répartition des essences listées dans le tableau 5, et cartographiées en planche 2. Chaque essence présente des caractéristiques d'enracinement, de régénération, etc. qui lui est propre (Chondroyannis, 1992, Rameau et al., 1993) et qu'il est nécessaire de prendre en compte dans le cadre de cette étude. Si certaines essences sont citées tout au long du mémoire, les caractéristiques de chacune d'elles sont synthétisées en annexe 4.

Essences forestières	Nom latin
1. Mélèze	<i>Larix decidua</i>
2. Feuillus	<i>Quercus pubescens, Fagus sylvatica, etc.</i>
3. Pin sylvestre	<i>Pinus sylvestris</i>
4. Pin à crochets	<i>Pinus uncinata</i>
5. Pin noir	<i>Pinus nigra</i>
6. Pins indifférenciés	
7. Sapin-épicéa	<i>Abies alba - Picea abies</i>
8. Conifères indifférenciés	

Tableau 5 : Essences forestières cartographiées dans le bassin de Barcelonnette

Une **analyse statistique de la cartographie de l'occupation des sols** permet de déterminer la répartition spatiale des différentes classes en fonction de l'altitude, de l'exposition et de la pente. Celles-ci sont dérivées du **Modèle Numérique de Terrain**, étendu à la partie Ouest du bassin.

Remarque préliminaire : les analyses ne tiennent pas compte de la *densité* des peuplements forestiers, la nomenclature simplifiée des essences étant le résultat d'un regroupement de classes de végétation de

différentes densités (« futaie », « boisement lâche », etc.). La description de l'IFN ainsi que la simplification de la nomenclature de l'IFN sont fournies en annexe 3.

2. Analyse spatiale de l'occupation des sols

Dans le bassin de Barcelonnette, les altitudes s'étendent de 1000 m à 3100 m. L'altitude moyenne versant ubac est de **1868 m**, et de **1737 m** versant adret. Les pentes moyennes des deux versants sont de **24°**. 69 % du bassin a une pente inférieure à 30°. L'orientation principale du versant adret est Sud/Sud-Est, celle du versant ubac est Nord/Ouest (annexe 5).

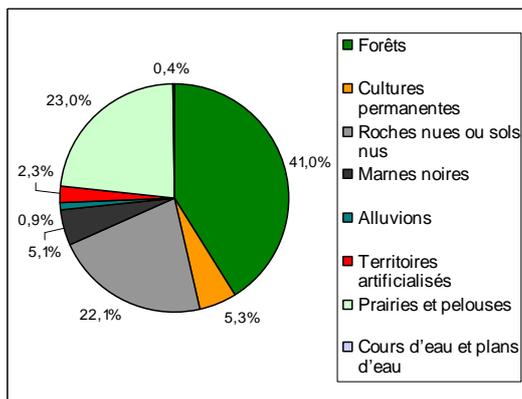


Figure 9 : Pourcentage des classes d'occupation des sols dans le bassin

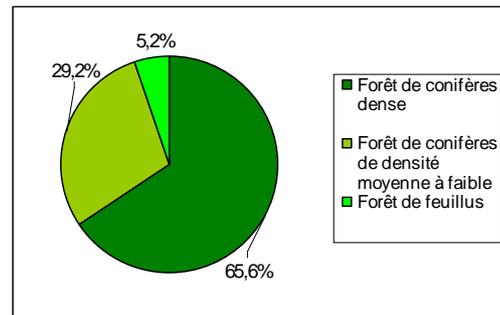


Figure 10 : Types de forêts dans le bassin, en pourcentage de la superficie totale de forêts

La superficie de forêts dans le bassin de Barcelonnette est très importante (41 %) (figure 9), avec majoritairement des conifères (figure 10). La présence humaine reste limitée (2,3 %), mais l'homme exploite le milieu, par une activité agricole (cultures, pâturages) soutenue (28,3 %). Les tendances de répartition sont les mêmes pour les deux versants, avec quelques différences au sein des classes : notamment, il y a davantage de territoires artificialisés versant ubac, il s'agit des stations de ski qui se sont implantées sur ce versant à l'ombre, plus longtemps enneigé.

On estime qu'un adret reçoit 8 à 10 fois plus de chaleur qu'un ubac (Chondroyannis, 1992). Les essences, sensibles aux conditions d'ensoleillement et d'humidité, ne se répartissent donc pas de la même manière sur les deux versants : l'adret est le territoire des pins, l'ubac est celui du mélèze (figure 11), essence de lumière, mais qui a besoin de sols bien alimentés en eau (Esmiol, 2004). L'ubac abrite également sapin et épicéa, exigeants en humidité. Le pin sylvestre, avec son fort pouvoir colonisateur, s'accommode de tous les environnements et n'a pas d'exposition privilégiée.

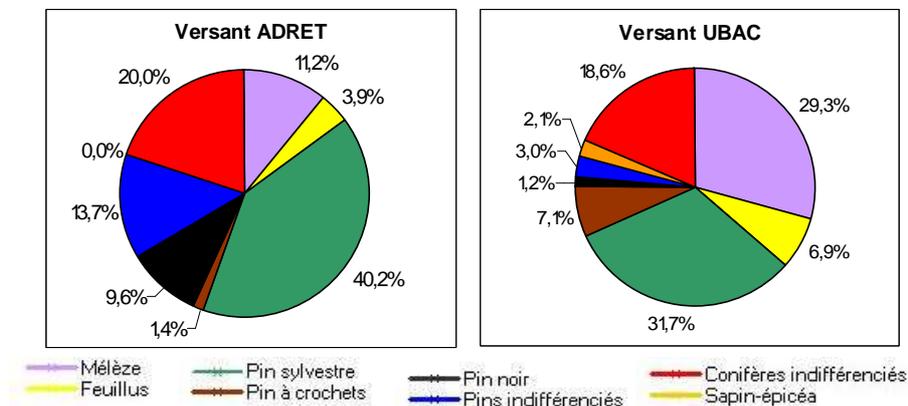


Figure 11 : Essences forestières dans le bassin, en pourcentage de la superficie totale de forêts

La diminution de la température avec l'altitude conditionne également la répartition des essences ; la période de végétation raccourcit de 8 à 4 mois entre 1000 et 2000 m (Chondroyannis, 1992), et chaque essence a ses exigences propres quant à sa période de végétation. Ainsi, on observe :

- **Un étagement de la végétation**
- **La disparition des forêts au-dessus de 2500 m environ** (étages alpin et nival) : la limite altitudinale des feuillus est de seulement 1900 m
- **La dominance des résineux** : ils renouvèlent leurs aiguilles sur plusieurs années, et peuvent s'accommoder d'une période végétative plus courte.

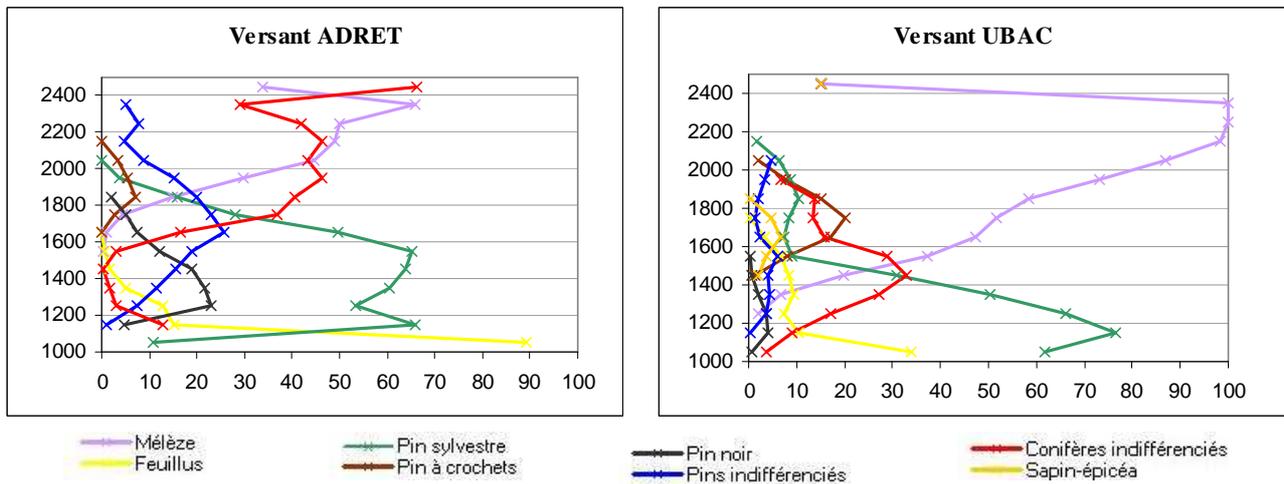


Figure 12 : Répartition des essences, en pourcentage de la superficie de chaque tranche d'altitude

La figure 12 met en évidence l'étagement de la végétation : les basses altitudes, de 1000 à 1200 m (étage collinéen), sont colonisées par les feuillus et par le pin sylvestre. Jusqu'à 1800 m environ (étage montagnard), l'adret est dominé par le pin sylvestre et le pin noir d'Autriche, essence capable de coloniser les marnes, et ayant donc été introduite en France pour les travaux de reboisement. Au-delà de 1800 m (étage subalpin), l'adret présente une population de pins à crochets, essence qui tolère des climats extrêmes et qui accepte une courte période de végétation. L'étage est dominé par le mélèze ; sa limite altitudinale est plus élevée versant adret que versant ubac, ceci est dû à l'ensoleillement plus important (annexe 5). Les altitudes mises en évidence sont assez bien représentatives de l'étagement de la végétation dans les Alpes du Sud (Chondroyannis, 1992, Fischesser, 1982). Toutefois, il est évident qu'à une échelle plus locale les essences sont d'abord sensibles aux microclimats.

Enfin, les forêts sont présentes sur **tous les types de pentes**. Notamment, pin noir, pin à crochets, sapin et épicéa colonisent les pentes élevées, entre 25 et 35°, jusqu'à celles supérieures à 40° ; le pin à crochets est l'essence pionnière sur les versants raides d'éboulis. Le mélèze privilégie les couloirs d'avalanche, mais il craint la concurrence, d'où une faible présence sur les pentes raides (annexe 5).

La répartition de la végétation arborée dans le bassin de Barcelonnette est ainsi conditionnée par les facteurs physiques du milieu. Aujourd'hui, la couverture forestière est particulièrement étendue ; elle est le résultat d'une évolution depuis le 19^{ème} siècle, abordée dans le paragraphe suivant.

B. La dynamique de la végétation depuis le début du 20^{ème} siècle

Avant les années 50, peu de documents renseignent sur la superficie du couvert forestier dans le bassin, hormis quelques plans et photographies. Mais si ils permettent de fournir un aperçu de l'état des forêts jusqu'à la moitié du 20^{ème} siècle, ces documents ne représentent pas la même information que des cartographies issues de la photo-interprétation. Une analyse grossière de la répartition des forêts avant 1950 est réalisée, et le travail cartographique est focalisé sur la période 1974-2004.

1. L'état de la forêt jusqu'à la moitié du 20^{ème} siècle

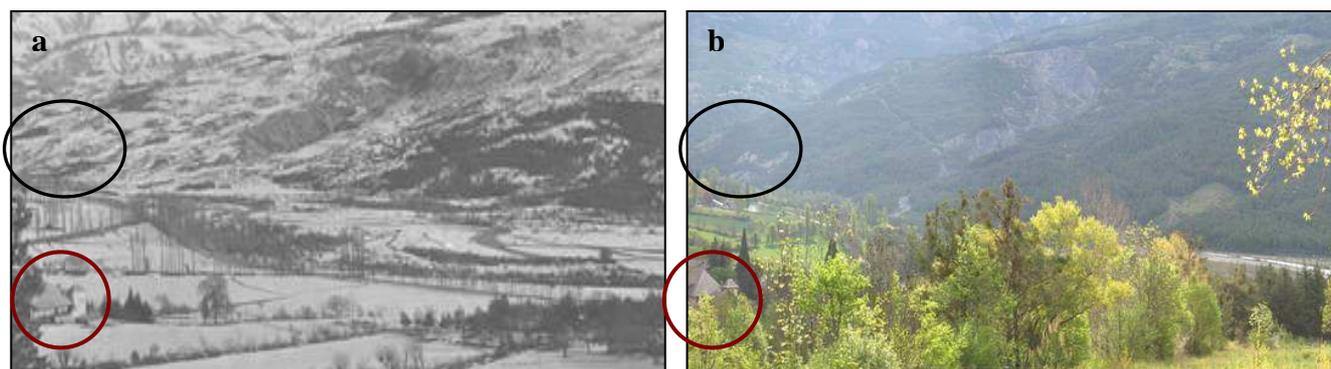


Figure 13 : Evolution de la forêt - glissement-coulée de Poche et secteur de la Frache. a : situation en 1924 (Cliché Mr. Borelli). b : situation en 2007 (Cliché F. Arnaud, avril 2007)

La figure 13 illustre assez nettement la déprise agricole opérée au cours du 20^{ème} siècle, autour du glissement-coulée de Poche. Les deux photographies, prises depuis le versant adret (repère entouré en rouge), à 80 ans d'intervalle, montrent la progression de la forêt sur des terres autrefois travaillées par l'homme. La zone entourée en noir localise le secteur du Plan, choisi pour des études locales (cf. III.).

Une analyse diachronique a également été effectuée dans le secteur du Plan et du glissement de Poche, à partir d'une photographie aérienne de 1948 et de la mosaïque orthorectifiée de 2004. Dans ce secteur, la superficie de forêts est passée de **11 % à 64 %** (annexe 5).

Enfin, la figure 14 indique la très importante progression de la forêt dans le bassin versant du Riou Bourdoux, entre 1881 et 2004, passant de **2 % à 47 %**. Si une partie des forêts est issue d'une colonisation naturelle (pin sylvestre, mélèze), cette progression est avant tout le résultat des travaux de reboisement opérés à partir de 1882. Le Riou Bourdoux est l'exemple de restauration le plus spectaculaire de France, avec environ 1000 hectares boisés et 2000 ouvrages construits. La zone entourée en noir localise le glissement des Aiguettes, choisi pour des études locales (cf. III)

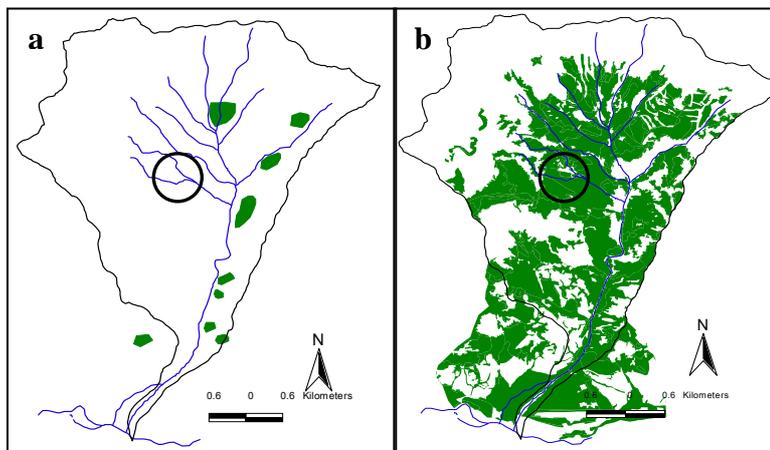
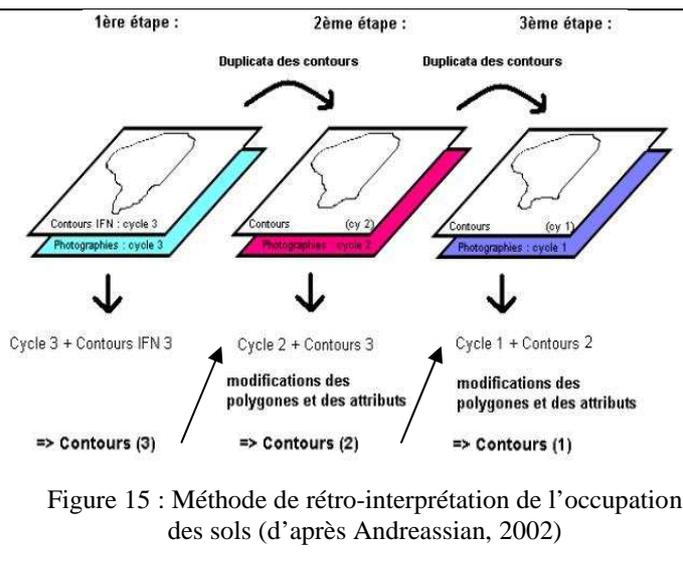


Figure 14 : Evolution de la forêt – bassin versant du Riou Bourdoux
a : situation en 1881 (Administration des forêts, plan d'ensemble, périmètre de St Pons). b : situation en 2004

2. L'évolution de la végétation entre 1974 et 2004

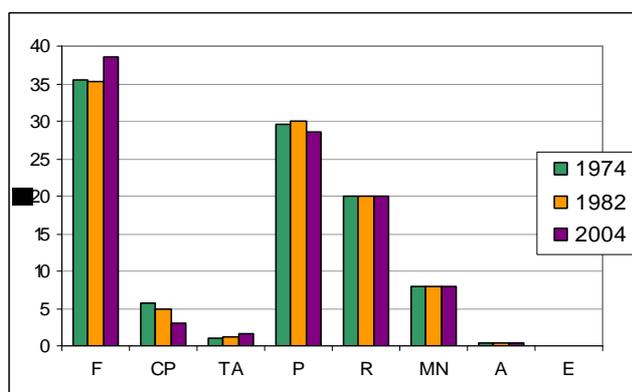
La cartographie des types de formation végétale fournie par l'IFN correspond à son dernier cycle d'inventaire (1999). Nous avons réalisé les cartes pour les deux premiers cycles (1974 et 1982), sur la base de la cartographie de 2004. Cette méthode de «**rétro-interprétation**» a été utilisée par Andreassian (2002) pour cartographier l'évolution du couvert forestier de bassins versants du Massif Central (figure 15). Elle consiste à partir de la cartographie d'occupation des sols du dernier cycle, et à modifier les contours des polygones en se basant sur l'interprétation des orthophotographies de 1974 et 1982.

La méthode a l'avantage de limiter les biais liés à la partialité du cartographe, en pratiquant une actualisation rétrospective des cartes plutôt qu'une nouvelle carte à chaque cycle. Cependant, l'analyse des résultats statistiques nécessite de tenir compte des erreurs d'interprétation lors de la cartographie, dues au fait que la qualité des orthophotographies de 1974 et 1982 était moins bonne que celle de 2004. Avec la méthode de rétro-interprétation, on considère que les différentes essences forestières colonisent le milieu de proche en proche, ce qui est assez bien représentatif de la réalité.



Pour une question de temps, les cartographies ont été réduites aux bassins versants de Poche, de la Frache et du Riou Versant (ubac), et aux bassins du Riou Bourdoux, de Saint Pons et de La Valette (adret), soit **35 %** de la superficie cartographiée en 2004 (figure 8).

Entre 1974 et 2004, la forêt a progressé, passant de **35,5 %** à **38,5 %** de la superficie des secteurs. Les territoires artificialisés ont progressé (0,6 points), les cultures ont reculé (2,6 points) (figure 16). La dynamique est plus importante entre 1982 et 2004 qu'entre 1974 et 1982 ; ce qui s'explique en partie par le nombre d'années plus faible entre les deux premières dates. La progression des forêts est liée à une **progression nette des forêts denses, et un recul des forêts peu denses** (figure 17).



F : Forêts CP : Cultures, TA : territoires artificialisés, P : Prairies, R : Roches nues, MN : Marnes, A : alluvions, E : Surface en eau

Figure 16 : Evolution des pourcentages de secteur occupés par une classe d'occupation des sols

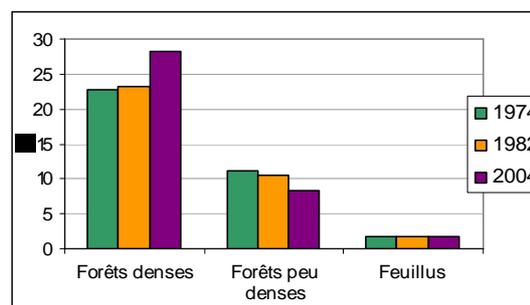


Figure 17 : Evolution des pourcentages de secteur occupés par la forêt

L'analyse plus précise de la variabilité d'évolution nécessite de croiser les occupations des sols aux trois dates. **Deux cartographies ont été réalisées, mesurant la progression et le recul de la forêt entre 1974 et 1982, et entre 1982 et 2004.** La *progression* correspond aux forêts peu denses devenues denses, et aux zones non boisées devenues boisées. Le *recul* est le phénomène inverse. Les cartes indiquent les phénomènes d'*urbanisation* (cultures ou pelouses devenues territoires artificialisés), de *déprise agricole* (cultures devenues prairies) et le phénomène particulier d'*apparition de glissement de terrain* (glissement de la Valette). Cette nomenclature peut être discutée : une prairie devenue forêt traduit également un processus de déprise agricole, mais le phénomène sera classé dans « progression de la forêt », le but premier étant de mettre en évidence l'évolution de la végétation arborée. Les deux cartographies sont visibles sur la planche 3.

L'analyse statistique montre notamment que **le secteur adret est plus dynamique que le secteur ubac** ; il connaît une progression et un recul de la forêt plus importants sur les deux périodes. Versant adret, on note un pic de recul de la forêt entre 1974 et 1982 vers l'altitude 1800 m, qui correspond au déclenchement du glissement de terrain de la Valette puis à son développement, sur des secteurs auparavant boisés ou en culture. Le recul s'observe également vers l'altitude 2100 m (coupe forestière), ainsi qu'en bordure de l'Ubaye (implantation d'une zone industrielle) (figure 18).

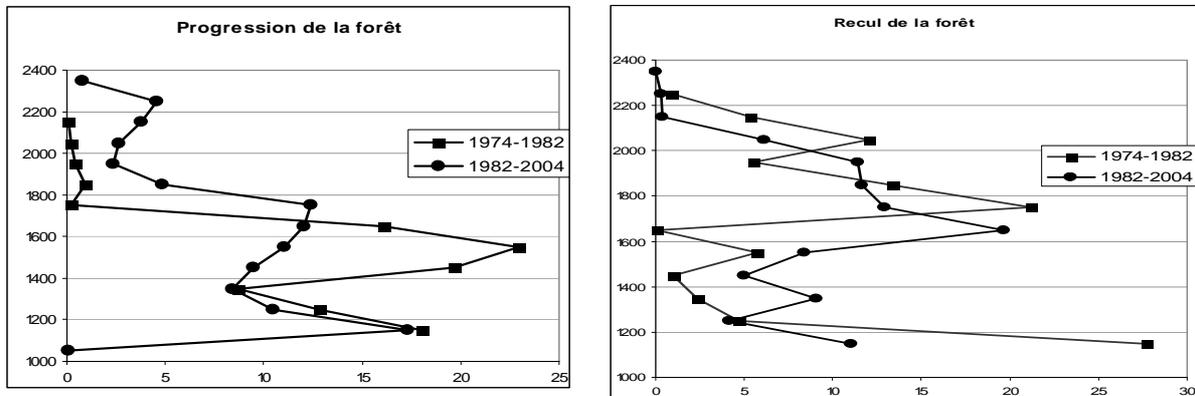


Figure 18 : Progression et recul de la forêt entre 1974 et 2004 en fonction de l'altitude, en pourcentage de la superficie totale d'avancée de la forêt pour chaque période (adret)

Enfin, on observe que c'est le **pin sylvestre** qui participe le plus à la progression des forêts entre 1974 et 2004. Mais ce résultat est logique, étant donné que c'est l'essence majoritaire dans le bassin. Si l'on considère l'évolution de la superficie de chaque essence (annexe 5), ce sont les « pins indifférenciés » qui présentent la plus forte dynamique (augmentation de 33,7 %). Le mélèze augmente de 8,7 %, tandis que le pin sylvestre n'augmente que de 5,5 %. L'étude plus approfondie de la dynamique de chaque essence supposerait de prendre en compte la *densité* des peuplements, et de traiter les ensembles « conifères et pins indifférenciés » ; les répartir entre les différentes essences modifierait à la hausse les superficies. Par contre, il serait difficile de modifier les cartes, ces ensembles étant par définition un mélange de différentes espèces.

