



**HAL**  
open science

# Érosion des sentiers en moyenne montagne auvergnate

Audrey Martinat

► **To cite this version:**

Audrey Martinat. Érosion des sentiers en moyenne montagne auvergnate. Géographie. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2015. Français. NNT : 2015CLF20025 . tel-02018027

**HAL Id: tel-02018027**

**<https://theses.hal.science/tel-02018027>**

Submitted on 13 Feb 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# ÉROSION DES SENTIERS EN MOYENNE MONTAGNE AUVERGNATE



**Audrey MARTINAT**

*Thèse pour l'obtention du Doctorat de Géographie  
Présentée et soutenue publiquement le 17 décembre 2015*

**JURY :**

Marie-Françoise ANDRÉ – Professeur, Université Blaise Pascal  
Raphaël PARIS – Chargé de Recherche CNRS, Laboratoire Magmas et Volcans  
Charles LE COEUR – Professeur émérite, Université de Paris I  
Samuel ÉTIENNE – Directeur d'Étude, EPHE  
Patrick WASSMER – Maître de conférences, Université de Strasbourg  
Philippe LABAZUY – Physicien adjoint, OPGC  
Thierry LEROY – Conservateur de la Réserve Chastreix-Sancy

# Sommaire

<b>AVANT-PROPOS .....</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>5</b>
<b>PARTIE 1 : ÉTAT DE L'ART .....</b>	<b>11</b>
<i>Chapitre 1 : Sentiers et ravines en moyenne montagne : formes d'érosion et dispositifs anti-érosifs .....</i>	<i>15</i>
<i>Chapitre 2 : Les différentes méthodes de quantification de l'érosion des sentiers ou ravines.....</i>	<i>29</i>
<b>PARTIE 2 : SITES D'ETUDE ET METHODOLOGIE .....</b>	<b>47</b>
<i>Chapitre 3 : Présentation des sites d'étude .....</i>	<i>51</i>
<i>Chapitre 4 : Méthodologie.....</i>	<i>77</i>
<b>PARTIE 3 : RESULTATS .....</b>	<b>101</b>
<i>Chapitre 5 : Les sentiers du massif du sancy : présentation des résultats .....</i>	<i>105</i>
<i>Chapitre 6 : Les sentiers de la chaîne des puys : présentation des résultats .....</i>	<i>123</i>
<b>PARTIE 4 : INTERPRETATION – DISCUSSION .....</b>	<