La partie suivante propose de confronter évolution de la forêt et instabilités dans le bassin.

C. Evolution de la végétation et localisation des glissements de terrain dans le bassin de Barcelonnette

1. Discussion sur la fiabilité de la cartographie des glissements de terrain

Deux inventaires ont permis la réalisation de la carte des instabilités présentée en I.D. (figure 8) : l'un effectué au 1:10,000^e en 2002 par des géomorphologues du CERG dans le cadre du projet européen ALARM, à partir de l'analyse de photographies aériennes, de rapports techniques et d'observations de terrain, et l'autre effectué en 1988 par l'Université d'Utrecht (tableau 3). Les résultats obtenus dans ce paragraphe doivent donc tenir compte du fait que la cartographie a été réalisée à différentes dates, et par différents laboratoires n'utilisant pas les mêmes critères.

Notamment, le CERG définit quatre états d'activité de mouvements de terrain (tableau 6), alors que l'Université d'Utrecht n'en définit que deux : « actif », et « inactif latent ». Pourtant, l'état d'activité est le seul paramètre qui se réfère à la *datation* géomorphologique, sa définition est donc essentielle. En effet, hormis pour les processus brutaux et/ou spectaculaires, tels que les chutes de blocs ou les glissements-coulées, il est très difficile de dater une instabilité ; l'analyse dendrogéomorphologique à grande échelle étant longue, et évidemment limitée par l'âge des arbres. D'une manière générale, le recensement historique des aléas fait défaut.

Type de mouvement	Description
Actif continu	Actuellement en déplacement Formes du relief (niche d'arrachement, escarpements, fissures) fraîches et bien définies
Actif intermittent	A connu un déplacement dans les 12 derniers mois, mais est actuellement sans activité Formes assez fraîches et bien définies
Inactif latent	N'a pas connu de déplacement au cours des 12 derniers mois, mais peut être facilement réactivé Masse déplacée qui commence à retrouver sa couverture d'arbres, escarpements adoucis
Inactif ancien, fossile	S'est développé sous des conditions climatiques et géomorphologiques très différentes des conditions actuelles Formes très estompées, couverture forestière uniforme rétablie

Tableau 6 : Etats d'activité des mouvements de terrain définis par le CERG (d'après Maquaire, 2002)

A partir de l'état d'activité, Flageollet (1996) a proposé une **période de retour** pour dater approximativement les mouvements de terrain, dans une optique de cartographie temporelle de l'aléa (tableau 7). Pour « uniformiser » les informations de la cartographie, seuls les états « actif » et « inactif latent » ont été retenus. L'état « fossile » n'a pas d'intérêt dans le cadre de cette étude, qui porte sur l'évolution de la forêt depuis la fin du 19^{ème} siècle seulement.

Type de mouvement	Période de retour
Actif continu	< 1 jour. <i>Histoire récente</i>
Actif intermittent	< 1 an. <i>Histoire récente</i>
Inactif latent	1-10 ans, 10-100 ans, 100-1000 ans, selon la fréquence des réactivations <i>Histoire récente ou ancienne</i>
Inactif ancien, fossile	> 1000 ans. <i>Holocène, ou Pléistocène, ou Pré-Quaternaire</i>

Tableau 7 : Période de retour et âge associé à l'état d'activité (d'après Flageollet, 1996)

Par ailleurs, les zones instables n'ont pas été inventoriées selon les mêmes critères : l'Université d'Utrecht définit des mouvements « superficiels », sans indiquer leur nature. Le CERG distingue deux types de glissements rotationnels (« de berge » et « interfluves ») et translationnels (« complexes » et « coulées de débris »). Enfin, la cartographie semble présenter des lacunes, puisque certains glissements observables sur le terrain, d'une dimension pourtant non négligeable, n'ont pas été retenus (bassin versant du Riou Bourdoux).

Une uniformisation des deux inventaires nécessiterait une connaissance experte de l'aléa mouvement de terrain sur l'ensemble du bassin. Dans le cadre de cette étude, la cartographie n'a pas été modifiée, la fiabilité des résultats est donc limitée par sa précision. De plus, l'analyse est représentative de la réalité des processus seulement dans une certaine mesure : c'est dans chaque cas la superficie *totale* des glissements qui a été considérée. Or, en toute rigueur, c'est seulement l'escarpement du glissement qui est la zone dynamique de « déclenchement », contrairement au front du glissement (zone « d'accumulation ») (Thiery et al., 2007). Toutefois, réaliser cette nouvelle carte nécessiterait là encore une connaissance experte du terrain et des processus. L'approximation de considérer la totalité du glissement a donc été faite, tout en notant que si l'analyse devait être approfondie, les résultats seraient revus à la baisse.

2. Analyse spatiale de la répartition des glissements de terrain

Les chutes de blocs et les glissements-coulées n'ont pas été analysés. La solifluxion a été considérée, en tant que processus superficiel, même s'il ne s'agit pas d'un glissement de terrain au sens strict (cf. I. D). L'étude est focalisée sur les secteurs cartographiés entre 1974 et 2004.

L'analyse de la répartition des instabilités en fonction de l'exposition indique une **prédominance des instabilités sur les versants Sud** (annexe 5). Ce résultat doit être nuancé par la qualité de l'inventaire secteur adret : les superficies de glissements y sont beaucoup plus importantes que sur le secteur ubac, de toute évidence les instabilités n'ont pas été inventoriées selon les mêmes critères, ce qui limite encore la fiabilité de la carte.

On observe une distribution générale des types de glissements sur les pentes comprises **entre 15 et 25°**, malgré quelques variations pour les glissements translationnels. Les coulées de débris de berges se développent logiquement sur des pentes plus fortes que les coulées interfluves (20-25° contre 10-15°) (annexe 5).

Les instabilités sont présentes majoritairement entre 1400 et 2000 m d'altitude, avec un maximum de répartition dans **l'étage montagnard**. Notons enfin que **81 % des instabilités inventoriées dans le secteur adret sont latentes, contre 35 % dans le secteur ubac** (annexe 5).

3. Analyse spatiale et temporelle de la relation entre végétation et glissements de terrain

Une analyse statistique des zones instables en fonction de l'occupation des sols montre la **dominance des glissements de terrain sous forêt (64 %)**, en particulier sous forêts denses. Les **prairies** sont également le siège d'instabilités (26 %) (figure 19). **23 % de la superficie totale de pins sylvestres est instable**. On observe que les différents types de glissements ne présentent pas la même distribution, les glissements rotationnels et la solifluxion se développant davantage sur prairie que les autres types. Enfin, **les mouvements latents s'observent davantage sur prairie que les mouvements actifs**, et logiquement, les glissements actifs se développent davantage dans les affleurement rocheux que les glissements latents (annexe 5).

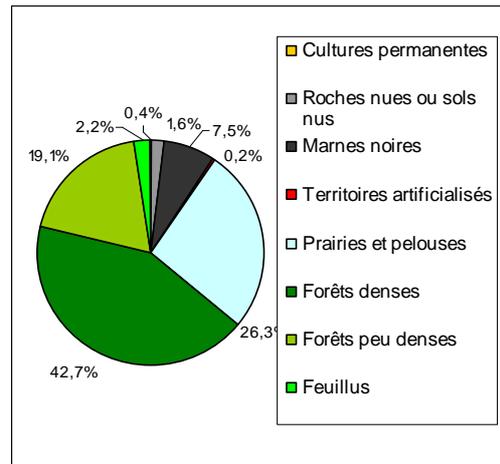


Figure 19 : Répartition des glissements en fonction de l'occupation du sol (adret+ubac)

Sur le seul secteur ubac, les contrastes sont plus forts : notamment, on constate **87 % de solifluxion sur prairie et 66% de glissements latents sur prairie**. Ces résultats ont sans doute davantage de valeur que des chiffres « moyens », étant donné la précision de l'inventaire secteur adret.

La forte occurrence de la solifluxion sur prairie peut s'expliquer par le fait que ce processus est une déformation du terrain non limitée par une surface de rupture clairement identifiée ; le phénomène a lieu majoritairement en proche surface, la végétation arborée peut donc jouer pleinement son rôle d'ancrage, d'où moins de solifluxion sous forêt. La forte occurrence des autres types de glissements sous forêt pose la question de **l'influence négative de la végétation arborée sur l'activité de glissements de terrain**. La présente analyse cartographique peut permettre de fournir des informations sur le lien entre **âge des forêts et activité de glissement**.

La carte de progression et de recul de la forêt entre 1982 et 2004 a été choisie pour être croisée avec la carte des glissements de terrain, la dynamique d'évolution entre ces 12 années étant plus forte qu'entre 1974 et 1982. Les tendances sont les mêmes pour les deux secteurs : **environ 80 % des glissements sont observés sur des zones qui n'ont pas évolué entre 1982 et 2004**. La superficie instable s'étant développé sur des zones de progression de la forêt est d'environ 14 %, plus élevée que la superficie instable sur des zones de recul de la forêt (autour de 2 %). On note **la présence plus importante de glissements actifs que de glissements latents** sur les zones de progression et de recul de la forêt (figure 20).

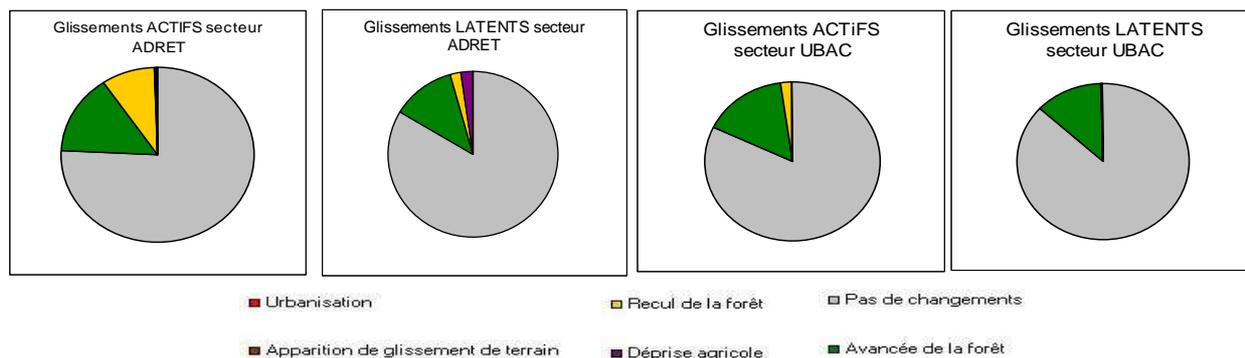


Figure 20 : Répartition des glissements actifs et latents en fonction de l'évolution de l'occupation des sols entre 1982 et 2004

Une explication possible est qu'une forêt « jeune » ne présente pas les caractéristiques d'ancrage suffisantes pour stabiliser des glissements de terrain en activité. De même, on comprend aisément les conséquences du recul de la forêt sur des zones propices à l'instabilité. Par ailleurs, le fort pourcentage de glissements de terrain sur les zones n'ayant pas évolué peut s'expliquer d'abord par la très grande superficie de ces zones sur les deux secteurs (88 %). Ensuite, elles présentent également des peuplements forestiers, qui eux sont anciens (reboisements à la fin du 19^{ème} siècle) ; ils sont donc susceptibles d'avoir augmenté la sensibilité du sol aux instabilités, en accumulant des matériaux détritiques de qualité médiocre ou en créant des chablis.

Le fait que les glissements latents s'observent moins dans les zones de recul ou de progression de la forêt que les glissements actifs montre qu'ils sont peu sensibles aux variations d'occupation du sol à court terme, leur période de retour étant de l'ordre de plusieurs dizaines d'années (tableau 7). Une étude plus complète consisterait à croiser la carte des glissements latents avec l'évolution des forêts avant 1974. Avec les informations disponibles dans le cadre de cette étude, on peut constater que la quasi-totalité des glissements de terrain, latents *et* actifs, observés dans le bassin du Riou Bourdoux sont présents sur des zones qui n'étaient pas boisées à la fin du 19^{ème} siècle. Mais on ne peut conclure si c'est le vieillissement des forêts qui a provoqué l'apparition des instabilités, ou bien si au contraire les forêts ont stabilisé les versants, étant donné que l'on ne dispose d'aucune information sur l'activité de glissements *avant* les reboisements.

La photo-interprétation s'avère être une méthode efficace pour déterminer la dynamique d'évolution des forêts à l'échelle du bassin du Barcelonnette, si l'on s'affranchit des quelques erreurs d'interprétation pouvant biaiser les résultats. L'analyse a montré la progression de la forêt entre 1974 et 1982. Toutefois, celle-ci ne peut être comparée à la progression très importante de la fin du 19^{ème} siècle avec les travaux de reboisement. L'évolution beaucoup plus modérée traduit les changements dans la politique de l'Office National des Forêts, qui depuis quelques dizaines d'années procède à peu de boisements, et favorise la régénération naturelle.

Si l'on a pu constater que les instabilités sont présentes majoritairement sous forêt, et que dans un certain pourcentage les glissements actifs se sont développés sous des forêts « jeunes », l'état actuel des informations n'a pas permis d'approfondir l'analyse du lien entre végétation arborée et mouvements de terrain à l'échelle régionale. Cela soulève les difficultés liées à la détermination de la dimension temporelle de l'aléa.

La troisième et dernière partie de ce mémoire propose d'étudier les instabilités à l'échelle locale. Une analyse dendrogéomorphologique tente de définir avec davantage de précision l'état d'activité de deux secteurs, en datant les mouvements du terrain. Enfin, les caractéristiques hydromécaniques des sols sont étudiées, et une simulation de l'instabilité des secteurs est réalisée à titre exploratoire.

TROISIEME PARTIE

Caractérisation de l'activité de glissement de terrain à l'échelle locale – Etude dendrogéomorphologique et analyse de la stabilité de versants en relation avec les caractéristiques de la couverture forestière

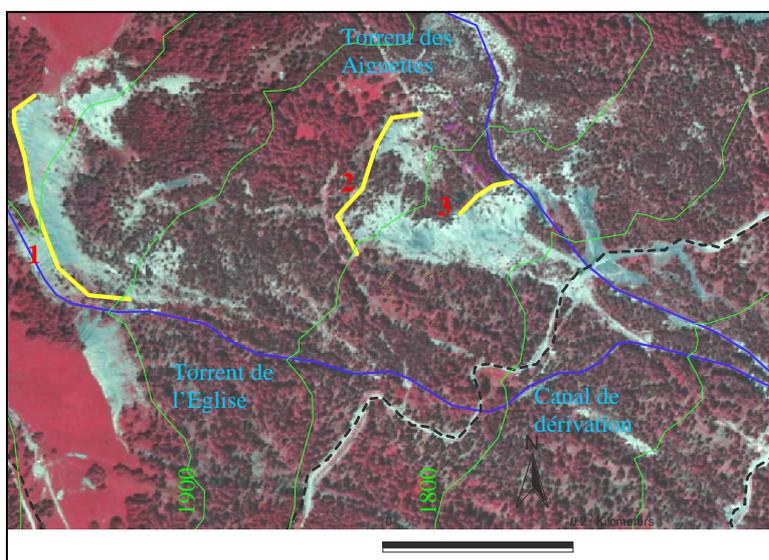
Les deux secteurs choisis pour cette étude à l'échelle locale présentent des conditions géomorphologiques et de végétation sensiblement différentes, qui justifient une analyse comparative.

A. Présentation des sites

1. Le secteur des Aiguettes (commune de Saint Pons)

Le glissement de terrain des Aiguettes, de type **rotationnel emboîté**, est situé en rive droite du torrent du Riou Bourdoux. D'après les sources locales, il aurait **plus d'un siècle**.

L'arrachement principal crée un abrupt d'une quarantaine de mètres (figure 21) dans un replat situé à l'altitude 1950 m. La niche d'arrachement secondaire (2) précède une vaste zone, très active, de terrains remaniés sur forte pente (supérieure à 25°), où de nombreuses sorties d'eau sont observées. Cette partie alimente en matériel grossier des coulées jusqu'à 1780 m (Légier, 1977). Enfin, la partie frontale présente des reprises d'activité, dues à l'érosion par le Riou Bourdoux (1450 m). Un contact anormal entre le flysch de la nappe du Parpaillon et les terres noires avoisine l'altitude 1900 m ; le glissement ne semble affecter que la **couverture glaciaire** (Stien, 2001). La route forestière passe au pied de la partie active, et doit être régulièrement entretenue. En 1910, un projet de drainage par rigoles avait été proposé, mais il n'a pas abouti car les fortes instabilités alimentaient les ravins en matériaux.



- Niches d'arrachement (primaire, secondaire, tertiaire)
- Réseau hydrographique
- Courbes de niveau
- Route forestière
- × Relevés GPS bordure Nord-Est
- × Relevés GPS bordure Sud-Ouest

Figure 21 : Partie amont du glissement de terrain des Aiguettes (orthophotographie 1982, IFN)

Dans les années 60, la conduite d'eau potable de la ville de Barcelonnette passant sur le secteur instable a été détériorée, un regard a été basculé.

Comme la quasi-totalité du bassin du Riou Bourdoux, **le secteur était dénudé au 19^{ème} siècle**. La partie active n'a pas été boisée ; aujourd'hui, la périphérie est une forêt dense, avec de nombreux arbres perturbés. La dynamique d'évolution semble être faible depuis les reboisements. D'après les photographies entre 1974 et 2004, la superficie de forêts n'a pratiquement pas évolué (figure 22).

Le glissement des Aiguettes a été choisi pour une analyse à l'échelle locale car il est bien connu des gestionnaires locaux et a fait l'objet de plusieurs études scientifiques ; Braam et al. (1987b) y ont effectué une étude dendrogéomorphologique. La présente analyse est donc l'occasion de valider les ces résultats. La partie Nord-Est est bordée par le torrent des Aiguettes ; c'est le secteur surplombant le

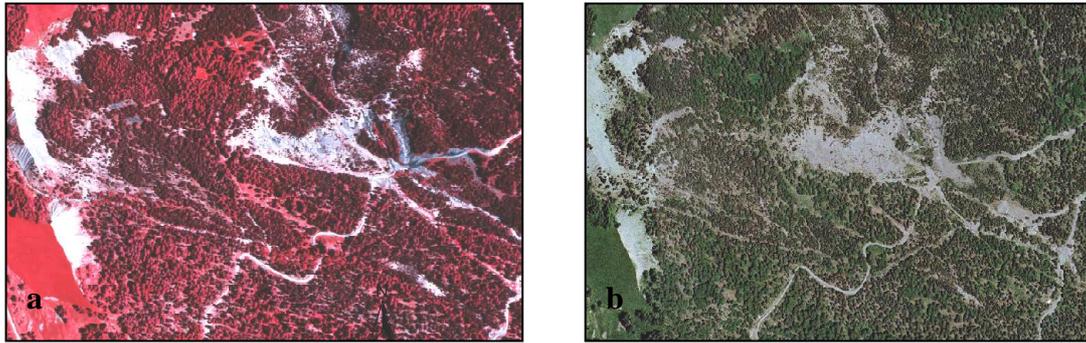


Figure 22 : Les Aiguettes en 1974 (a) et 2000 (b) (orthophotographies IGN/IFN)

torrent qui a été retenu, vers l'altitude 1850 m. La zone est composée d'un ensemble de petits escarpements, zones d'accumulation de matériaux remaniés et bourrelets. L'essence étudiée est le **pin à crochets**. Des prélèvements de sols ont également été effectués. En bordure Sud-Ouest, un autre secteur a été sélectionné pour étudier les propriétés du sol sous forêt de **mélèzes**. Pin à crochets (enracinement superficiel) et mélèze (enracinement profond) sont deux espèces que l'on rencontre dans les mêmes conditions de milieu. C'est une raison de plus qui justifie le choix de ce site. Une carte géomorphologique a été réalisée, elle indique la localisation au GPS des prélèvements (planche 4).

2. Le secteur du Plan (commune de Jausiers)

Le lieu-dit du Plan est situé au Sud de Jausiers, versant ubac, vers l'altitude 1300 m (figure 23). L'occupation des sols est donc très différente de celle des Aiguettes. Le site, au pied du versant de la Frache, en rive droite du torrent et du glissement-coulée de Poche, était autrefois cultivé. **Il n'a pas été reboisé au 19^{ème} siècle**. A présent, il connaît une déprise agricole (cf. II.B.1). La progression de la forêt est naturelle ; l'analyse de photographies aériennes depuis 1948 montre la colonisation des champs abandonnés par le **pin sylvestre** (figure 24). Des anciens drains témoignent de la maîtrise passée de la circulation des eaux. L'abandon des cultures, avec l'abandon des drains et du captage des sources, a favorisé la manifestation de glissements de terrain. On observe des sorties d'eau, des moutonnements, et les arbres sont courbés. Dans la partie Ouest, en contrebas d'une source non captée depuis une cinquantaine d'années, un glissement de terrain actif se développe, d'une longueur d'environ 500 m (Koehle, 1994). L'ensemble du secteur présente une **couverture morainique**.

La dynamique géomorphologique du versant a fait l'objet de plusieurs études (Koehle, 1994, Quintlé, 1995, Kirschoffer, 1994), qui justifient le choix du secteur du Plan. De plus, il a été retenu car il contraste fortement avec la morphologie des Aiguettes. Les pentes sont douces (inférieures à 15°), et les formes d'instabilités y sont moins marquées. L'intérêt de l'analyse dendrogéomorphologique est donc de comparer la dynamique a priori très différente de deux secteurs instables, pourtant soumis aux mêmes conditions

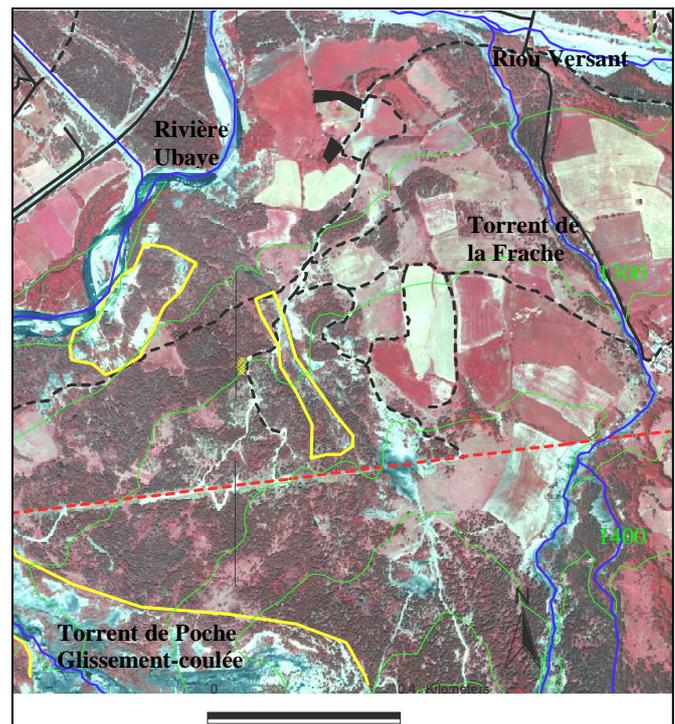


Figure 23 : Secteur du Plan (orthophotographie 1982, IFN)

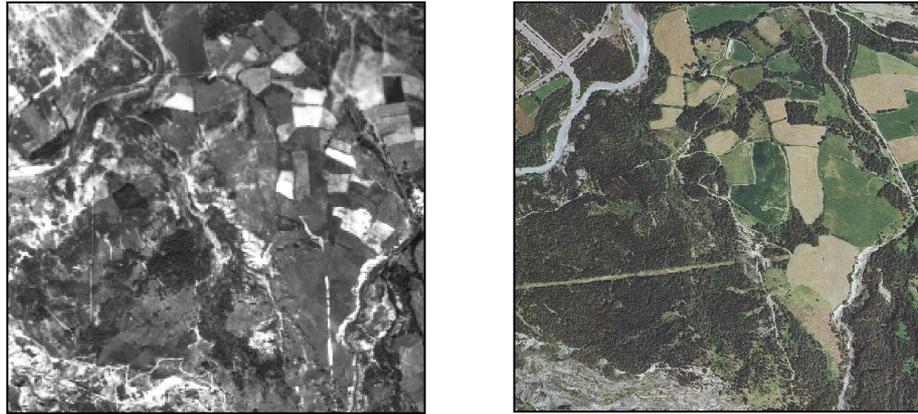


Figure 24 : Le secteur du Plan en 1948 (a) et 2000 (b) (photographies IGN)

climatiques. Un secteur correspondant manifestement à un mouvement superficiel (arbres courbés, bourrelets au sol, points humides) a été sélectionné. Les prélèvements de sol ont été réalisés sous forêt et sur prairie, de manière à mettre en évidence d'éventuelles différences de propriétés hydromécaniques. Une carte géomorphologique a été réalisée, elle indique la localisation au GPS des échantillons (planche 5). Le tableau 8 synthétise les données sur les deux secteurs, et les prélèvements qui ont été réalisés.

	Secteur du Plan (Jausiers)	Glissement de terrain des Aiguettes (Saint Pons)	
		Bordure Nord-Est	Bordure Sud-Ouest
Altitude	1330 - 1370 m	1830 - 1880 m	1820 - 1840 m
Superficie	110 * 170 m	40 * 110 m	40 * 70 m
Etat d'activité supposé	Latent : formes peu marquées	Actif : formes fraîches (escarpements, arbres basculés)	
Couverture du sol	Moraine	Moraine	
Dynamique de la forêt	Régénération spontanée sur les terres abandonnées	Boisements fin du 19 ^{ème} siècle. Quelques jeunes arbres ont colonisé la partie active du glissement	
Essence étudiée	Pin sylvestre	Pin à crochets	Mélèze
Dendrogéomorphologie	à 500 m du secteur cible	900 m du secteur cible	
Secteur stable de référence	1290 - 1310 m 40 * 40 m 14 arbres = 28 carottes	1990 - 2020 m 40 * 70 m 12 arbres = 24 carottes	
Secteur instable	27 arbres = 27 carottes	26 arbres = 26 carottes	(10 arbres = 10 carottes)
Prélèvements de sol (1 fosse, 2 horizons, 6 cylindres par horizon)	- Sur portion non boisée instable - Sur portion boisée instable	- Sur portion boisée instable	- Sur portion boisée instable

Tableau 8 : Caractéristiques des deux sites et prélèvements réalisés

B. Matériels et méthodes pour l'analyse dendrogéomorphologique

1. Principes généraux

L'analyse d'un secteur instable nécessite de s'affranchir du paramètre climatique (années de sécheresse ou de fortes pluies) qui peut modifier la largeur des cernes de croissance. L'étude dendrogéomorphologique requiert donc de choisir un **secteur de référence**, à partir duquel est constituée une **chronologie de référence**. Ce secteur *stable* correspond à la même essence, et est situé non loin du secteur instable à étudier, de manière à présenter les mêmes conditions climatiques et le même type de sol (figure 25).



Figure 25 : secteur du Plan. a : arbres droits, secteur de référence. b : arbre courbé, secteur instable (clichés F. Arnaud, avril 2007)

2. Prélèvement, préparation des échantillons et lecture des cernes

Les **carottes**, des « tiges » de bois de 5 mm de diamètre, sont le plus couramment utilisées pour l'analyse des cernes de croissance : elles sont extraites du tronc au moyen d'une **tarière de Pressler** (De Martin, 1974), cylindre creux en acier résistant à la torsion. Le prélèvement se fait en introduisant la tarière perpendiculairement à l'axe de l'arbre (figure 26). La carotte est extirpée de la tarière au moyen d'une tige-canal, et introduite dans une paille pour être protégée durant le transport. Les résineux cicatrisant vite, il n'est pas nécessaire de reboucher le trou après le prélèvement.

Les échantillons doivent être préparés avant d'être exploités en laboratoire. Ils sont collés sur des réglettes en bois et sont poncés pour faire ressortir tous les cernes (figure 27).

La mesure de la largeur des cernes fut effectuée avec la **chaîne de mesures dendrométriques LINTAB** au début du mois de mai au Cemagref de Grenoble. Un microscope binoculaire permet la lecture de l'échantillon, placé sur un plateau que l'on déplace au cours de la lecture et qui est relié à un ordinateur. Le logiciel d'analyse dendrochronologique TSAP-Win fournit alors pour chaque carotte le graphe de la largeur de chaque cerne, avec une précision de 0,01 mm (annexe 6).



Figure 26 : Sondage à la tarière de Pressler, secteur des Aiguettes (cliché F. Arnaud, avril 2007)



Figure 27 : Echantillons préparés (cliché F. Arnaud, mai 2007)

3. Démarche méthodologique pour l'analyse

La méthodologie développée est inspirée par Astrade (1998) et Saez Lopez (2006). L'interprétation des courbes de largeur de cernes nécessite un traitement préalable d'**interdatation**. Des erreurs pendant la lecture des cernes peuvent décaler d'une ou plusieurs années la date attribuée à chaque cerne. L'interdatation consiste à vérifier et à corriger la datation, par comparaison des carottes entre elles. Ce « calage » a été effectué avec le logiciel **CDendro**, qui se base sur des tests de corrélation pour synchroniser les courbes. Pour chacun des deux sites, la série de référence devant être parfaitement calée, deux carottes par arbre ont été prélevées (amont/aval et droite/gauche). Elles ont été interdatées pour obtenir une chronologie moyenne de référence, et les séries amont/aval de chaque arbre du secteur instable ont ensuite été calées sur cette série de référence. En annexe 6 est fourni un exemple de test de corrélation pour caler des échantillons.

Une fois les échantillons interdatés, un **indice d'excentricité IE** est mesuré, basé sur le **rapport entre la largeur du cerne aval et la largeur des cernes amont et aval** (Alestalo, 1971) :

$$IE = \frac{L_{aval}}{L_{aval} + L_{amont}}$$

IE est compris entre 0 et 1 : **au-dessus de 0,5**, il y a excentricité (largeur aval > largeur amont).

Enfin, les périodes d'activité mises en évidence grâce à l'analyse de l'excentricité sont comparées aux variations pluviométriques, afin d'établir un éventuel lien mouvement/précipitation.

C. Analyse dendrogéomorphologique

Le site des Aiguettes est étudié en premier lieu, puis une étude comparative est menée avec le site du Plan.

1. Analyse du site des Aiguettes

L'âge moyen des 26 arbres échantillonnés est de **100 ans**. La lecture des cernes confirme ainsi **l'apparition des forêts avec les travaux de reboisement**. La chronologie de référence a été construite à partir de 12 arbres pour lesquels les séries étaient les mieux corrélées entre elles (coefficient de corrélation moyen de 0,42). La figure 28 indique la largeur moyenne des cernes pour chaque année, de 1895 à 2006, sur le secteur de référence et le secteur instable.

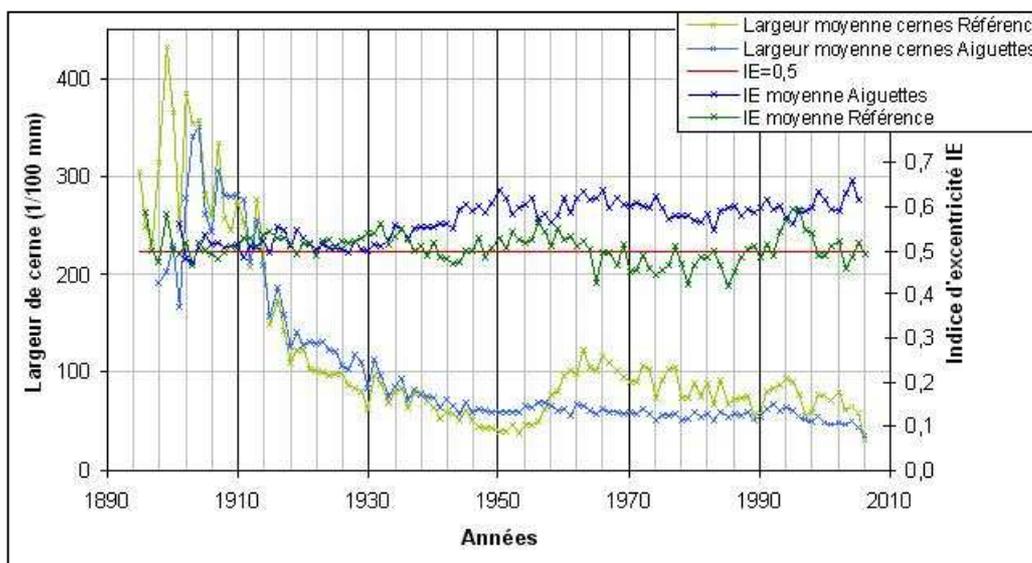


Figure 28 : Largeurs de cernes et indices d'excentricité. Série moyenne de référence et des Aiguettes

Les deux sites présentent la même tendance générale : une croissance rapide au cours des 15 premières années (largeurs de cernes élevées), qui se stabilise par la suite. Cette tendance est caractéristique de la croissance radiale des arbres. Mais il faut noter qu'elle est aussi influencée par le nombre d'échantillons, qui diminue avant 1900.

La figure indique également la variation des indices d'excentricité moyens. Sur le site de référence, l'indice pour l'ensemble de la période considérée est de 0,51 (écart-type de 0,03), **cela confirme la stabilité du secteur**. L'indice du secteur instable est par contre plus élevé (0,57, écart-type de 0,04), à partir de 1936 notamment. Cette date correspond peut-être à une **perturbation du secteur autre que climatique**. De même, le secteur de référence connaît une augmentation de croissance à partir de 1955, qui n'est pas observée sur le secteur instable. Cette différence brutale entre les deux courbes peut être le signe d'une mise en mouvement du secteur. La détermination des périodes d'instabilité est mise en évidence plus clairement avec l'analyse des excentricités *de chaque arbre*.

La courbe d'excentricité a été calculée et tracée pour chaque arbre, afin de faire apparaître le bois de réaction. La figure 29 présente les réponses enregistrées, en mettant en évidence les indices d'excentricité supérieurs à 0,5 et les indices plus élevés (supérieurs à 0,75). Au cours de la période considérée, **le secteur semble avoir connu de nombreuses instabilités**.

En considérant l'ensemble du secteur, la fréquence d'apparition des périodes d'excentricité d'une durée de plus de cinq années consécutives a été déterminée, ainsi que l'apparition des périodes d'excentricité élevée, d'une durée de plus de trois années consécutives. Parmi ces résultats, afin de tenir compte de la représentativité réelle du phénomène par rapport au nombre d'individus, seules les périodes concernant plus de 10 % des arbres ont été retenues. Ainsi, **entre 1900 et 2006, 12 périodes de forte réponse des arbres ont été mises en évidence** (figure 30).

Les résultats ont été pondérés ; un point a été attribué à un arbre avec un indice inférieur à 0,75, et deux points ont été attribués pour un indice supérieur à 0,75. Les résultats ne peuvent s'exprimer en pourcentage, étant donné qu'ils ne correspondent plus au nombre d'arbres mais à l'intensité de l'excentricité. Cette analyse fait ressortir les années où la réponse des arbres a été la plus forte, et donc **les années correspondant à une forte perturbation du terrain. 15 dates au total ont été retenues**.

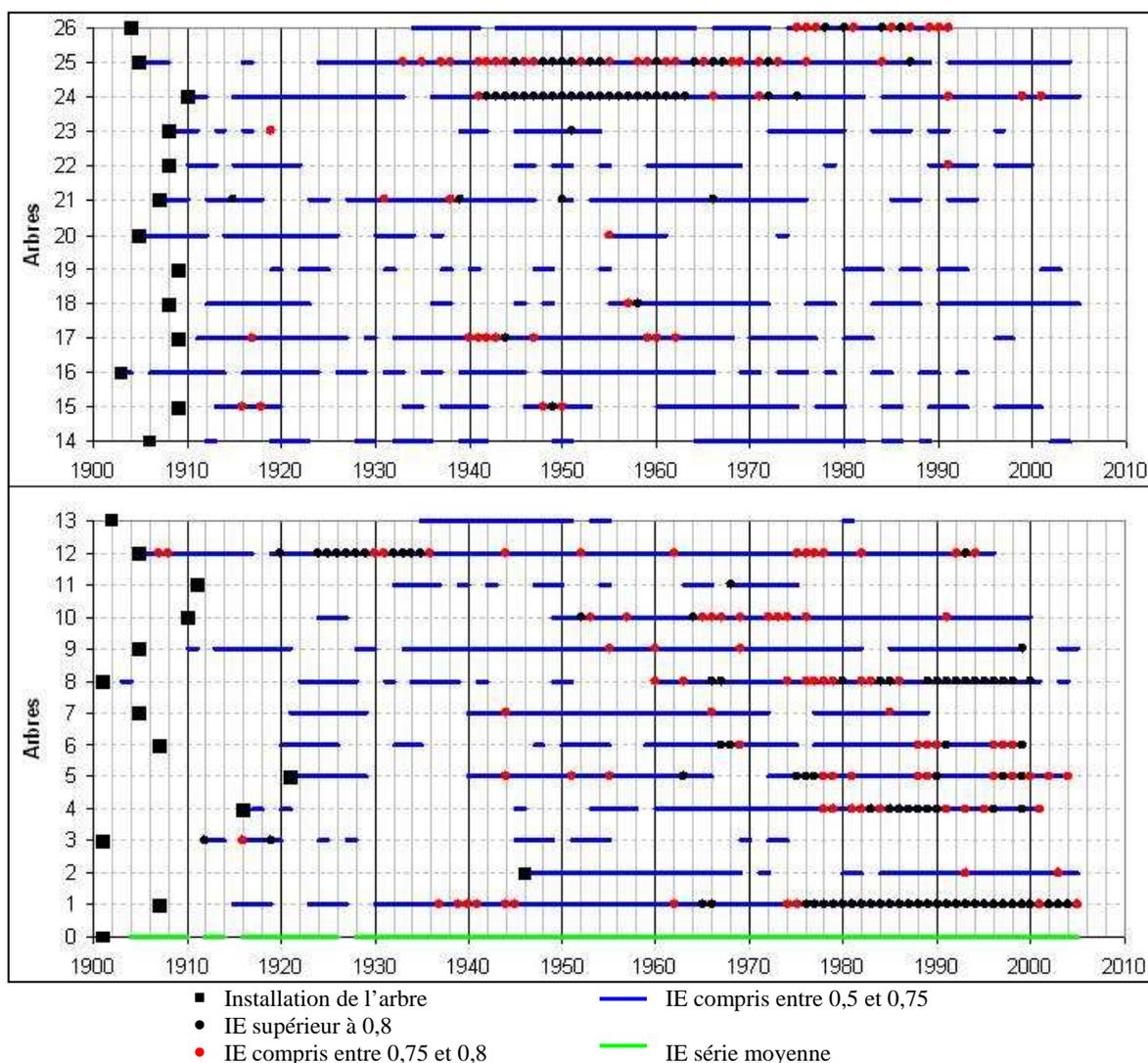


Figure 29 : Réponse des arbres du secteur des Aiguettes (indice d'excentricité IE)

Les résultats sont en accord avec les suppositions de perturbations vers 1936 et 1955 (périodes 1932-1937 et 1958-1960). De plus, **les résultats rejoignent l'analyse de Braam et al. (1987b)**, qui mettait en évidence les années 1924, 1940, 1960, 1964 et 1975

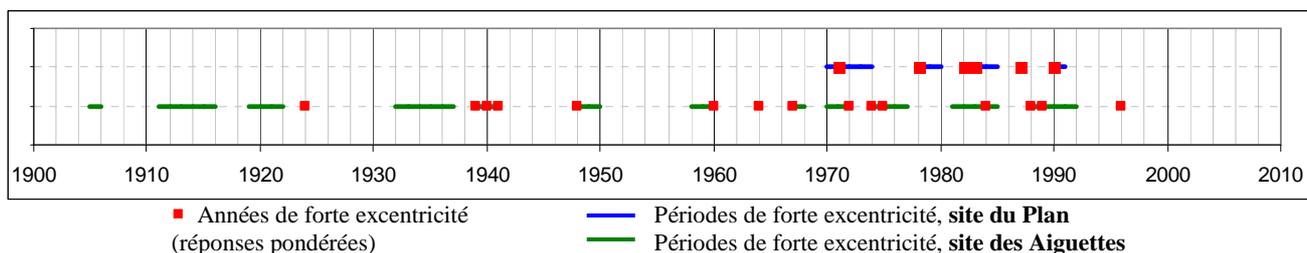


Figure 30 : Périodes et années de forte excentricité, sur les sites du Plan et des Aiguettes

L'analyse de la réponse de chaque arbre permet de souligner la variabilité spatiale et temporelle des instabilités (figure 29) : les arbres 19 et 21, situés en bordure directe de la niche d'arrachement « tertiaire » (figure 21), ne présentent aucune excentricité marquée au cours de la période étudiée ; de même pour l'arbre 22, situé en contrebas de la niche d'arrachement, dans la zone glissée. La faible réponse de ces individus montre que **la niche d'arrachement semble être restée stable au cours du siècle dernier**. Cela est confirmé par l'analyse cartographique de l'évolution de l'occupation des sols entre 1974 et 2004 (cf. II), qui n'indique pas de changement dans la position de l'escarpement.

D'une manière générale, on constate que les instabilités surviennent à partir des années où **des précipitations annuelles élevées (supérieures à la moyenne interannuelle) sont enregistrées** : la période instable 1932-1937 correspond à une période humide qui prend fin en 1937. La période 1958-1960 est humide également, tout comme les années 1939-1941, 1970-1972, 1974-1977 et 1996.

Certains mouvements peuvent se déclencher **à la suite d'une année particulièrement pluvieuse** : une lame d'eau supérieure au mètre en 1963 a précédé l'année 1964. Ce lien étroit pourrait valider l'année 1964 comme une année de mise en mouvement du site des Aiguettes, et correspond peut-être à l'année précise où la conduite d'eau potable a été détériorée.

Enfin, les autres périodes d'instabilité ne correspondent pas à une forte activité pluviométrique, ce qui montre sans doute les limites de l'analyse des totaux pluviométriques *annuels*. Des études menées dans les Alpes du Sud ont démontré l'importance des transports solides à partir de précipitations cumulées de l'ordre de **30 mm pour un seul événement** (Astrade et al., 1998). Le nombre d'événements annuels supérieurs ou égaux à 30 mm a été donc calculé, et on observe par exemple que l'année 1981 a connu 6 événements pluviométriques de ce type (la moyenne interannuelle étant de 3), ce qui pourrait expliquer les instabilités de 1981.

L'étude est à présent réalisée sur le site du Plan, qui semble présenter une dynamique de glissement tout à fait différente.

2. Analyse du site du Plan

L'âge moyen des 27 arbres échantillonnés est de **35 ans** seulement. Ce résultat confirme **la récente colonisation des terres autrefois en culture par les pins sylvestres**. La figure 33 compare les largeurs de cernes moyennes entre le site du Plan et le site des Aiguettes.

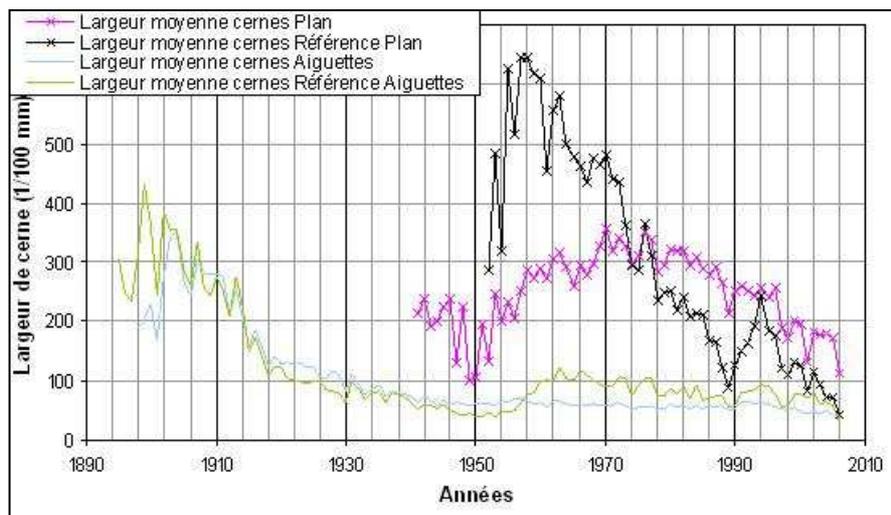


Figure 33 : Largeurs de cernes moyennes des sites du Plan et des Aiguettes

Les largeurs de cernes sont beaucoup plus élevées sur le Plan que sur les Aiguettes. Cette différence est certainement due à l'altitude, **la croissance des végétaux étant ralentie à mesure que l'altitude augmente**. On observe également que les vingt premières années de croissance, sur le Plan, sont peu exploitables ; les courbes ont été tracées à partir de trois ou quatre individus seulement pour cette période ; par ailleurs, quand l'arbre est jeune, les cernes n'ont pas une croissance régulière, il est donc en général préférable d'ignorer les premières années pour réaliser les analyses.

L'indice d'excentricité moyen du site de référence, construit à partir de 12 arbres pour lesquels les séries étaient les mieux corrélées entre elles (coefficient de corrélation moyen de 0,62), est de 0,51 pour l'ensemble de la période considérée. L'indice du secteur instable est de 0,54, **plus faible que celui des Aiguettes**. L'analyse de l'excentricité de chaque arbre a été effectuée. La figure 34 présente

les réponses de quelques arbres, et montre que **les arbres du secteur du Plan ont enregistré beaucoup moins d'excentricité que les arbres du secteur des Aiguettes.**

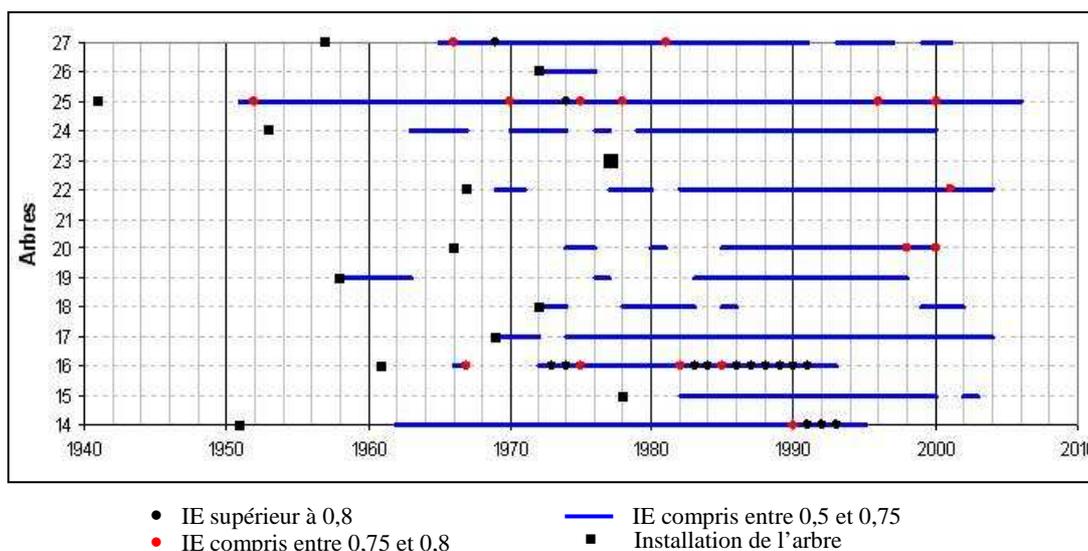


Figure 34 : Réponse des arbres du secteur du Plan (indice d'excentricité IE)

Seuls les arbres 14 et 16 ont enregistré des excentricités élevées (IE supérieur à 0,75) sur plus de trois années consécutives. L'arbre 16 est visible sur la figure 25 (III.B.1.) ; c'est à proximité de cet arbre qu'ont été prélevés les échantillons de sol.

Certains individus n'ont quasiment pas formé de bois de réaction, par exemple les arbres 26, 23, 9 et 4 (annexe 6). Ces observations semblent montrer que **le secteur du Plan présente une dynamique de glissement beaucoup plus réduite que le secteur des Aiguettes**, ce qui est cohérent avec les formes estompées repérées sur le terrain. L'analyse met néanmoins en évidence **4 périodes de réponse plus élevée entre 1941 et 2006, et 6 dates** (figure 30).

La figure 35 présente les hyétogrammes au pas de temps annuel des stations de Barcelonnette et Jausiers sur la période 1960-2004 (série de Jausiers, altitude 1240 m). On constate des précipitations relativement similaires entre ces deux stations, situées à quelques kilomètres de distance, **hormis les années 1974 et 1975 qui sont particulièrement sèches à Jausiers**, et qui n'ont pas engendré d'instabilités sur le site du Plan. Sur le site des Aiguettes par contre, ces deux années, humides à Barcelonnette, ont causé une forte excentricité. On constate que l'année 1970, particulièrement pluvieuse à Jausiers, correspond au démarrage d'une période d'instabilités de 4 ans (figure 30).

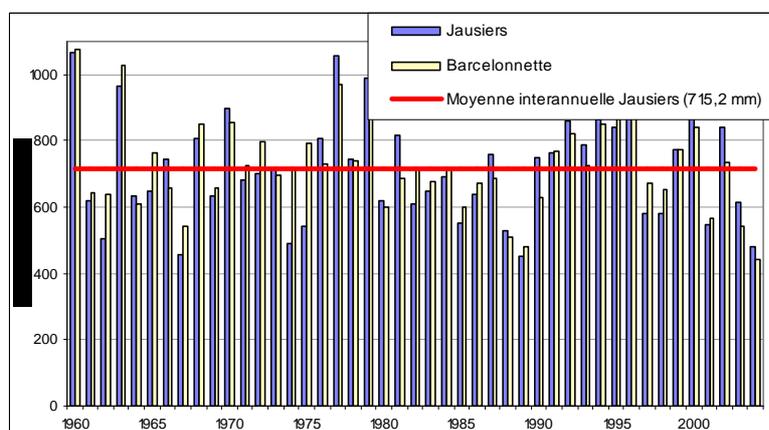


Figure 35 : Comparaison des hyétogrammes de Jausiers et Barcelonnette sur la période 1960-2004

La dynamique géomorphologique du site du Plan, tout comme celle des Aiguettes, semble donc être en étroite relation avec les conditions climatiques. Une analyse plus détaillée nécessiterait de différencier les saisons d'occurrence des évènements extrêmes, et de prendre en compte notamment le stock de neige, la fonte nivale s'ajoutant aux précipitations pour favoriser la saturation des sols et la mise en mouvement. On observe une relative concordance des instabilités entre les deux secteurs à partir des années 70. Le site des Aiguettes semble enregistrer davantage de mouvements depuis cette

période, mais une tendance à l'augmentation des instabilités dans l'ensemble du bassin de Barcelonnette ne peut être déterminée, étant donnée l'installation trop récente des arbres sur le secteur du Plan.

L'analyse réalisée sur les deux sites a donc permis de mettre en évidence de nombreuses périodes d'instabilités au cours du 20^{ème} siècle. Le secteur des Aiguettes pourrait être qualifié « **d'actif intermittent** », étant donné la fréquence des réponses enregistrées. Certaines périodes semblent être des signes précurseurs ou faire écho à des mouvements de plus grande ampleur sur le glissement. L'étude complète ainsi les résultats antérieurs, l'analyse réalisée dans le secteur de la Frache par Kirschoffer (1994) ayant seulement permis de déterminer l'âge des arbres et les périodes de variation de croissance. Dans un contexte plus large, les excentricités mesurées traduisent la forte instabilité des deux secteurs. Une étude réalisée sur un glissement de terrain dans l'Isère (Lopez Saez, 2006) donne des indices d'excentricité très rarement supérieurs à 0,75. Il serait nécessaire de procéder à d'autres comparaisons, de manière à déterminer avec davantage de précision l'état d'activité.

L'analyse dendrogéomorphologique semble être limitée par l'âge des individus : les excentricités enregistrées sur le secteur du Plan sont peut-être en partie biaisées par le jeune âge des arbres. D'une manière générale, il faut relativiser la valeur de la présente étude, une analyse plus fine des réponses enregistrées demanderait sans doute davantage d'expérience dans l'interprétation des cernes. Parmi les années d'instabilités mises en évidence, les plus fiables sont certainement celles correspondant à une forte excentricité, prolongée plusieurs années. Les mouvements brutaux et importants paraissant en effet plus facilement analysables avec la dendrogéomorphologie que des mouvements progressifs.

Pour évaluer la stabilité d'un secteur et prédire son évolution, des **modèles de versants** sont développés ; ils tiennent compte de la morphologie du terrain, des caractéristiques hydromécaniques du sol, des conditions climatiques et de végétation ; ainsi, les trois derniers paragraphes proposent d'étudier sur le site des Aiguettes et le site du Plan les propriétés hydromécaniques des sols, et de les intégrer dans un modèle de stabilité de pente, afin de déterminer, à titre exploratoire, quels sont les facteurs prédominants dans la mise en mouvement des secteurs.

D. Matériels et méthodes pour l'analyse des caractéristiques hydromécaniques des sols

Les caractéristiques **mécaniques** (cohésion, angle de frottement interne) et **hydrodynamiques** (conductivité hydraulique à saturation) des sols ont été étudiées en prélevant des échantillons dans des fosses pédologiques.

1. Fosse pédologique

Des **échantillons de sol non remaniés dans des cylindres de volume connu** (250 cm³) ont été prélevés au début du mois de mai. Une fois les horizons repérés et décrits, chaque cylindre est enfoncé dans le sol avec un marteau, dégagé, et le matériau dépassant du cylindre est enlevé au couteau (figure 36). Le cylindre est ensuite placé entre deux plaquettes de bois et fermé dans un sac isotherme afin d'entraîner le moins possible de modifications de l'humidité réelle du sol, jusqu'à son analyse en laboratoire. Le prélèvement d'échantillons représentatifs du terrain est une opération délicate, qui génère très souvent des erreurs (Musy et al., 1991). Ce fut le cas pour certains échantillons (présence de cailloux, de racines, cylindres pas remplis totalement). Les résultats issus de l'analyse sont donc très limités par la qualité des prélèvements (IV.D.). Six échantillons ont été prélevés pour chaque horizon : trois pour déterminer la cohésion et l'angle de frottement interne, et trois pour la conductivité hydraulique à saturation.



Figure 36 : Prélèvement d'échantillons de sol non remaniés dans une fosse pédologique (cliché F. Arnaud, mars 2007)

2. Cohésion et angle de frottement interne

Les sols présentent une **résistance au cisaillement**, qui est due aux frottements entre les grains (**angle de frottement interne Φ'** , en degrés), et aux forces d'attraction entre les particules (**cohésion c'** , en kPa). Ces paramètres caractérisent le comportement du sol à la rupture. En effet, il y a glissement du terrain lorsque la valeur de la contrainte de cisaillement τ dépasse une valeur maximale, fonction de la contrainte normale σ . Dans le plan de Mohr (σ, τ), la **courbe intrinsèque**, approximée pour les sols par une droite d'équation $\tau = c' + \sigma \cdot \tan \phi'$, délimite la zone de contrainte possible de la zone impossible à atteindre (Schlosser, 1992) (figure 37). Pour les sols fins, c' est la cohésion qui participe le plus à la résistance au cisaillement.

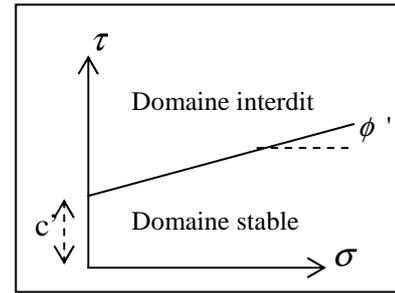


Figure 37 : Courbe intrinsèque (courbe de rupture) d'un sol

L'angle de frottement interne et la cohésion ont été déterminés grâce à des **essais de cisaillement direct**, réalisés selon la norme NFP 94-071-1 par l'Université d'Utrecht durant le mois de juillet. Les échantillons ont été préalablement tamisés à 400 microns, de manière à éliminer la fraction grossière et éviter d'obtenir de trop fortes oscillations durant les mesures. Les échantillons sont placés dans des boîtes en deux parties qui peuvent glisser horizontalement l'une sur l'autre. La face supérieure de l'échantillon est comprimée, selon un effort normal N . Au cours de l'essai, N est constant et on exerce un effort horizontal T croissant. A l'effort maximal T correspond la contrainte maximale de cisaillement, contrainte de rupture. Les valeurs de cette contrainte pour les différentes valeurs de N sont reportées dans le plan de Mohr, et on obtient ainsi la courbe intrinsèque de l'échantillon, avec les valeurs de c' et Φ' (Lickel, 2005).

3. Conductivité hydraulique à saturation

La conductivité hydraulique, ou **coefficient de perméabilité** (en $m.s^{-1}$), exprime **l'aptitude du milieu poreux à transmettre l'eau qu'il contient, suivant son état de saturation**. La conductivité hydraulique à saturation K_{sat} intervient dans la loi de Darcy, loi de comportement dynamique qui exprime la proportionnalité entre le flux hydrique Q et le gradient de charge H qui le provoque, en conditions saturées :

$$Q = -K_{sat} \cdot \overrightarrow{gradH}$$

K_{sat} est proportionnel à la perméabilité intrinsèque κ , qui représente l'influence des caractéristiques de la matrice solide sur les frottements. K_{sat} varie ainsi selon la texture des sols (tableau 9). **Plus K_{sat} est élevé, plus l'écoulement est favorisé, et donc plus le sol est susceptible de glisser.**

K_{sat} ($m.s^{-1}$)	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
Perméabilité	Perméable			Semi-perméable		Imperméable					
Types de sols	Gravier sans sable ni éléments fins		Sable avec gravier Sable grossier à sable fin		Sable très fin Limons grossiers à limons argileux		Argile limoneuse à argile homogène				

Tableau 9 : Ordre de grandeur de la conductivité hydraulique à saturation dans divers sols (d'après Musy et al. 1992)

Les mesures de la conductivité hydraulique à saturation ont été réalisées par le laboratoire d'analyse des sols de la Faculté de Géographie de Strasbourg durant le mois de juillet, avec la méthode du **perméamètre à charge constante**. Le principe repose sur l'application de la loi de Darcy. On mesure le volume d'eau percolée à travers l'échantillon saturé $V(t)$ pendant un intervalle de temps dt , sous une charge constante dH (S étant la section du cylindre, L la hauteur du cylindre) :

$$K_{sat} = \frac{V(t)}{S \cdot dt} \cdot \frac{L}{dH}$$

On laisse percoler trois à quatre jours pour atteindre un régime de transfert permanent. Au total, sept essais ont été réalisés pour chaque échantillon. Le K_{sat} obtenu est la moyenne d'au moins trois mesures successives.

E. Analyse des résultats

Les résultats des essais au perméamètre étaient très variables, étant donné les erreurs de prélèvement effectuées. Pour certains échantillons, la conductivité moyenne a été calculée à partir des 4 derniers essais seulement. Néanmoins, les résultats restent peu exploitables, au vu des écarts-types très élevés. Mener une analyse comparative entre les sites à partir de ces résultats n'aurait pas beaucoup de sens ; l'analyse est donc restreinte à l'observation globale des valeurs (tableau 10).

Secteur	Profondeurs prélèvement	K_{sat} m.s ⁻¹	Ecart-Type max	n	c' kPa	ϕ' °	γ_d kN.m ⁻³	n
Bordure Nord-Est Aiguettes	5-35 cm	7,1E-05 2,5E-04	36,9	3	14-22	27-31	13,1-13,3	6
Bordure Sud-Ouest Aiguettes	5-40 cm	3,2E-04 4,1E-04	95,7	6	12-19	30-33	12,9-13,4	6
Plan portion boisée	5-50 cm	9,9E-06 1,6E-04	38,4	6	10-23	29-34	13,1-13,4	6
Plan portion non boisée	0-35 cm	8,6E-05 4,0E-04	46,8	6	14-19	29-34	12,9-13,2	6

Tableau 10 : Caractéristiques hydromécaniques mesurées sur les secteurs du Plan et des Aiguettes (gd : poids volumique sec, n : nombre d'échantillons)

K_{sat} est compris entre 10^{-5} et 10^{-4} m.s⁻¹. Cette plage de variation est **cohérente avec les résultats déjà obtenus dans des couvertures morainiques** (Remaître, 2006). Des premiers prélèvements avaient été réalisés en creusant plusieurs fosses par site ; si les résultats ne peuvent en toute rigueur pas être exploités, on peut toutefois constater que les valeurs de conductivité se situent également dans cette plage de variation. Les sols étudiés sont **semi-perméables à perméables** (tableau 9).

Les valeurs de cohésion et d'angle de frottement interne sont également cohérentes avec les résultats obtenus. On observe une cohésion légèrement plus élevée sur le site en bordure Nord-Est des Aiguettes (forte activité de glissement de terrain, cf. III.C.1), par rapport au site du Plan. Cela peut s'expliquer par le fait que la moraine remaniée par glissement a déjà subi une rupture initiale ; le réarrangement des grains après la rupture peut favoriser une augmentation de la cohésion.

Ces résultats sont à présents introduits dans le **modèle de stabilité de versant CHASM (Combined Hydrology and Stability Model)**.

F. Modélisation de l'état de stabilité des secteurs : Résultats et discussion

1. Description du modèle et méthodologie développée

Le modèle CHASM est un logiciel intégré d'hydrologie / géotechnique qui aide à évaluer la stabilité des pentes. Il a été conçu afin d'estimer les effets sur les glissements de terrain des conditions météorologiques, de la végétation, de la topographie et des propriétés du sol. Le modèle est constitué d'un **noyau de base**, et de **modules**. Notamment, il comprend un module "végétation", qui permet de modifier les valeurs de la conductivité hydraulique à saturation (**augmentation en présence de végétation**), de la pluie effective atteignant la surface du sol (coefficient d'interception de la pluie par la canopée), et de la résistance au cisaillement (**augmentation de la cohésion**, prise en compte d'un coefficient de renforcement racinaire).

Le versant est représenté par un maillage (cellules de 1 x 1 m), avec la géométrie supposée des couches. La modélisation nécessite l'introduction de conditions initiales (teneurs en eau volumique des matériaux) et de conditions aux limites (pluie de 40 mm sur une durée de 24 h, d'intensité constante, qui correspond à la pluie décennale observée dans le bassin de Barcelonnette).

L'état de stabilité est calculé de manière dynamique, en utilisant une méthode itérative. Le **facteur de sécurité F_s** est déterminé : c'est le **rapport entre la force de résistance du sol au glissement et la force motrice** (Lickel, 2005). On considère généralement que pour une valeur du facteur de sécurité **inférieure ou égale à 1,1, le versant est instable (rupture)**.

Les simulations ont été réalisées sur deux profils en long, sur le site des Aiguettes et le site du Plan. La position des profils est indiquée sur la carte géomorphologique de chaque secteur. La première simulation consiste à déterminer la position de la surface de rupture, considérée comme circulaire, en se plaçant dans les conditions du milieu les plus critiques : pas de végétation, paramètres mécaniques les plus faibles. Après plusieurs itérations, le code calcule les valeurs du facteur de sécurité « critique », qui représente **l'état d'équilibre le plus instable du versant**. Le code indique également un facteur de sécurité global, qui est une intégration de l'ensemble des cellules de calcul.

La surface de rupture positionnée, la suite des simulations consiste à faire varier les paramètres de la couverture végétale, de manière **à mettre en évidence l'influence positive ou négative des différents types de végétation sur la stabilité du secteur**.

Enfin, une **analyse de sensibilité** des paramètres est réalisée, afin d'identifier ceux qui ont une influence plus ou moins importante sur le calcul. L'analyse consiste à réaliser plusieurs simulations où l'on modifie d'une valeur de -10 % et +10 %, puis -25 % et +25 %, etc. les valeurs des paramètres par rapport à la valeur utilisée pour les simulations précédentes ; on compare cet effet en pourcentage de variation du stock d'eau dans la zone superficielle du sol, et en pourcentage de variation du facteur de sécurité global.

2. Simulations

La géologie est représentée par une couverture morainique d'une épaisseur de un mètre au-dessus d'un massif de marnes noires (interface approximativement parallèle à la pente topographique). Les valeurs de teneur en eau volumique, de poids volumique et de K_{sat} pour la moraine et la marne ont été tirées d'études sur des sols analogues dans le bassin. La cohésion et l'angle de frottement interne pour la marne sont directement issus des prélèvements de sol réalisés (valeurs moyennes).

La simulation pour les conditions les plus critiques aboutit à une position de la surface de rupture représentée sur la figure 38. Le facteur de sécurité global est faible (0,98 pour les Aiguettes, 0,99 pour le Plan). Sur les Aiguettes, la surface, déterminée à partir d'une simulation sans végétation, a une position quasi équivalente à celle évaluée sur le terrain, **alors que celui-ci est boisé**. Cela signifie que **le secteur est actuellement en équilibre très instable, malgré la couverture végétale présente**.

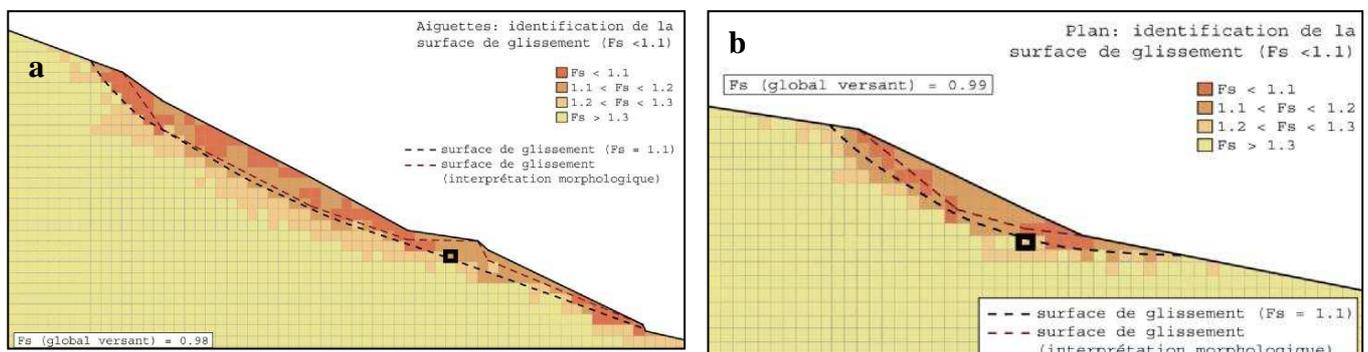


Figure 38 : Positionnement de la surface de glissement. a : site des Aiguettes. b : site du Plan (réalisation J.P. Malet)

Pour les simulations en présence de végétation, **la conductivité hydraulique à saturation et la cohésion ont été augmentées** ; un coefficient d'interception de la pluie et une résistance racinaire ont été intégrés ; les valeurs étant différentes selon le type de végétation. On constate que **la végétation tend à augmenter un peu la stabilité** (augmentation de F_s global, et diminution du stock d'eau). La

figure 39 présente les résultats sur le site du Plan. La tendance est la même sur le site des Aiguettes, mais l'augmentation de F_s est plus faible. Pourtant, le coefficient d'interception et la résistance racinaire du pin à crochets sont plus élevés que ceux du pin sylvestre. Cela tend à montrer qu'avant la présence ou non de végétation, c'est la **topographie du terrain qui est un facteur prédominant dans l'équilibre du versant**. On constate également qu'une **couverture de forêt stabilise davantage le versant qu'une couverture mixte forêt/graminées**.

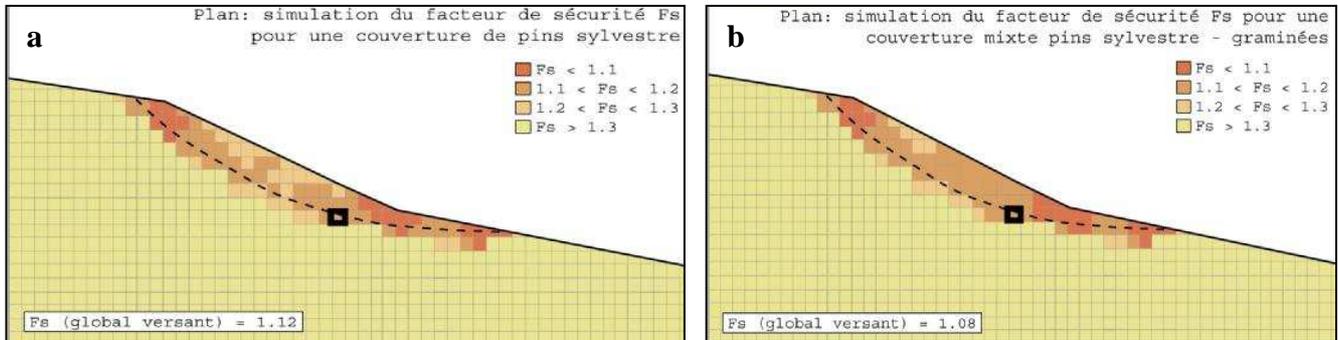


Figure 39 : Simulation de la stabilité du secteur du Plan pour une couverture de pins sylvestres (a), et une couverture mixte pins/graminées (b) (réalisation J.P. Malet)

Enfin, l'analyse de sensibilité pour le site des Aiguettes indique que la **résistance racinaire (RR)** est le paramètre le plus influent sur la variation du facteur de sécurité ; son augmentation de 50 % entraîne une augmentation de F_s de 11 % (figure 40). Les autres paramètres sont, dans l'ordre, l'angle de frottement interne, la cohésion et le poids volumique sec. De plus, le paramètre le plus influent sur la variation du stock d'eau, devant K_{sat} et le coefficient d'interception, est la **courbe de rétention hydrique**, dont les paramètres H_a et α jouent sur la capacité capillaire du sol.

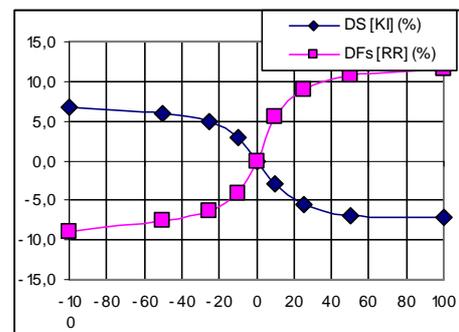


Figure 40 : Analyse de sensibilité de la résistance racinaire et du coefficient d'interception, site des Aiguettes (Réalisation J.P. Malet)

L'analyse des caractéristiques hydromécaniques des sols échantillonnés a été très limitée par la qualité des prélèvements. Les conclusions s'avèrent décevantes, dans le sens où aucune étude comparative des caractéristiques n'a pu être menée, selon le type de couvert végétal et la profondeur de l'horizon. Cependant, les conductivités, toutes mesurées dans des sols morainiques, confirment les résultats déjà obtenus sur ce type de sol ; la texture étant le premier paramètre conditionnant les propriétés hydromécaniques d'un sol.

Les simulations ont par contre fourni des résultats satisfaisants. D'une manière générale, les faibles valeurs du facteur de sécurité, même en présence de végétation (limité à 1,12), témoignent de l'instabilité naturelle des secteurs. Notamment, une couverture végétale seule ne suffirait pas à stabiliser le site des Aiguettes. Une amélioration de la simulation pourrait être effectuée en étant davantage fidèle à la géologie du terrain, paramètre essentiel à prendre en compte dans la stabilité du versant ; en effet, un mètre seulement de couverture morainique a été considéré pour la simulation, ce qui semble peu au regard de certaines formes du terrain. La simulation pourra être améliorée par la suite.

CONCLUSION

Cette étude, en abordant sous plusieurs angles la question de l'influence de la végétation arborée sur l'activité de glissements de terrain superficiels, avait pour objectif de mettre en évidence les différents liens existant entre la forêt et les instabilités.

La végétation arborée s'est révélée être un bon indicateur de l'état d'instabilité d'un secteur. L'analyse dendrogéomorphologique a permis de mettre en évidence les dynamiques différentes entre un site de moyenne montagne, qui était cultivé dans un passé proche, et un site de haute montagne, soumis à des instabilités marquées depuis au moins un siècle. Si la dendrogéomorphologie est un outil qui présente de nombreux avantages pour la datation des processus géomorphologiques, elle semble toutefois présenter des limites d'utilisation, dans certaines situations.

La simulation de l'état d'instabilité des secteurs a donné des résultats concluants, à partir des prélèvements de sol réalisés ; elle a montré le rôle positif de la forêt sur la stabilité d'un versant. Ces résultats posent les bases de simulations futures plus élaborées, davantage représentatives de la complexité géomorphologique des sites du bassin de Barcelonnette.

Enfin, l'analyse à l'échelle régionale a montré la dynamique des superficies boisées, et a apporté quelques éléments de réponse, concernant la forte occurrence de glissements de terrain sous forêt ; le contexte géologique du bassin de Barcelonnette favorise le développement d'instabilités, et l'âge avancé des forêts semble être un facteur aggravant. Cette hypothèse est appuyée par la réalité du terrain : si l'Office National des Forêts est peu intervenu sur la dynamique naturelle des peuplements ces dernières décennies, il est confronté à l'heure actuelle à de nouveaux enjeux : les peuplements issus des reboisements, qui ont plus de 100 ans, posent dans certaines zones des problèmes de « forêts-cathédrales », qui sont des arbres de plusieurs dizaines de mètres de haut, âgés, très sensibles au vent, et donc susceptibles de provoquer des chablis de grande ampleur. L'enjeu pour les années à venir sera donc de restaurer les forêts artificielles de la fin du 19^{ème} siècle, afin de maintenir un équilibre relatif entre végétation et processus géomorphologiques.

BIBLIOGRAPHIE

- ALCANTARA-AYALA I., ESTEBAN-CHAVEZ O., PARROT J.F. *Landsliding related to land-cover change : a diachronic instability distribution in the Sierra Norte, Puebla, Mexico*. Catena, vol. 65, 2006. p. 152-165
- ALESTALO J. *Dendrochronological interpretation of geomorphic processes*. Fennia, n°105, 1971. p. 5-133
- AMBROISE B. *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. Processus, facteurs, modèles*. Bucarest : HGA, 1999. 200 p. ISBN 973-98954-2-5
- ANDREASSIAN V. *Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants*. Thèse de Doctorat Hydrologie : Université Pierre et Marie Curie Paris 6, 2002. 781p.
- ASTRADE L., BRAVARD J-P., LANDON N. *Mouvements de masse et dynamique d'un géosystème alpestre : étude dendrogéomorphologique de deux sites de la vallée de la Boulc (Diois, France)*. Géographie physique et Quaternaire, vol. 52, 1998. p. 153-165
- BERGER F., REY F., CHENOST C. *Guide de gestion des forêts de protection contre les risques naturels dans les Alpes du Sud françaises*, Grenoble : Cemagref, Unité de recherche Ecosystèmes Montagnards, 2006a. 21 p.
- BERGER F., REY F., CHENOST C. *Synthèse bibliographique de l'état des connaissances sur le rôle de protection des forêts contre les risques naturels*. Grenoble : Cemagref, Unité de recherche Ecosystèmes Montagnards, 2006b. 66 p.
- BRAAM R.R., WEISS E.E.J., BURROUGH P.A. *Dendrogeomorphological analysis of mass movement. A technical note on the research method*. Catena, vol. 14, 1987a. p. 585-589
- BRAAM R.R., WEISS E.E.J., BURROUGH P.A. *Spatial and temporal analysis of mass movement using dendrochronology*. Catena, vol. 14, 1987b. p. 573-584
- BUMA J. *Finding the most suitable slope stability model for the assessment of the impact of climate change on a landslide in southeast France*. Earth Surface Processes and Landforms, vol. 25, 2000. p. 565-582
- CARIS J.P.T., VAN ASCH TH.W.J. *Geophysical, geotechnical and hydrological investigations of a small landslide in the French Alps*. Engineering Geology, vol. 31, 1991. p. 249-276
- CHONDROYANNIS P. *Ubaye, la forêt reconstruite. Le sentier de découverte du Riou-Bourdox*. Barcelonnette : Office National des Forêts, 1992. 112 p. ISBN 2-904-384-35-9
- DE MARTIN P. *Analyse des cernes. Dendrochronologie et dendroclimatologie*. Masson et Cie, Paris, 1974. 78 p. ISBN 2-225-38775-3
- DELSIGNE F. *Éléments de morphodynamique torrentielle et cartographie des instabilités de surface dans le bassin versant du Riou Bourdox*. Mémoire de DEA de Géographie : Faculté de Géographie et d'Aménagement, Université des Sciences et Technologies de Lille, 1999. 126 p.
- ESMIOL S. *Les paysages de la vallée de l'Ubaye. Un guide de découverte*. Barcelonnette : Sabença de la Valeia, 2004. 112 p. ISBN 2-908103-36-2
- FISCHESSE B. *La vie de la montagne*. Paris : Chêne/Hachette, 1982. 257 p. ISBN 2-85108-314-7
- FLAGEOLLET J.C. *The time dimension in the study of mass movements*. Geomorphology, vol. 15, 1996. p. 185-190
- GARCZYNSKI F. *Glissements de terrain et forêt de montagne*. Grenoble : Service de Restauration des Terrains en Montagne, 1984. 23 p.
- GOGUEL J. *Sur une influence possible du reboisement sur les glissements de terrain*. Valence, 1943. 1 p.
- GREGOIRE C. *Cours d'hydrologie*. Strasbourg : ENGEES, 2003. 40 p.
- JAKOB M. *The impacts of logging on landslide activity at Clayoquot Sound, British Columbia*. Catena, vol. 38, 2000. p. 279-300
- KIRSCHOFFER S. *Végétation arborée et mouvements de terrain dans le secteur de la Frache. Commune de Jausiers, Alpes de Haute Provence*. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique : Faculté de Géographie et d'Aménagement, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 1994. 132 p.
- KOEHLE G. *Cartographie géo-morphodynamique d'un versant instable. Le bassin de Barcelonnette, commune de Jausiers, secteur Sud (Alpes de Haute Provence)*. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique : Faculté de Géographie et d'Aménagement, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 1994. 81 p.
- LANG A., MOYA J., COROMINAS J., SCHROTT L., DIKAU R. *Classic and new dating methods for assessing the temporal occurrence of mass movements*. Geomorphology, vol. 30, 1999. p. 33-52
- LEGIER A. *Mouvements de terrain et évolution récente du relief dans la région de Barcelonnette*. Thèse de doctorat Géologie appliquée : Université scientifique et médicale de Grenoble, 1977. 163 p.
- LICKEL B. *Travaux pratiques de géotechnique*. Strasbourg : IUT de Génie Civil, 2005. 33 p.
- LOPEZ SAEZ J. *La dendrogéomorphologie, outil d'interprétation historique d'un glissement de terrain. Etude du secteur sud-ouest du glissement de l'Harmalière*. Mémoire de Master 2 de Géographie : Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier de Grenoble, 2006. 86 p.

- MALET J.P. *Les « glissement de type écoulement » dans les marnes noires des Alpes du sud. Morphologie, fonctionnement et modélisation hydromécanique.* Thèse de Doctorat : Institut de Physique du Globe, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 2003. 353 p.
- MALET J.P., AUZET A.V., MAQUAIRE O., AMBROISE B., DESCROIX L., ESTEVES M., VANDERVAERE J.P., TRUCHET E. *Soil surface characteristics influence on infiltration in black marls : application to the super sauze earthflow (Southern Alps, France).* Earth processes and Landforms, vol. 28, 2003. p. 547-564
- MAQUAIRE O. *Aléas géomorphologiques (mouvements de terrain) : processus, fonctionnement, cartographie.* Mémoire pour Habilitation à Diriger des Recherches : Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 2002. 184 p.
- MAZET-BRACHET D. *Glissements de terrain sous forêts, étude du site de Roissard. Peuplement artificiel de pins noirs sur marnes callovo-oxfordiennes.* Mémoire d'ingénieur : filière géotechnique, Université de Grenoble, 1984. 20 p.
- MERIAUX P. *Glissements de terrain sous peuplement artificiel en série domaniale. Cas des séries de Roissard et Saint Laurent-en-Baumont (Isère). Approche descriptive.* Grenoble : Service de Restauration des Terrains en Montagne, 1984. 10 p.
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA PÊCHE (MAP), INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL (IFN). *Rapport d'activité 2005.* [en ligne] IFN, 2006. 48 p. [visité le 8/03/2007] <<http://www.ifn.fr>>
- MINISTÈRE DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT (MATE), MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT (MATL). *Plan de prévention des risques naturels (PPR) : Risques de mouvements de terrain.* Paris : La documentation Française, 1999. 74 p.
- MUSSET D., MAUREL J. *Les habitants de l'Ubaye. Récit de la transformation d'une vallée.* Barcelonnette : Sabença de la Valeia, 2005. 64 p. ISBN 2-908103-42-7
- MUSY A., SOUTTER M. *Physique du sol.* Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 1991. ISBN 2-88074-211-0
- QUINTLE F. *Repérage d'anciens glissements de terrain dans le bassin de Barcelonnette d'après la photo-interprétation, l'étude de cartes. Vérifications sur le terrain. (Jausiers, Enchastrayes).* Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique : Faculté de Géographie et d'Aménagement, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 1995. 95 p.
- RAMEAU J.C., MANSION D., DUME G. *Flore forestière française. Guide écologique illustré. Volume 2, Montagnes.* Paris : Institut pour le Développement Forestier, 1993. 2421 p. ISBN 2-904740-41-4
- REMAÎTRE A. *Morphologie et dynamique des laves torrentielles : Applications aux torrents des Terres Noires du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud).* Thèse de Doctorat : Université de Caen/Basse-Normandie 2006. 373 p.
- RICE R. *Aménagement forestier en vue de minimiser les risques de glissements de terrain. Station d'essai forestière et pastorale de la région Pacifique sud-ouest (E.U.).* [en ligne] Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, 1977 [visité le 12/05/2007] <<http://www.fao.org/docrep/006/AD071F/AD071f16.htm>>
- SCHLOSSER F. *Éléments de mécanique des sols.* Paris : Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1992. 276 p. ISBN 2-859786104-8
- SCHWEINGRUBER F.H. *Trees and wood in dendrochronology : morphological, anatomical, and tree-ring analytical characteristics of trees frequently used in dendrochronology.* Berlin: Springer-Verlag, 1993. 402 p. ISBN 3-540-54915-3
- SIVAN O. *Torrents de l'Ubaye.* Barcelonnette : Sabença de la Valeia, 2000. 48 p. ISBN 2-908103-25-7
- STIEN D. *Inventaire des glissements de terrain et des enjeux dans la vallée de l'Ubaye et le pays de Seyne.* Mémoire de Maîtrise : IUP d'environnement et d'aménagement du territoire, Université des Sciences et Techniques de Lille, 2001. 59 p.
- THIERY Y., MALET J.P., STERLACCHINI S., PUISSANT A., MAQUAIRE O. *Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales : application to a complex mountainous environment.* Geomorphology (sous presse), 2007. 22 p.
- VAN ASCH TH.W.J., BUMA J. *Modelling groundwater fluctuations and the frequency of movement of a landslide in the Terres noires region of Barcelonnette (France).* Earth surface processes and landforms, vol. 22, 1997. p. 131-141
- WALSTRA J. *Historical Aerial Photographs and Digital Photogrammetry for Landslide Assessment.* PhD Thesis : Loughborough University, 2006. 247 p.

LISTE DES PLANCHES

- PLANCHE 1 : Cartographie de l'occupation des sols dans le bassin de Barcelonnette en 2004
- PLANCHE 2 : Cartographie des essences forestières dans le bassin de Barcelonnette
- PLANCHE 3 : Cartographie de l'évolution de l'occupation des sols entre 1974 et 1982, puis entre 1982 et 2004, secteurs adret et ubac
- PLANCHE 4 : Carte géomorphologique du site des Aiguettes
- PLANCHE 5 : Carte géomorphologique du site du Plan

ANNEXES

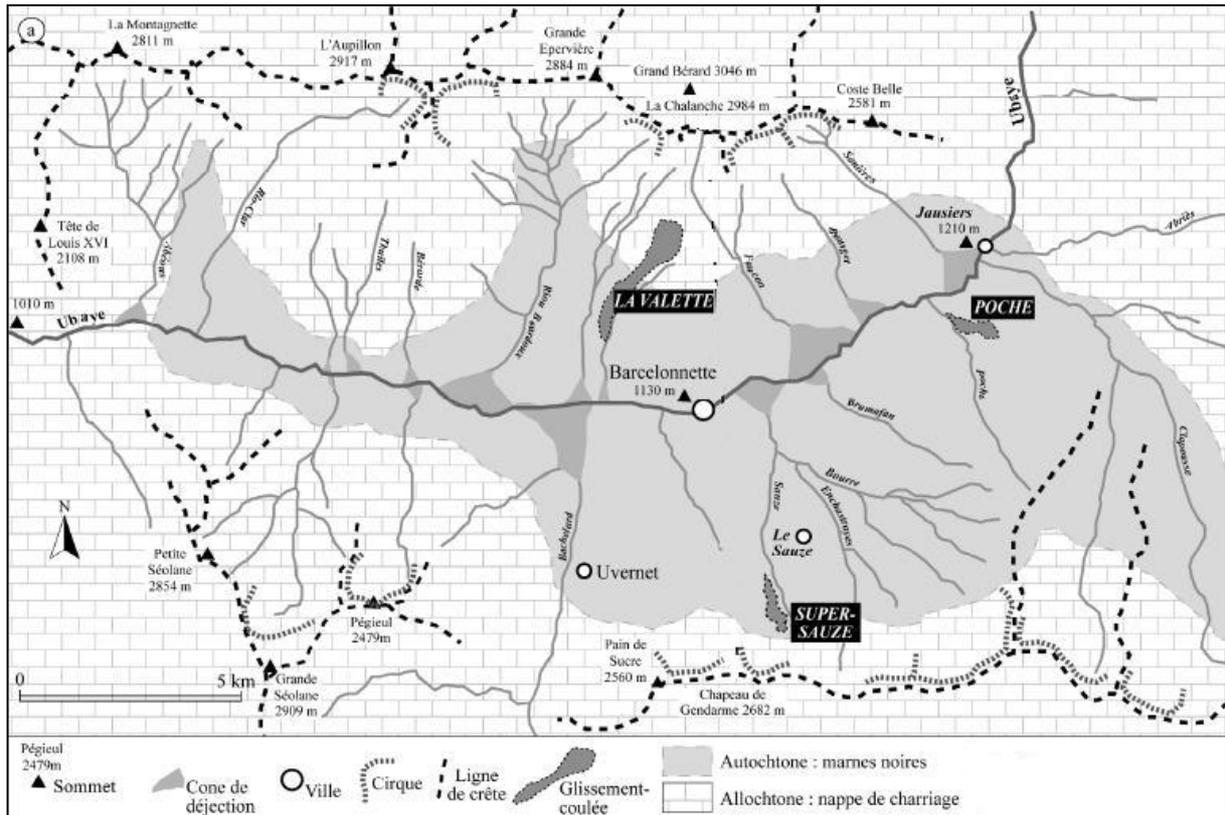
LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 Carte géologique simplifiée du bassin de Barcelonnette	II
ANNEXE 2 Les travaux de reboisement au cours du 19ème siècle. Contextes scientifique, politique et humain	III
ANNEXE 3 Notice explicative à la cartographie de l'occupation des sols du bassin de Barcelonnette en 2004 - Description de l'Inventaire Forestier National	VII
ANNEXE 4 Caractéristiques des essences forestières rencontrées dans le bassin de Barcelonnette...	XII
ANNEXE 5 Figures complémentaires à l'analyse spatiale de l'occupation des sols en 2004	XIV
ANNEXE 6 Logiciels d'analyses dendrochronologiques TSAP-Win et CDendro, et figures complémentaires à l'analyse dendrogéomorphologique	XVIII

ANNEXE 1

Carte géologique simplifiée du bassin de Barcelonnette

(Réalisation J.P. Malet, 2003)



ANNEXE 2

Les travaux de reboisement au cours du 19^{ème} siècle

Contextes scientifique, politique et humain

Le but de cette annexe est de fournir une rétrospective des travaux de reboisement opérés au 19^{ème} siècle, qui ont façonné le paysage actuel de la vallée de l'Ubaye. Ces travaux résultent d'une politique de très grande ampleur menée par l'Etat dans tous les milieux de montagne français, afin de restaurer les terrains dégradés par l'érosion et les laves torrentielles ; ils ont été encadrés par une succession de lois, plus ou moins bien acceptées par les populations locales. Cette période voit aussi la réalisation des premiers écrits scientifiques sur l'hydraulique torrentielle, et sur la nécessité de reboiser les terrains dégradés. L'analyse d'ouvrages de l'époque permet de mieux comprendre les contextes scientifique, politique, et humain qui ont entouré les reboisements.

Le 19^{ème} siècle est marqué par de nombreux épisodes d'inondations et de laves torrentielles dans tous les milieux de montagne français. A cette époque, le phénomène de lave torrentielle est déjà bien connu. Prosper Demontzey, ingénieur des Eaux et Forêts, dans son *Etude sur les travaux de reboisement et de gazonnement des montagnes* en 1878, écrit : « Cette grande quantité de pluie tombant en un temps très court, sur ces versants dénudés et escarpés, s'écoule en grande masse par le torrent ordinairement presque à sec, entraîne tous les matériaux qui s'y trouvent accumulés, affouille le lit, ronge les berges, provoque d'immenses glissements de terrains et amène toutes ces déjections dans la vallée, donnant ainsi naissance à ce que, dans le pays, on appelle du nom pittoresque de lave ».

Les ingénieurs cherchent à comprendre les processus d'érosion des versants et d'activité torrentielle, et à en identifier les causes. En 1831, dans son *Mémoire sur le déboisement des montagnes*, l'ingénieur forestier Jacques-Joseph Baudrillart affirme que la cause de l'érosion et des laves torrentielles est le déboisement : « Le déboisement des montagnes a pour résultat l'entraînement de la terre végétale, (...) la formation des torrents et des avalanches, qui bouleversent les terrains inférieurs, les couvrent d'énormes débris, et qui, se renouvelant chaque année, changent bientôt en déserts sauvages des vallées populeuses et florissantes ».

L'*étude sur les torrents des Hautes-Alpes* que l'ingénieur des Ponts et Chaussées Alexandre Surell publie en 1841, constitue une référence dans le domaine de la Restauration des Terrains en Montagne. Elle pose les grands principes de la restauration et servira de base aux lois mises en place dans la deuxième moitié du 19^{ème} siècle. Surell constate que « [la calamité des torrents] pèse sur une grande partie du département des Basses-Alpes, et d'une manière terrible sur une de ses vallées, celle de l'Ubaye, où est située Barcelonnette. » Il décrit la formation des cônes de déjection, et les conséquences désastreuses des laves torrentielles sur ces derniers, « ... ceux-ci, par une circonstance malheureuse, se trouvant précisément placés dans les vallées, où les cultures sont les plus précieuses : aussi forment-ils le caractère le plus redouté des torrents ».

Pour tous les ingénieurs de l'époque, les causes de l'érosion et des laves torrentielles sont **le déboisement et le surpâturage** ; cette affirmation se base avant tout sur des observations et des témoignages, davantage que sur des démonstrations scientifiques (Surell, 1841) : « il n'y a peut-être pas une commune où l'on entende raconter des vieillards que sur tel coteau, aujourd'hui nu et dévoré par les eaux, ils ont vu se dresser autrefois de belles forêts, sans un seul torrent. » Et d'ajouter : « Mais si l'on demande d'établir cette influence sur des preuves directes et positives, cela devient presque embarrassant par la multitude même des preuves, et l'évidence de la chose à démontrer. (...) Il suffit de parcourir pendant quelques jours ces montagnes pour être frappé par une infinité de faits, qui feraient céder l'esprit le plus entêté dans l'opinion contraire. » La réponse aux problèmes d'inondation et de laves torrentielles est évidemment le reboisement : « la présence d'une forêt sur un sol empêche

la formation des torrents (...). Le développement des forêts provoque l'extinction des torrents », « la végétation est le meilleur moyen de défense à opposer aux torrents ».

Les contextes idéologique et politique de l'époque sont bien particuliers : jusqu'à la fin du 18^{ème} siècle, l'idéologie était celle du *défrichement* (Brugnot et al., 2002) : la forêt doit être défrichée pour permettre une mise en valeur des terres, considérées comme la principale source de richesse d'un pays. A partir du 19^{ème} siècle, dans le contexte des inondations et des laves torrentielles, émerge une nouvelle idéologie, celle du *reboisement*. Les médiateurs de cette action de reboisement sont les ingénieurs des Ponts et Chaussées et les ingénieurs forestiers. C'est « l'occasion » pour le corps forestier, reconstitué vers 1820, de reprendre en main la gestion des forêts françaises, en récupérant les droits d'usage des forêts domaniales, et en mettant en œuvre sur ces terres la politique RTM.

Pour imposer leur idéologie et légitimer la mise en œuvre de travaux considérables, les ingénieurs sont particulièrement virulents envers les populations locales, qu'ils accusent directement d'être responsables de l'état des montagnes. Surell écrit : « Il est aisé de comprendre (...) tout le mal qu'a fait l'homme en déboisant imprudemment ces montagnes. (...) L'homme porte aujourd'hui la peine des désordres qu'il a créés ». « Parmi le grand nombre de torrents éteints, dont les bassins sont boisés, il en est dont les forêts ont subi la loi commune, et sont tombées en partie sous la cognée des habitants. Eh bien ! Le résultat de ces déboisements a été de rallumer les torrents éteints. »

Or, s'il est vrai que la période correspond à un maximum de déboisement et de surpâturage, la cause principale de cette crise torrentielle est climatique : le « Petit âge glaciaire » est un refroidissement climatique intervenu entre 1550 et 1850, au cours duquel les fluctuations climatiques ont été exagérées : multiplication des printemps et des automnes particulièrement pluvieux, augmentation de la fréquence des étés orageux, et augmentation de l'activité torrentielle. A l'heure actuelle, plusieurs auteurs (Sivan, 2000 ; Chondroyannis, 1992) s'accordent pour dire que l'anthropisation est un facteur aggravant incontestable, mais le moteur principal de l'activité torrentielle reste le **paramètre climatique**. Surell en fait état très rapidement dans son ouvrage : « On ne rencontre pas davantage de torrents, ni dans les Pyrénées, ni dans les montagnes de la Corse, ni dans celles du Jura. Pourtant, parmi ce grand nombre de montagnes, plusieurs sont aussi nues et déboisées que les croupes les plus chauves des Hautes-alpes. Ce n'est donc pas la destruction des forêts, ainsi qu'on le croit communément ici, qui a suffi pour attirer sur ces dernières montagnes le fléau si particulier qui les désole. (...) L'influence des déboisements est incontestable, mais elle ne constitue pas une raison première, et eût été nulle sous un autre ciel et dans d'autres terrains ».

Du fait de l'opposition des paysans face à la politique RTM, le processus législatif fut assez laborieux. Au total, trois lois réglementent l'action RTM (Brugnot et al., 2002) :

- **La loi de 1860 sur le reboisement des montagnes** : elle fut abrogée en 1874, car elle rencontra les plus vives résistances des populations, dépossédées de leur territoire
- **La loi de 1864 sur le gazonnement des montagnes** : l'accent est mis davantage sur l'engazonnement des terrains, afin de préserver les secteurs de pâturages pour les agriculteurs
- **La loi de 1882 sur la restauration et la conservation des terrains en montagne** : c'est à partir de cette loi qu'on peut légitimement parler de « restauration des terrains en montagne ». Deux mesures sont prises : des actions préventives sur les terrains non dégradés, et des actions curatives sur les terrains dégradés, déclarées d'utilité publique.

Cette dernière loi est l'aboutissement de plusieurs années de remise en question de l'idéologie du reboisement. Après plusieurs années de travaux, le reboisement systématique n'est plus considéré comme l'unique solution pour résoudre les problèmes d'érosion. **Boisement, gazonnement et correction des lits des torrents** seront mis en œuvre en association durant toute la période de restauration.

« L'âge d'or » des reboisements dure **de 1882 à 1914**. Prosper Demontzey coordonne tous les travaux. Notamment, il fut en charge du reboisement du bassin versant du Riou Bourdoux : « Le Riou Bourdoux, fameux dans tout le pays par ses dévastations, est le torrent le plus terrible et le plus considérable de tous ceux actuellement en action dans les Alpes (...). On ne trouve, dans ce bassin de réception, d'une superficie de 2200 ha, qu'une parcelle quelque peu boisée, de 65 ha environ, dont le

peuplement végétal sur de vastes amas de boues provenant de gigantesques éboulements (*le glissement de terrain de Pra Bellon*) » (1894).

Au total, les **177 périmètres RTM auront permis de boiser 300,000 hectares de terrain en France**. Les essences forestières les plus usitées sont celles présentes naturellement aux altitudes rencontrées, essentiellement le mélèze, le pin à crochets et le pin sylvestre. Quelques essences exotiques furent introduites, telles que des peupliers d'Amérique et du Japon, mais ils n'ont pas donné de résultats satisfaisants. Le **pin noir d'Autriche** a été beaucoup utilisé, introduit en France pour reboiser les terrains des Alpes du Sud et du Massif Central.

Végétation et érosion

Au-delà de la pensée de l'époque, qui accuse les défrichements pour mieux justifier les reboisements, les connaissances au 19^{ème} siècle en matière d'action de la végétation sur l'érosion des versants sont déjà développées. Demontzey (1878) écrit que la végétation ligneuse à planter doit répondre à quatre conditions :

- « posséder des racines assez puissantes pour enserrer le sol dans leurs innombrables réseaux, le rendre au besoin plus perméable et le protéger contre l'entraînement ;
- présenter un couvert assez complet pour abriter sa surface contre les influences météorologiques ;
- fournir un humus de plus en plus abondant, appelé d'une part à fertiliser le sol, (...) et d'autre part à favoriser le ralentissement et la régularisation du débit des eaux pluviales ou des neiges fondant à sa surface ;
- maintenir (...) perpétuellement ces salutaires effets et les développer avec l'aide du temps ».

Végétation et glissements de terrain

L'origine de la politique RTM est la lutte contre l'**activité torrentielle**, provoquée par l'alimentation des torrents en matériaux issus de l'érosion des versants ; les processus de mouvements de versants ne font pas l'objet d'études approfondies à cette époque. Demontzey fait néanmoins état de la problématique des glissements de terrain associés aux torrents : « Il arrive souvent qu'au-dessus des berges vives se manifestent des glissements de pans de montagne occupant des surfaces parfois très vastes. (...) L'affouillement du pied des berges (...) détermine un élargissement spontané du profil en travers. Mais, dès que cette portion de berge, qui servait d'appui à la tranche de terrain reposant sur le plan de glissement, a été enlevée, les terrains perméables ne tardent pas à entrer en mouvement sous l'influence des eaux surabondantes qui s'écoulent souterrainement sur le plan de glissement formé de roches ou de terrains imperméables. Le mouvement s'arrête lorsque la tranche glissante est venue s'appuyer sur le fond du lit, voire même contre la berge opposée ; le profil redevient alors resserré, il se maintient ainsi jusqu'à ce qu'une nouvelle crue vienne le rélargir à nouveau et permettre le retour du mouvement de glissement et ainsi de suite. De là ces séries de gradins échelonnés qu'on rencontre toujours dans ces sortes de terrains en suivant un profil en travers donné ».

Kuss, en 1900, souligne l'importance de l'eau dans le déclenchement des glissements de terrain, et propose par conséquence le drainage des versants instables, pour « empêcher les eaux d'arriver en quantité suffisante jusqu'au plan de glissement ou même pour les recueillir sur ce plan de glissement, de façon à ne pas leur permettre de saturer la masse des matériaux instables ».

Mougin, en 1931, montre les effets positifs de la forêt sur les glissements de terrain : « Il est clair que par ses racines, l'arbre peut prévenir les mouvements superficiels du terrain : bien mieux, par le pouvoir absorbant de ces mêmes racines, il pompe l'eau du sol et, grâce à lui, une croûte solide se forme qui peut être capable de se maintenir, même sur un sous-sol argileux et mouilleux », mais également les effets négatifs : « Il arrive que des bois glissent avec le terrain qui les supporte : ceci se produit quand le terrain est détrempé et sur une profondeur supérieure à la zone où peuvent pénétrer les racines, au point d'avoir perdu sa cohésion et se met à fluer sur un pan de glissement sous-jacent ».

En conclusion, cette rétrospective sur la mise en place des travaux de reboisement a montré que :

- Les connaissances scientifiques sur les processus de formation des torrents, d'érosion et sur les effets de la végétation sont nombreuses. Elles justifient l'action de restauration par le reboisement, mais on note un manque d'objectivité sur les causes principales de l'activité torrentielle, cela pour imposer l'idéologie du reboisement
- Les actions de reboisement ont été menées pour lutter contre l'érosion des versants, et non contre les glissements de terrain. Les connaissances dans ce domaine sont encore restreintes à cette époque. De même, il n'existe pas d'écrits répertoriant les zones instables dans le bassin de Barcelonnette au 19^{ème} siècle. Quelques terrains sont cités, comme le glissement ancien de Pra Bellon, qui s'est déclenché au Moyen-âge. On ne peut donc déterminer à partir de l'étude des écrits de l'époque quelle était l'activité de glissements de terrain au 19^{ème} siècle de secteurs aujourd'hui boisés.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BAUDRILLART J.J. *Mémoire sur le déboisement des montagnes*. Paris : Bulletin de la société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1831. 16 p.
- BRUGNOT G., CASSAYRE Y. *De la politique française de restauration des terrains en montagne à la prévention des risques naturels*. Grenoble : MSH Alpes, 2002. 11 p.
- CHONDROYANNIS P. *Ubaye, la forêt reconstruite. Le sentier de découverte du Riou-Bourdoux*. Barcelonnette : Office National des Forêts, 1992. 112 p. ISBN 2-904-384-35-9
- DEMONTZEY P. *L'extinction des torrents en France par le reboisement*. Paris : Imprimerie Nationale, 1894. 459 p.
- KUSS M. *Restauration et conservation des terrains en montagne. Eboulements, glissements et barrages*. Paris : Imprimerie Nationale, 1900. 61 p.
- MOUGIN P. *La restauration des Alpes*. Paris : Imprimerie Nationale, 1931. 584 p.
- SIVAN O. *Torrents de l'Ubaye*. Barcelonnette : Sabença de la Valeia, 2000. 48 p. ISBN 2-908103-25-7
- SURELL A. *Etude sur les torrents des Hautes-Alpes*. Paris : Dunod, 1841 (deuxième édition publiée en 1870). 317 p.

ANNEXE 3

Notice explicative à la cartographie de l'occupation des sols du bassin de Barcelonnette en 2004 - Description de l'Inventaire Forestier National

La cartographie de l'occupation des sols

La nomenclature de la cartographie de 2000 comportait 15 classes :

Ensembles	Classes
A. Forêts et milieux naturels	1. Forêt de conifères dense 2. Forêt de conifères de densité moyenne à faible 3. Forêt de feuillus 4. Pelouses alpines et pâturages naturels
B. Territoires agricoles	5. Cultures permanentes 6. Prairies
C. Affleurements rocheux	7. Roches nues ou sols nus 8. Marnes noires
D. Territoires artificialisés	9. Zones urbanisées 10. Zones industrielles 11. Aérodrome 12. Extraction de matériaux
E. Surfaces en eau	13. Cours d'eau 14. Lacs, étangs 15. Alluvions

Description des classes d'occupation du sol

Exemple BDOrtho (IGN, 2004)	Description de la classe
	1. Forêt de conifères dense Formation végétale principalement arborée, où dominent les espèces forestières de conifères, en espace serré et compact
	2. Forêt de conifères de densité moyenne à faible Formation végétale principalement arborée, où les espèces forestières de conifères sont entrecoupées d'espaces non arborés (pelouse alpine) ou de sols nus
	3. Forêt de feuillus Formation végétale principalement arborée, où dominent les espèces forestières feuillues
	4. Pelouses alpines et pâturages naturels Surfaces enherbées, de faible densité, souvent situées dans des zones accidentées et pouvant comporter des surfaces rocheuses, des zones de sols nus et des broussailles

	<p>5. Cultures permanentes</p> <p>Surfaces cultivées régulièrement et généralement incluses dans un assolement</p>
	<p>6. Prairies</p> <p>Surfaces enherbées principalement composées de graminées, pâturées ou réservées à la récolte de fourrage</p>
	<p>7. Roches nues ou sols nus</p> <p>Espaces ouverts de type affleurement rocheux de couleur claire, éboulis ou formation de pentes, sans ou avec des traces de végétation</p>
	<p>8. Marnes noires</p> <p>Affleurement rocheux gris foncé à noir</p>
	<p>9. Zones urbanisées</p> <p>Espaces structurés par des bâtiments à vocation principalement résidentielle, le plus souvent associés à des fonctions de commerce et de service</p>
	<p>10. Zones industrielles</p> <p>Bâtiments et espaces associés à la production industrielle ou commerciale</p>
	<p>11. Aérodrome</p> <p>Terrain aménagé pour le décollage et l'atterrissage des avions et pourvu des infrastructures nécessaires</p>
	<p>12. Extraction de matériaux</p> <p>Emprises liées à l'activité d'extraction industrielle (carrières)</p>
	<p>13. Cours d'eau</p> <p>Cours d'eau permanent d'une largeur minimum de 10 m (chenal d'écoulement naturel)</p>

	14. Lacs, étangs Etendues d'eau naturelles ou artificielles, généralement affectées à des activités de loisirs (pêche, baignade, ...)
	15. Alluvions Dépôt meuble laissé dans les cours d'eau, formé de galets, de sable et de limon (de couleur gris clair)

Cette nomenclature a été simplifiée, pour mieux à la problématique de l'étude, et rendre la carte plus facile à lire :

Cartographie 2000	Simplifications	Cartographie 2004 simplifiée
Forêt de conifères dense		Forêt de conifères dense
Forêt de conifères peu dense		Forêt de conifères peu dense
Forêt de feuillus		Forêt de feuillus
Cultures permanentes		Cultures permanentes
Pelouses alpines/pâturages	<i>Classes difficilement distinguables par photo- interprétation. Caractéristiques physiques similaires : classes regroupées</i>	Prairies et pelouses
Prairies		
Roches nues/sols nus		Roches nues ou sols nus
Marnes noires	<i>Particularité géologique du secteur : classe conservée</i>	Marnes noires
Zones urbanisées	<i>Classes regroupées</i>	Territoires artificialisés
Zones industrielles		
Aérodrome		
Extraction de matériaux		
Cours d'eau	<i>Deux lacs seulement dans la zone d'étude : classes regroupées</i>	Cours d'eau et plans d'eau
Lacs, étangs		
Alluvions	<i>Dynamique des cours d'eau de montagne : classe conservée</i>	Alluvions

La nomenclature simplifiée de la cartographie de l'occupation des sols dans le bassin de Barcelonnette en 2004 est donc la suivante :

1. Forêt de conifères dense
2. Forêt de conifères de densité moyenne à faible
3. Forêt de feuillus
4. Cultures permanentes
5. Roches nues ou sols nus
6. Marnes noires
7. Alluvions
8. Territoires artificialisés
9. Prairies et pelouses
10. Cours d'eau et plans d'eau

La cartographie des essences forestières

Les données de l'**Inventaire Forestier National (IFN)** ont été utilisées. C'est un organisme créé en 1958 qui a en charge l'inventaire permanent des ressources forestières nationales, indépendamment de toute question de propriété (MAP/IFN, 2006). Il est devenu établissement public à caractère administratif sous tutelle du ministre chargé des forêts en 1994. Cinq échelons interrégionaux, localisés à Bordeaux, Caen, Lyon, Montpellier et Nancy, effectuent des relevés sur l'ensemble du territoire métropolitain. En plus des travaux d'inventaire nationaux, l'IFN apporte son concours technique aux études dans le domaine des inventaires des ressources forestières en France ainsi qu'à l'étranger. Il peut effectuer à la demande des recherches, expertises et enquêtes touchant à l'inventaire des forêts et des autres espaces naturels.

Méthode d'inventaire

La France est découpée en 309 « Régions Forestières », qui correspondent chacune à une division territoriale où règnent des conditions similaires du point de vue forestier, et qui présentent des types de forêts ou de paysages comparables. Les limites des régions forestières sont tracées indépendamment des limites administratives (Andréassian, 2002). Le bassin de Barcelonnette fait partie de la **région forestière « Ubaye »** du département des Alpes de Haute Provence.

Les opérations d'inventaire étaient effectuées jusqu'en 2004 par département de manière cyclique avec une périodicité de 12 ans. Chaque inventaire consistait en une séquence d'opérations étalées sur une durée de trois à cinq ans, pour chaque département. Pour le département des Alpes de Haute Provence, les années de référence des trois cycles d'inventaire sont 1974, 1982 et 1999. A présent, depuis novembre 2004, l'inventaire est effectué annuellement sur l'ensemble du territoire.

La méthode d'inventaire correspond à un sondage systématique de points répartis sur le territoire inventorié. Ce sondage est effectué par application d'une grille de points sur une photographie aérienne, à raison d'un point pour 1000 ha. Les formations à inventorier sont photo-interprétées, et classées. Dans une deuxième phase, un sondage aléatoire est effectué à l'intérieur des échantillons de première phase. Sur le terrain sont mesurées les différentes caractéristiques dendrométriques et écologiques des formations et des arbres présents. Les grandeurs extensives (superficies, volumes, accroissements, etc.) sont estimées par sommation pondérée des valeurs mesurées sur les points de sondage. Toutes les données d'inventaire sont enregistrées dans des bases de données et peuvent être mises à la disposition des utilisateurs. Les données sont de nature photographique, cartographique, dendrométrique et écologique.

La cartographie des types de formations végétales

Pour les besoins de l'étude, le CNRS a commandé à l'IFN la cartographie des types de formation végétale dans le bassin de Barcelonnette. Le produit final est un document *.shp*, géoréférencé en Lambert III. L'utilisateur n'a pas accès aux coordonnées des points d'inventaire, il est juste informé que 177 relevés écologiques ont été effectués dans la région forestière « Ubaye ».

Au début des travaux d'inventaire dans un département est arrêtée une liste de **types de formation végétale**, qui est utilisée pour dresser la carte thématique du territoire. Cette nomenclature est donc propre à chaque département. Un type de formation végétale peut être un type de peuplement forestier, un type de lande ou un type pastoral (Collectif, 1999) :

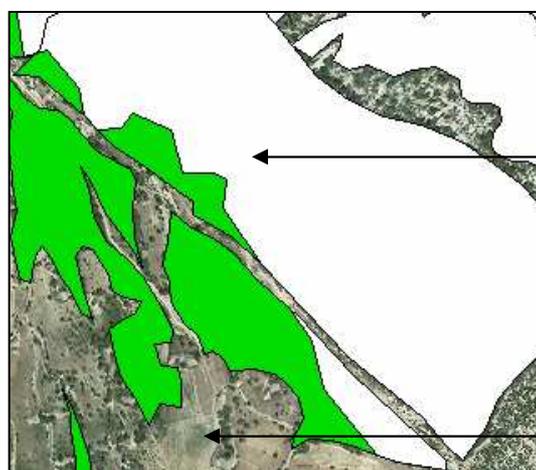
- *Peuplement forestier* : terrains où l'usage dominant est la formation boisée (formation végétale principalement constituée par les arbres et les arbustes, ayant une surface minimale de 5 ares)
- *Lande* : terrains où l'usage dominant est la lande (landes, friches et terrains vacants non cultivés et non entretenus régulièrement pour le pâturage ; peut contenir des arbres épars)
- *Type pastoral* : parmi les territoires où l'usage dominant est agricole, formations pastorales (pâturage ou pacage).

Le bassin de Barcelonnette compte 27 types de formations végétales. La liste a été simplifiée.

Classification IFN	Classification simplifiée (dense/peu dense)	Classification simplifiée
Boisement lâche de mélèze d'Europe (WZ)	Mélèze ✓ Dense ✓ Peu dense	Mélèze
Boisement lâche de mélèze d'Europe (protection) (WZ9)		
Futaie de mélèze d'Europe (CZ)		
Taillis de feuillus indifférenciés (QF)	Feuillus	Feuillus
Boisement morcelé de feuillus (SF)		
Espace vert urbain (10)		
Futaie de pin sylvestre (CS)	Pin sylvestre ✓ Dense ✓ Peu dense	Pin sylvestre
Futaie de pin sylvestre (protection) (CS9)		
Futaie de pin à crochets (CT)	Pin à crochets ✓ Dense ✓ Peu dense	Pin à crochets
Futaie de pin à crochets (protection) (CT9)		
Futaie de pin noir d'Autriche (CN)	Pin noir ✓ Dense ✓ Peu dense	Pin noir
Boisement lâche de pins indifférenciés (WP)	Pins indifférenciés ✓ Dense ✓ Peu dense	Pins indifférenciés
Boisement lâche de pins indifférenciés (protection) (WP9)		
Futaie de pins indifférenciés (CP)		
Futaie de sapin pectiné ou d'épicéa commun (CW)	Sapin-épicéa ✓ Dense ✓ Peu dense	Sapin-épicéa
Futaie de conifères indifférenciés (CR)	Conifères indifférenciés ✓ Dense ✓ Peu dense	Conifères indifférenciés
Boisement lâche de conifères indifférenciés (WR)		
Boisement morcelé de conifères (protection) (SR9)		
Boisement morcelé de conifères (SR)		

La carte du CNRS étant plus précise, elle a servi de base à la fusion entre les deux cartes. Ainsi :

- Les polygones « Feuillus » sur la cartographie du CNRS ont été conservés
- Les classes « Mélange de futaie de conifères et taillis » ont été incluses dans la classe simplifiée « Conifères indifférenciés » et non dans la classe « Feuillus »
- La cartographie du CNRS étant plus précise, des polygones « Lande alpine », « Grande lande », « Inculte ou friche », « Grande formation pastorale », « Pelouse alpine » ou « Autre » de la cartographie de l'IFN étaient compris dans les polygones « Forêts », après intersection des deux cartes. On a donc attribué à ces polygones l'attribut du polygone « Forêt » le plus proche. Exemple :



Attribut IFN simplifié « 24 » :
« Pin sylvestre dense »

Attribut IFN « 44 » : « Grande lande »
Attribut CNRS « 1 » : « Forêt de conifères dense »

➔ Devient Attribut IFN simplifié « 24 » : « Pin sylvestre dense »

ANNEXE 4

Caractéristiques des essences forestières rencontrées dans le bassin de Barcelonnette

(d'après Rameau et al., 1993, et Chondroyannis, 1992)

Besoins en lumière :

++ : pleine lumière

+ : lumière

+ - : demie-lumière

- : ombre

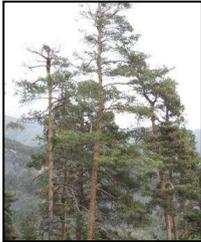
Résistance à la sécheresse :

++ : très résistant

+ : résistant

+ - : climat humide, mais supporte la sécheresse de l'air

- : exigeant en humidité

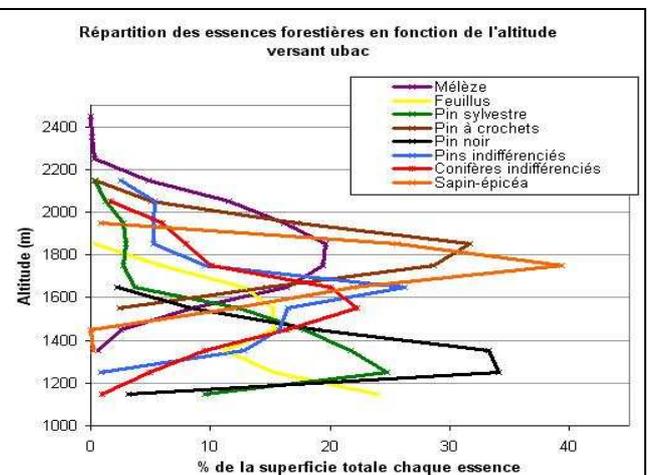
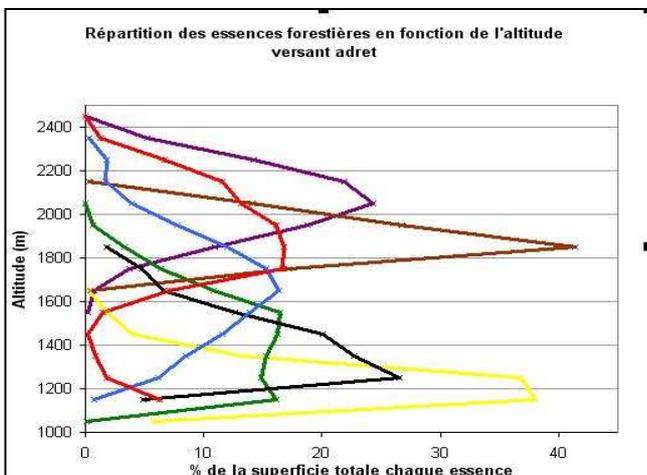
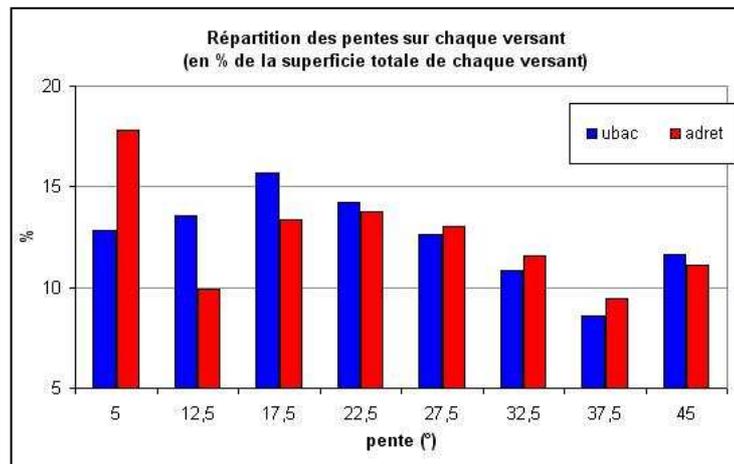
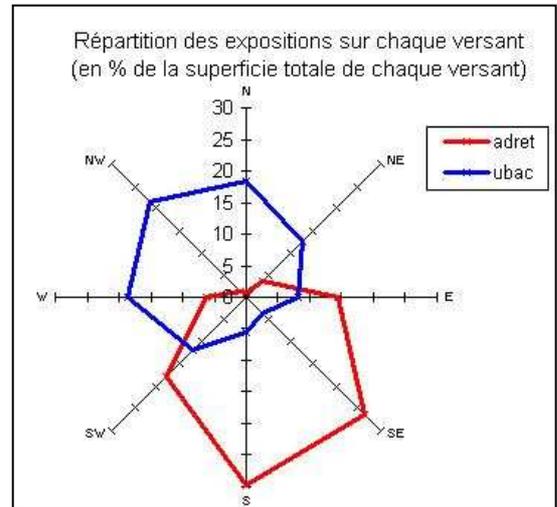
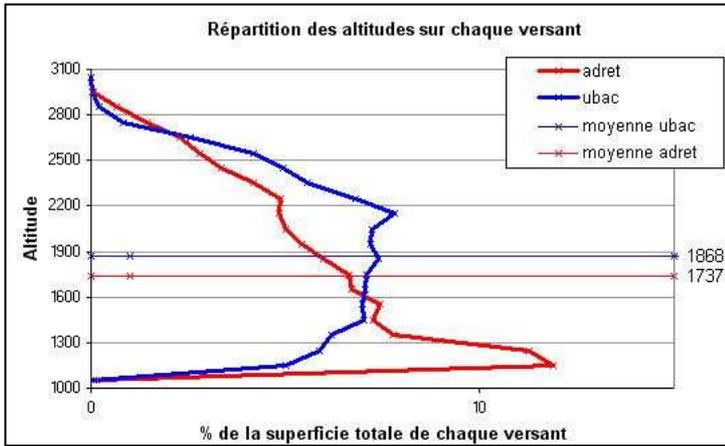
Nom essence	Pin sylvestre	Pin à crochets	Pin noir d'Autriche
Nom latin	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus uncinata</i>	<i>Pinus nigra</i>
Photographie			
Caractères diagnostiques	Ecorce brune, saumonée dans la partie supérieure du tronc Rameaux grisâtres Aiguilles vert grisâtre, groupées par deux, courtes, tordues sur elles mêmes. Cônes petits	Ecorce gris brun foncé Rameaux brun verdâtre Aiguilles vert foncé, raides, groupées par deux, longues Cônes dissymétriques, écailles en forme de crochets	Ecorce grise Aiguilles groupées par deux, rigides, vert foncé, longues, Cônes assez gros, brun clair
Longévité	200-300 ans	150 ans	200 ans
Période de végétation		Courte (3 mois)	
Distribution géographique	Vosges, Jura, Alpes Etage collinéen, subalpin	Pyrénées, Alpes Etage montagnard, subalpin	Europe centrale, Alpes du Sud Etage collinéen, montagnard
Besoins en lumière	++	++	+ -
Résistance au froid	+	++	+
Résistance à la sécheresse	+	++	+
Résistance au vent, neige	-	++	+
Enracinement	Superficiel	Superficiel	Superficiel
Type de sols	Tolère la pauvreté minérale Sols acides, calcaires	Indifférent. Sols pauvres en minéraux, substrats très divers (calcaire, gypse, tourbe, etc.)	Tolère le calcaire, peut végéter sur les terres noires des Alpes du Sud
Régénération	Fort pouvoir colonisateur Régénération naturelle très facile à découvert sur sols décapés ou pâturages abandonnés. Difficile sous couvert et sols enherbés	Colonisateur, mais craint la concurrence Pionnier sur éboulis et moraines Très utilisé en reboisement	Fort pouvoir colonisateur Très utilisé en reboisement

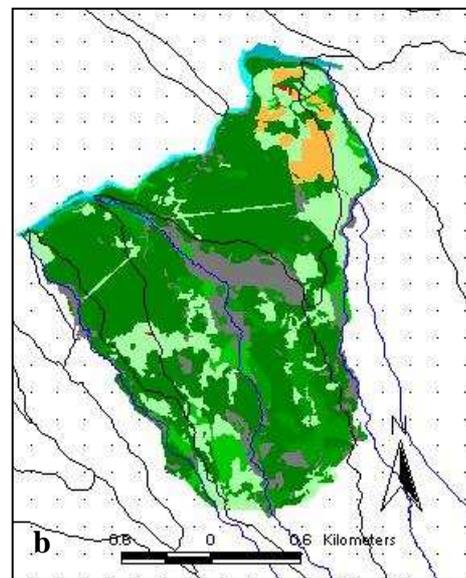
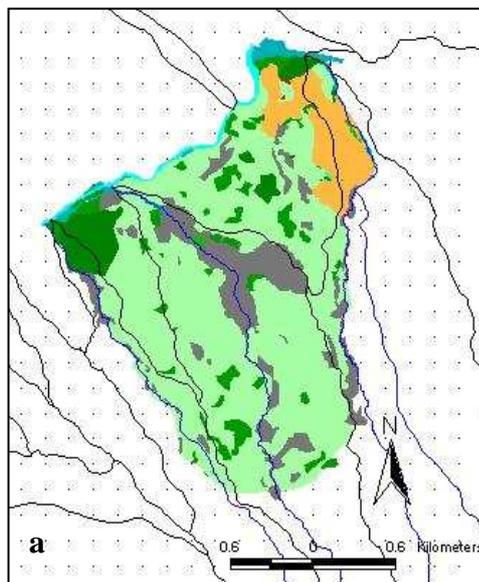
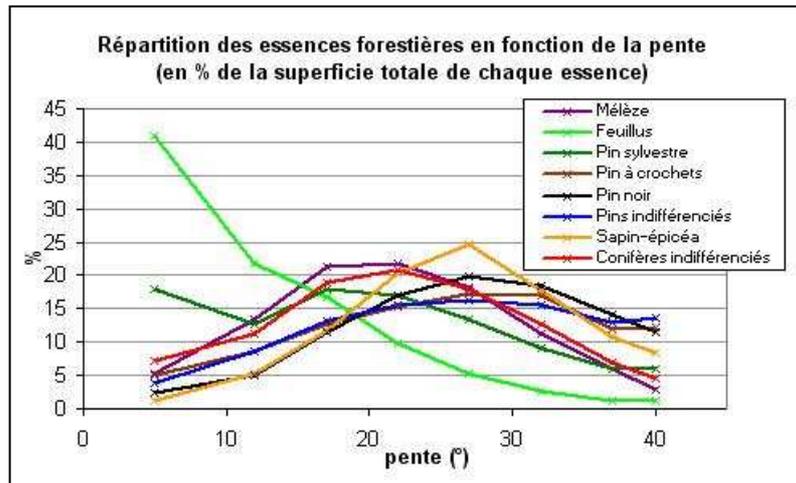
	Craint la concurrence Utilisé en reboisement		
Risques	Maladies, feu		Attaques de chenilles, gui

Nom essence	Mélèze d'Europe	Sapin pectiné	Epicea commun
<i>Nom latin</i>	<i>Larix decidua</i>	<i>Abies alba</i>	<i>Picea abies</i>
Photographie			
Caractères diagnostiques	Tronc droit, écorce grisâtre Rameaux gris jaunâtre Aiguilles vert clair, molles, caduques, en touffes Cônes ovoïdes	Ecorce lisse, gris argenté Aiguilles courtes, disposées de part et d'autre du rameau Cône dressé	Rameaux brun rougeâtre à orangé Aiguilles rigides, disposées tout autour du rameau Cônes allongés, pendants à maturité
Longévité	Jusqu'à 1000 ans	200 à 300 ans	Jusqu'à 300 ans
Période de végétation	Courte (3 à 6 mois)		
Distribution géographique	Alpes (du Sud) Etage subalpin	Vosges, Jura, Pyrénées, (Alpes) Etage montagnard, subalpin	Alpes du Nord, Jura, Alpes du Sud Etage montagnard, subalpin
Besoins en lumière	++	-	+
Résistance au froid	++	+	++
Résistance à la sécheresse	+ Forte capacité d'évapotranspiration	--	+-
Resistance au vent, neige	++	+	
Enracinement	Profond et fasciculé	Profond	Superficiel : Sensible aux chablis et à la sécheresse
Type de sols	Tous types de sols, bien alimentés en eau. Craint l'excès d'eau. Sols peu évolués : éboulis, moraines	Sols calcaire ou siliceux Eboulis, moraines Craint les sols compacts	Tous types de sols, calcaires, acides, gorgés d'eau, sauf les sols riches en carbonates
Régénération	Craint la concurrence de la végétation herbacée : colonise les sols décapés, ravins, couloirs d'avalanche, moraine. Peut coloniser les étages inférieurs (recul du pâturage depuis la fin du siècle dernier) Utilisé en reboisement	Se raréfie dans les Alpes du Sud (sécheresse)	Pouvoir colonisateur Utilisé en reboisement
Risques			Insectes, champignons

ANNEXE 5

Figures complémentaires à l'analyse spatiale de l'occupation des sols en 2004

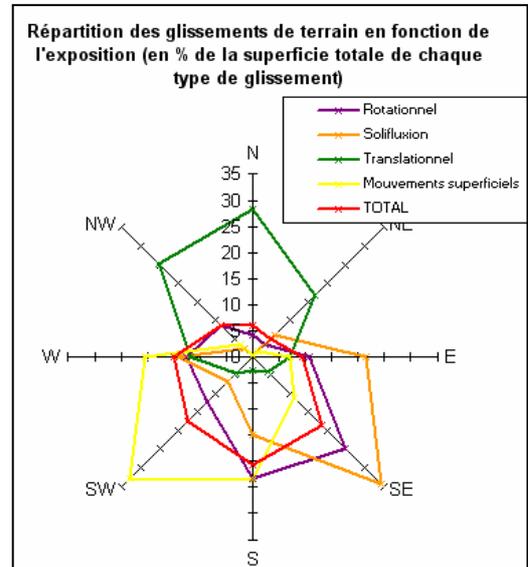
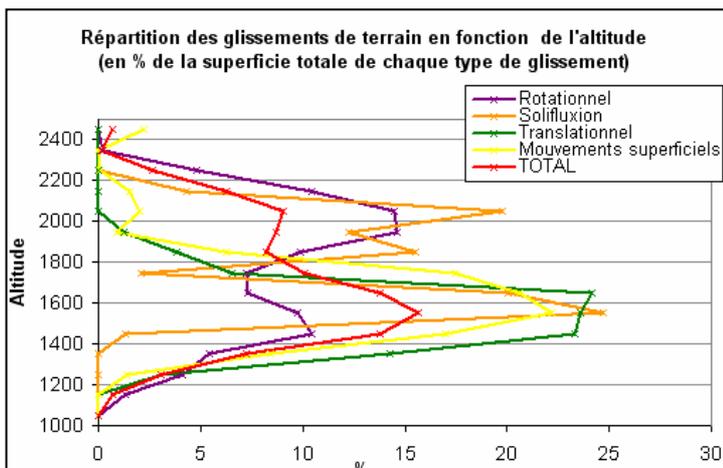
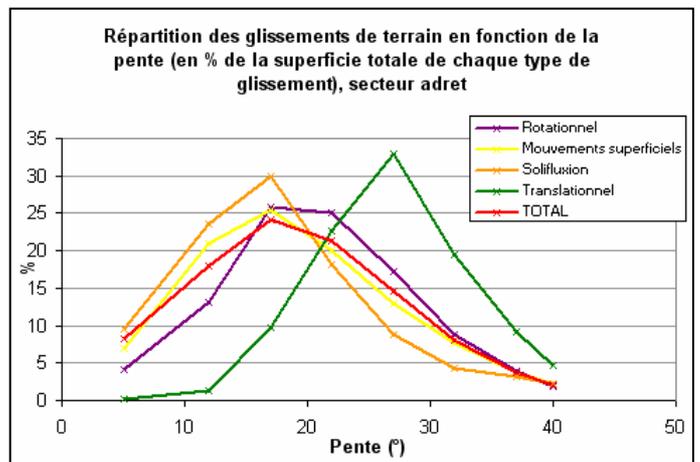
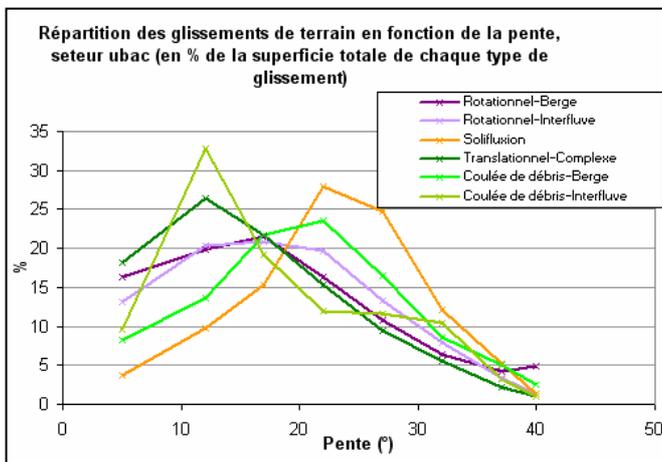
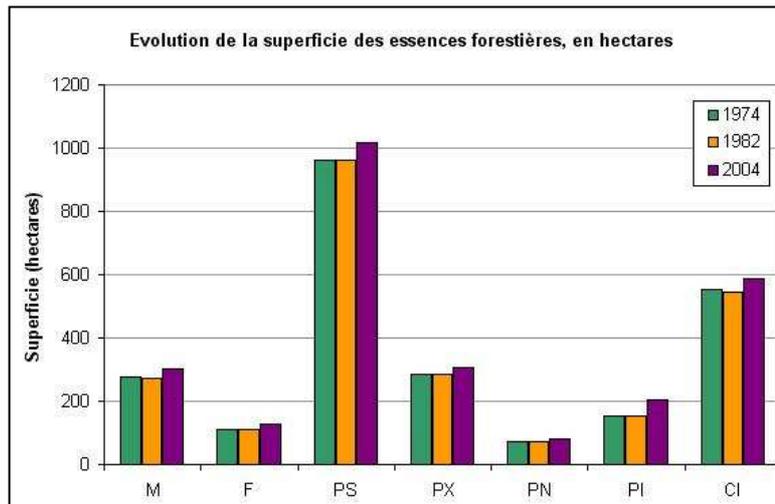


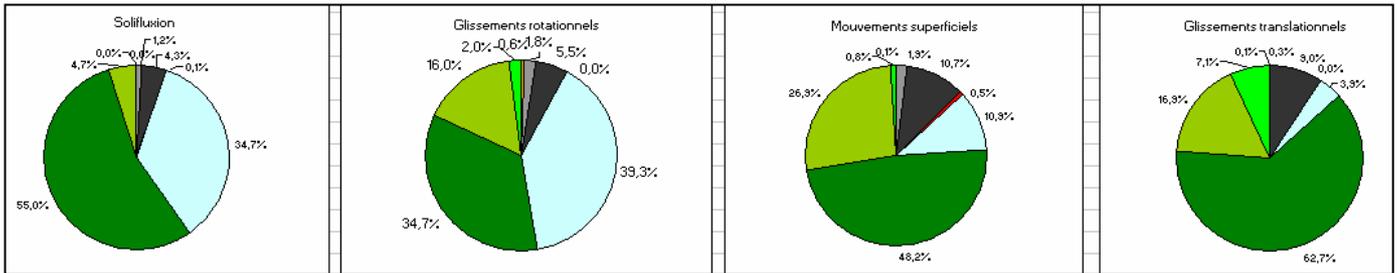


Légende

 Forêts de conifères denses	 Roches nues ou sols nus
 Forêts de conifères de densité moyenne à faible	 Marnes noires
 Forêts de feuillus	 Territoires artificialisés
 Prairies et pelouses	 Cours d'eau et plans d'eau
 Cultures permanentes	 Alluvions
 Réseau hydrographique	 Limite de bassin versant

Evolution de la forêt dans le secteur du Plan et du glissement de Poche, entre 1948 (a) et 2004 (b) (réalisé à partir d'une photographie aérienne de l'IGN de 1948, et de la mosaïque orthorectifiée de l'IGN de 2004)



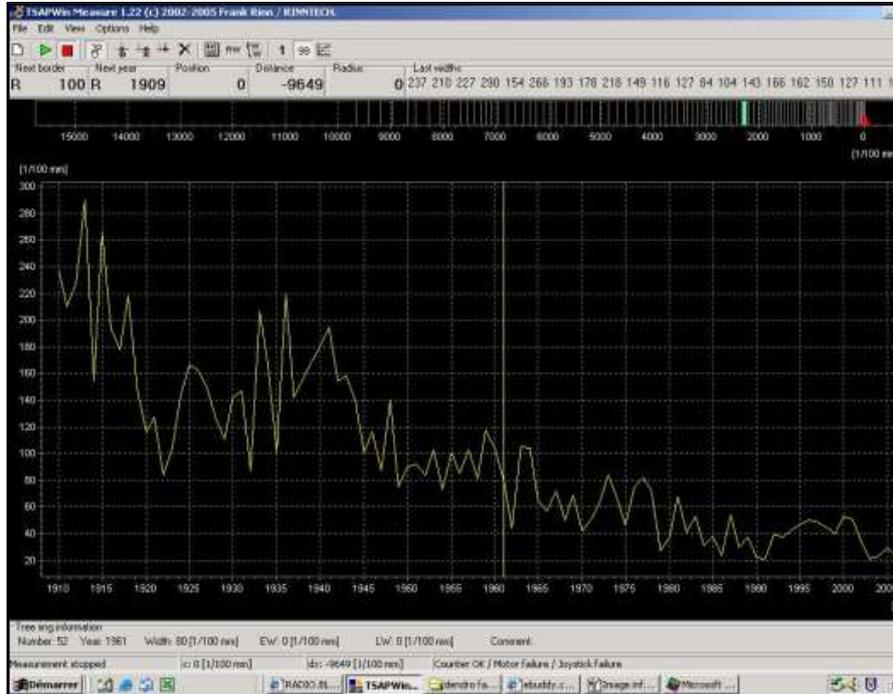


Répartition des glissements de terrain en fonction des classes d'occupation des sols

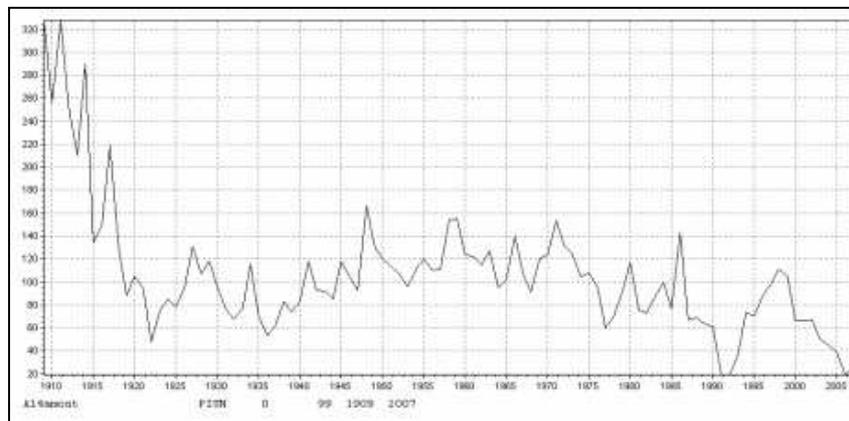
- Cultures permanentes
- Roches nues ou sols nus
- Marnes noires
- Territoires artificialisés
- Prairies et pelouses
- Forêts denses
- Forêts peu denses
- Feuillus

ANNEXE 6

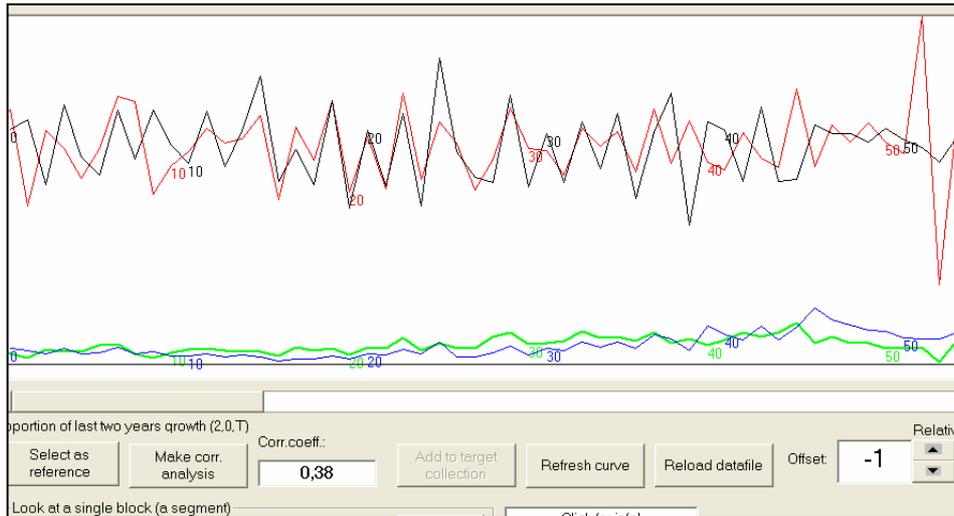
Logiciels d'analyses dendrochronologiques TSAP-Win et CDendro, et figures complémentaires à l'analyse dendrogéomorphologique



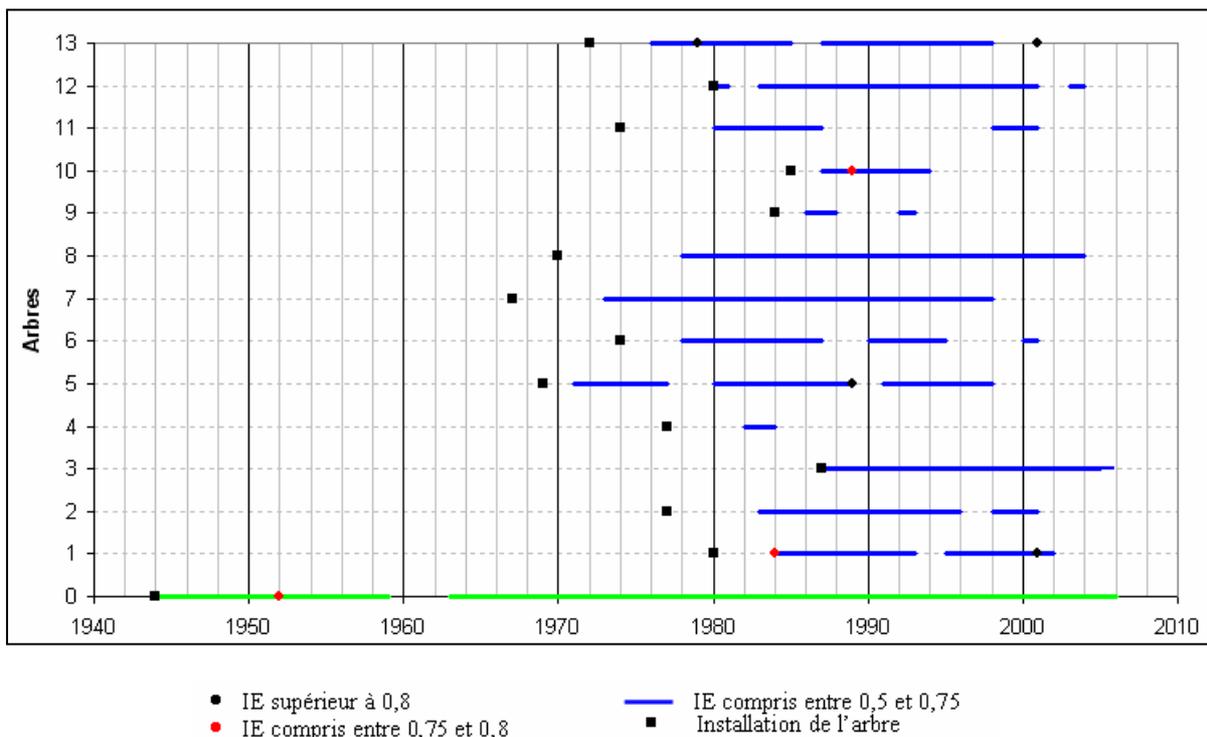
Exemple de comptage de cernes fourni réalisé par le logiciel TSAP-Win



Exemple de graphe de largeur de cernes en fonction de l'année, produit par le logiciel TSAP-Win



Exemple de test de corrélation effectué par le logiciel CDendro(arbre 6, site de Référence Aiguettes). Le logiciel indique qu'avec un décalage de la courbe de 1 cerne, le coefficient de corrélation est de 0,38. Déplacer la courbe sur la courbe de référence fait ainsi varier le coefficient de corrélation. Les courbes du haut sont les courbes normalisées de largeur de cernes

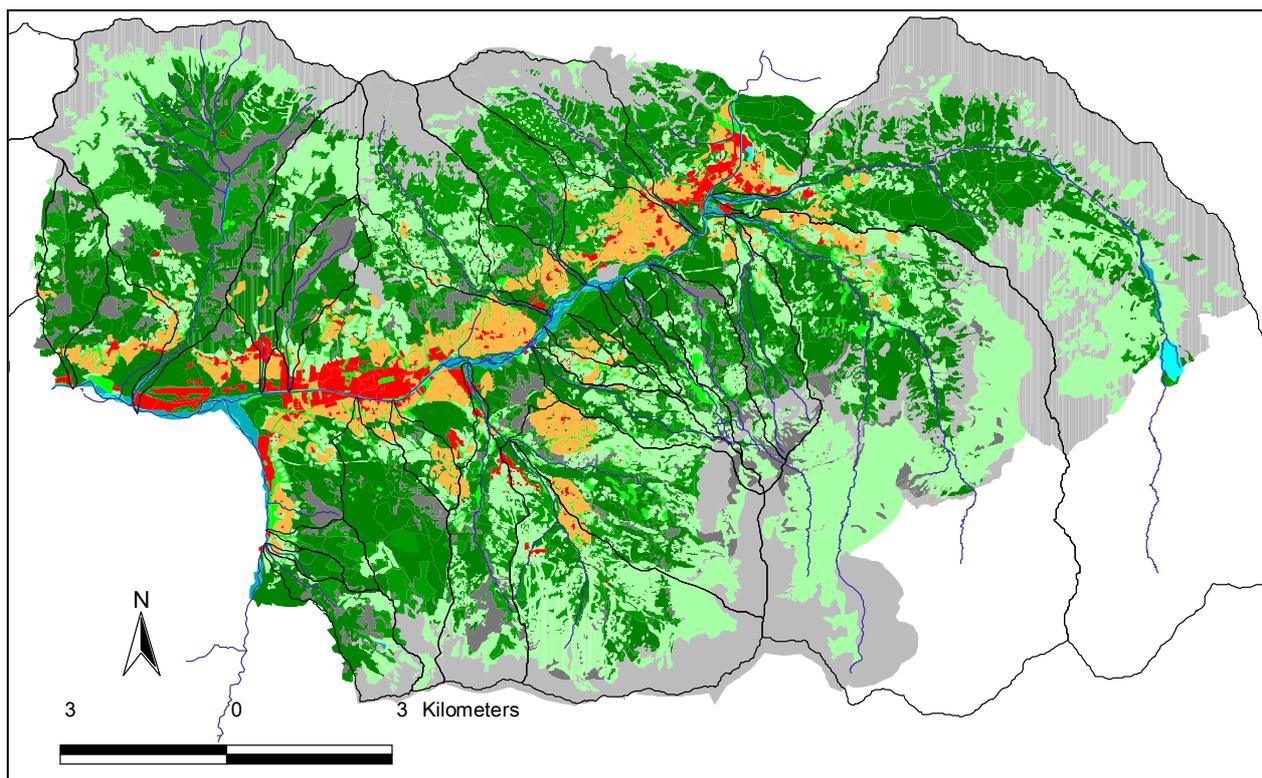


Réponses d'excentricité enregistrées par les arbres 1 à 13 du secteur du Plan

PLANCHE 1

Cartographie de l'occupation des sols dans le bassin de Barcelonnette en 2004

(Réalisation sous ArcView 3.1, à partir de la cartographie de 2000)



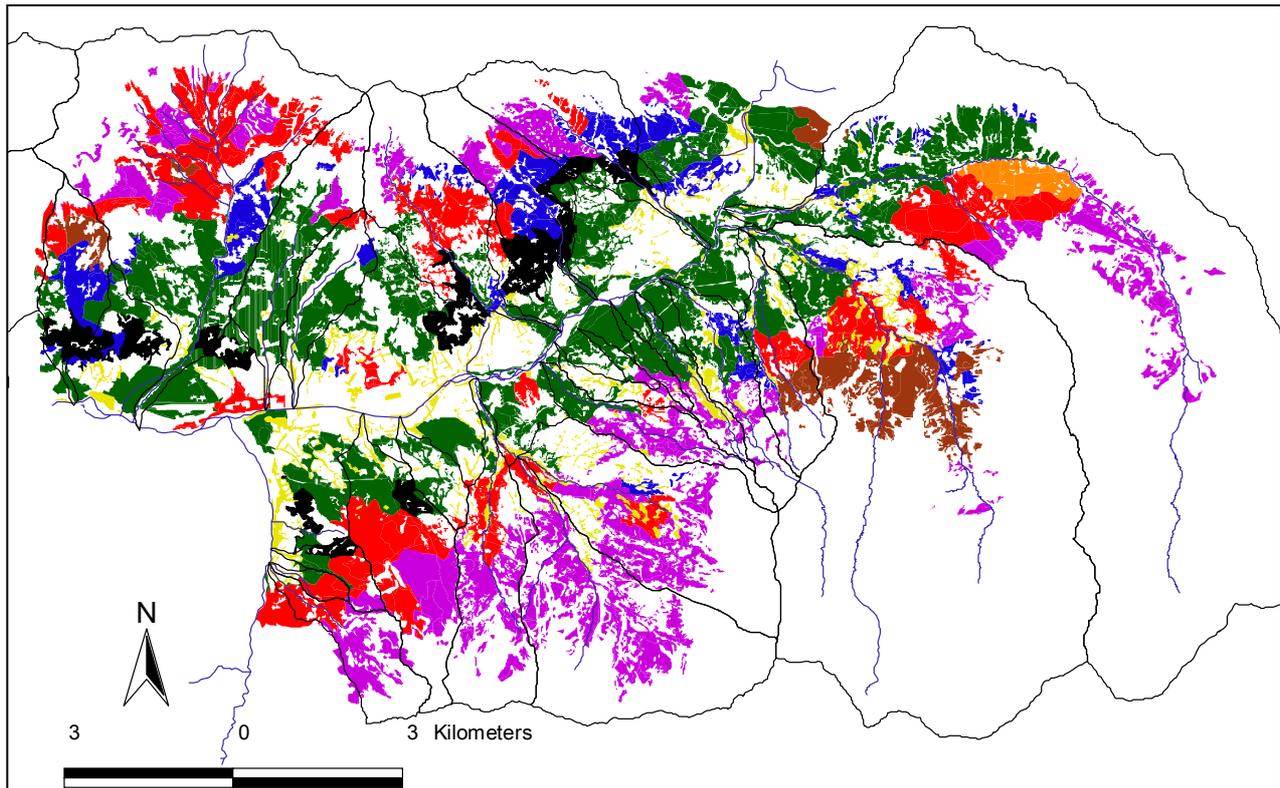
Légende

	Forêts de conifères denses		Roches nues ou sols nus
	Forêts de conifères de densité moyenne à faible		Marnes noires
	Forêts de feuillus		Territoires artificialisés
	Prairies et pelouses		Cours d'eau et plans d'eau
	Cultures permanentes		Alluvions
	Réseau hydrographique		Limite de bassin versant

PLANCHE 2

Cartographie des essences forestières dans le bassin de Barcelonnette

(Réalisation sous ArcView 3.1, à partir des données de l'Inventaire Forestier National de 1999)



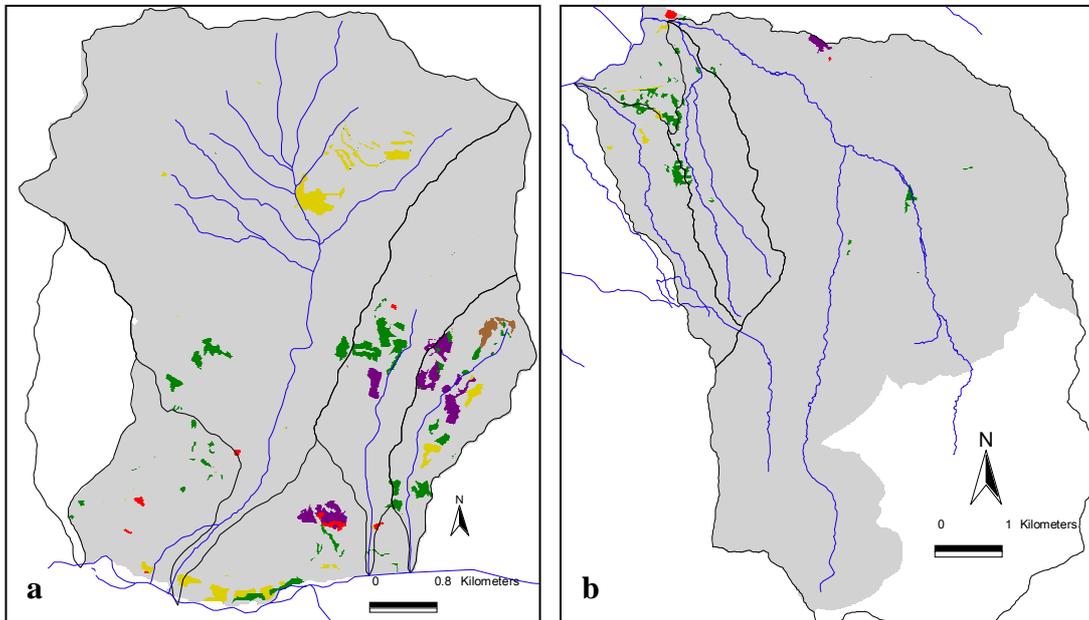
Légende

- | | |
|---|---|
|  Feuillus |  Mélèze |
|  Pin sylvestre |  Sapin-Epicéa |
|  Pin à crochets |  Conifères indifférenciés |
|  Pin noir d'Autriche |  Pins indifférenciés |
|  Réseau hydrographique |  Limite de bassin versant |

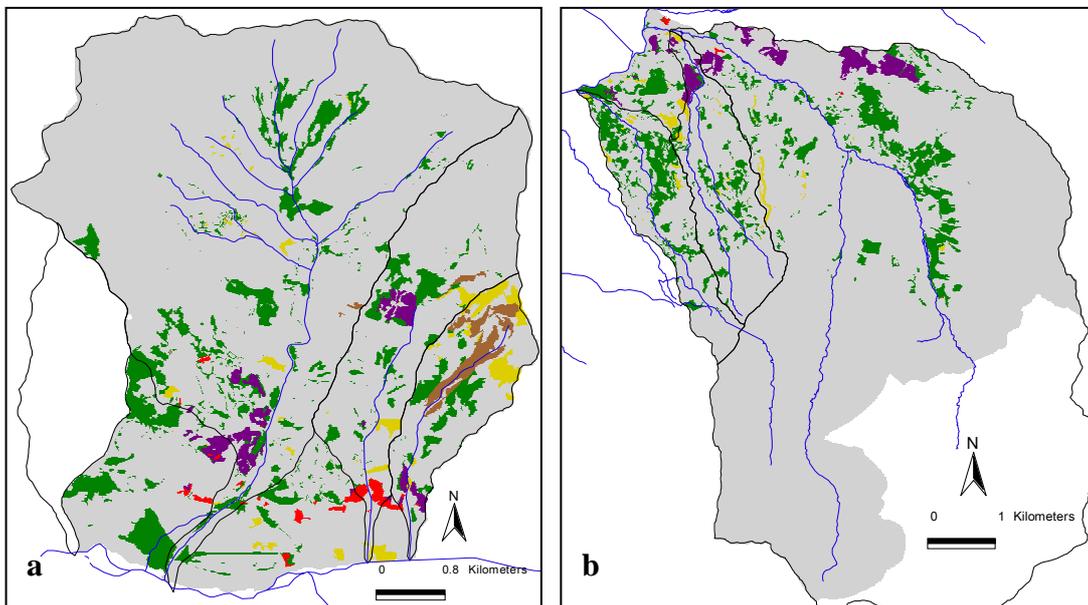
PLANCHE 3

Cartographies de l'évolution de l'occupation des sols entre 1974 et 1982, puis entre 1982 et 2004, secteurs adret et ubac

(Réalisation sous ArcView 3.1)



Evolution de l'occupation des sols entre 1974 et 1982, secteur adret (a) et ubac (b)



Evolution de l'occupation des sols entre 1982 et 2004, secteur adret (a) et ubac (b)

Légende

■ Aucun changement	■ Déprise agricole
■ Progression de la forêt	■ Urbanisation
■ Recul de la forêt	■ Apparition de glissement de terrain
— Réseau hydrographique	— Limite de bassin versant

PLANCHE 4
Carte géomorphologique du site des Aiguettes

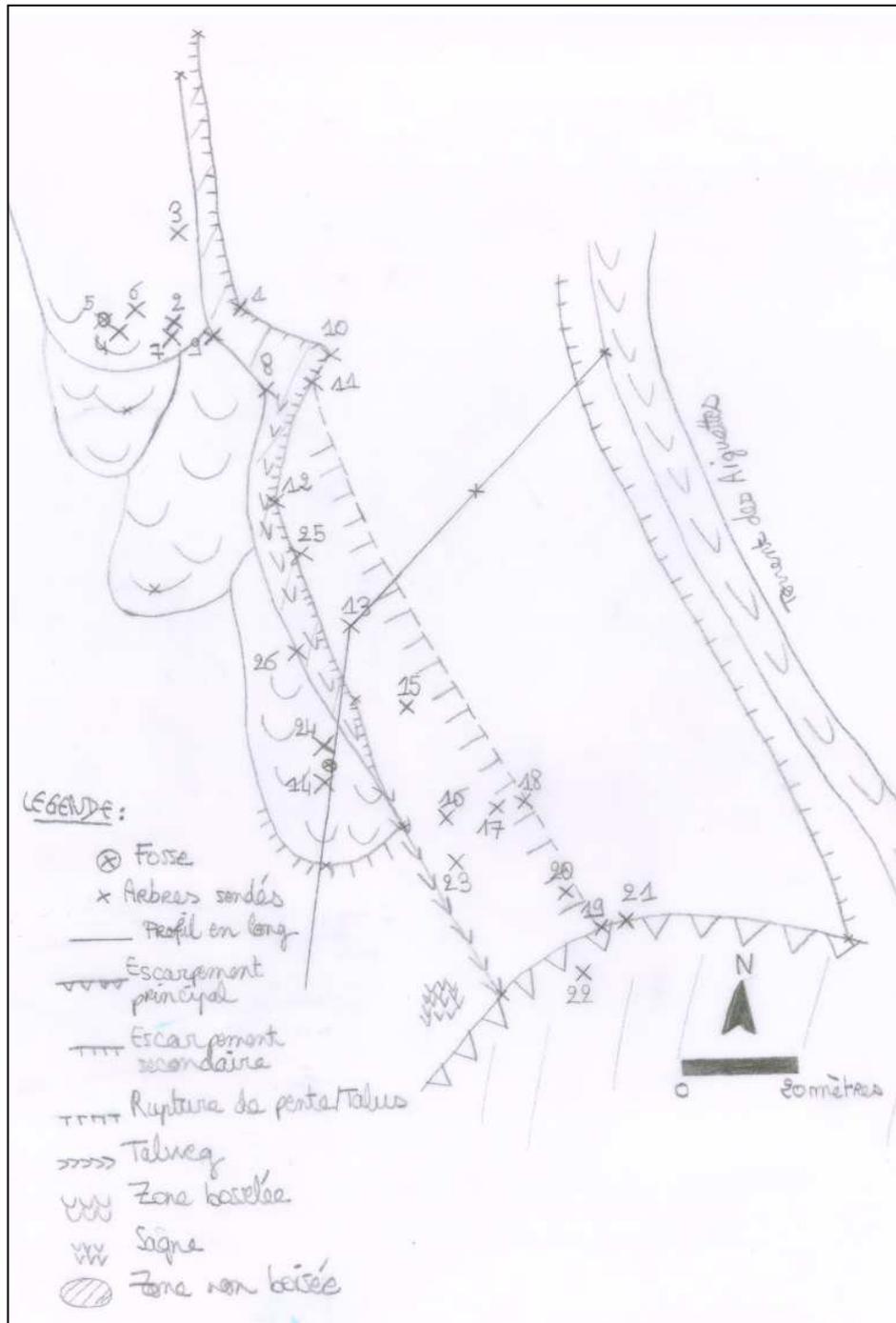
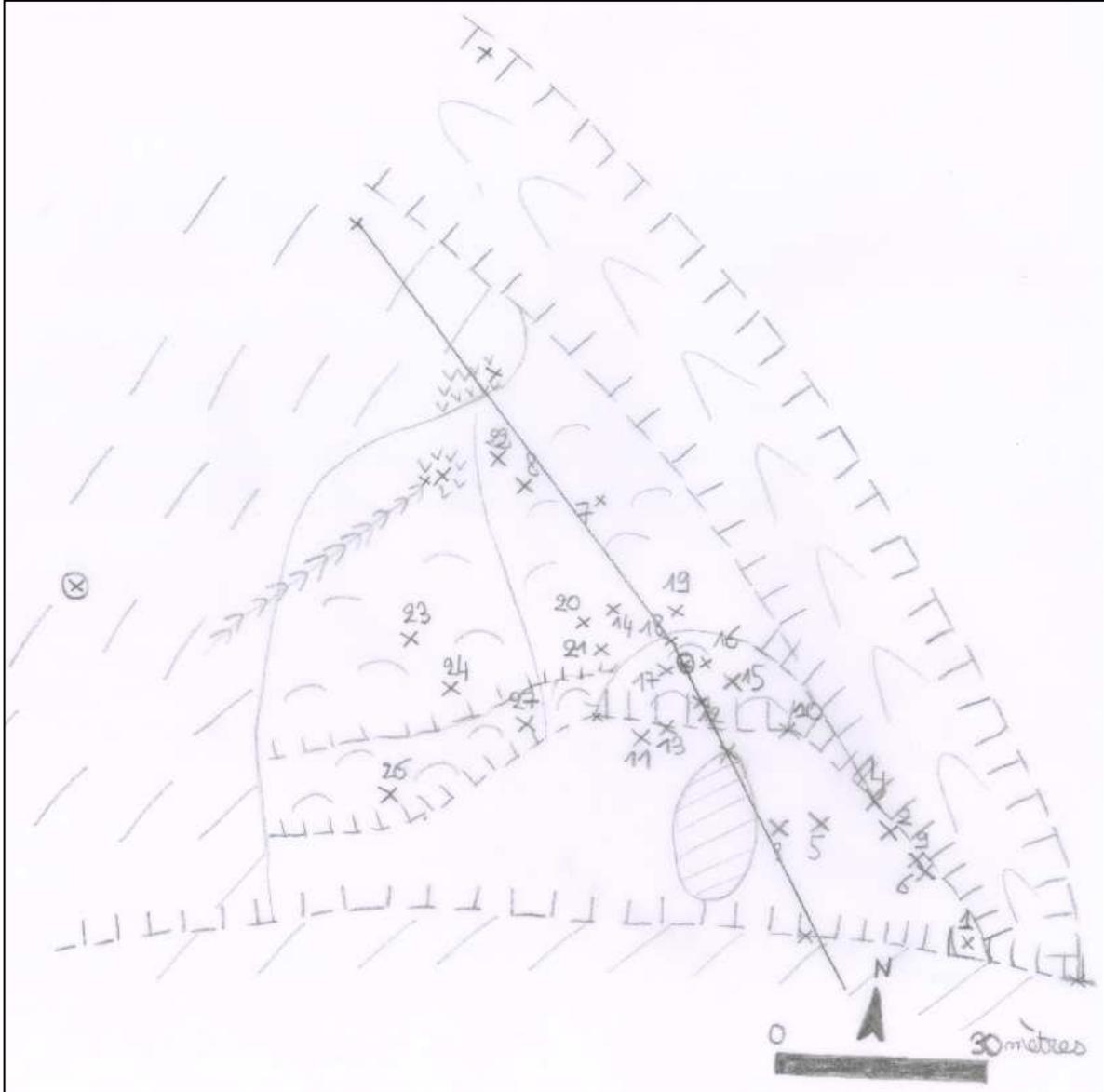


PLANCHE 5
Carte géomorphologique du site du Plan



**Influence de la végétation arborée
sur l'activité de glissements de terrain superficiels
Exemple du bassin de Barcelonnette,
Alpes de Haute Provence (04)**

Résumé

Ce travail de fin d'études a pour objectif de déterminer les liens potentiels existant entre la forêt et l'activité de glissements de terrain superficiels dans les Alpes du Sud. Une première analyse est réalisée **à l'échelle du bassin de Barcelonnette**, afin de mettre en relation dynamique de la végétation arborée au cours du siècle dernier et localisation des glissements de terrain. Le travail cartographique et la consultation d'archives montre la progression importante des superficies boisées depuis la fin du 19^{ème} siècle. On constate une forte occurrence des instabilités sous forêt, et des glissements actifs sous des forêts jeunes. L'analyse reste limitée par le manque d'informations sur la dimension temporelle de l'aléa. La seconde étape est la détermination du lien entre végétation arborée et instabilités **à l'échelle locale**. Une analyse dendrogéomorphologique est effectuée sur deux secteurs cibles, différents par leur dynamique de végétation et leur activité géomorphologique, afin d'étudier l'influence de la forêt, en tant qu'**indicatrice** de l'instabilité d'un versant. Plusieurs périodes instables sont mises en évidence, en étroite relation avec les conditions climatiques du siècle dernier. Certaines réponses semblent traduire des mouvements de plus grande ampleur sur les versants. Enfin, la forêt en tant que **stabilisatrice potentielle** d'un versant est considérée ; les caractéristiques hydromécaniques des sols sont étudiées, en procédant à des simulations de l'état d'instabilité des secteurs avec le modèle de stabilité de pente **CHASM**. Si les prélèvements de sol ne montrent pas de différences significatives entre les secteurs, la simulation donne des résultats satisfaisants, en montrant le rôle positif de la végétation arborée sur l'activité de glissements de terrain.

**Impacts of vegetation on shallow landslide activity
in the Barcelonnette Basin
(French southern Alps)**

Abstract

This paper presents the results of a study about the relations between the forests and landslide activity in a mountain area. First, forest dynamics in the Barcelonnette basin is analyzed. It shows the increase of forest surfaces during the last century. The forest dynamics map is combined with the landslide map. The results are a strong occurrence of landslides in forested areas and of active processes in young forests. Second, two located areas are studied. A dendrogeomorphological analysis shows several instability periods in relation with climatic variations. Maybe the movements occurred in a larger area. Finally, soil characteristics are studied, in order to underline some differences between the two sites. The CHASM slope stability model is used, to assess the instability of the sites according to the soil characteristics and the vegetation. It shows the positive impact of vegetation on landslide activity.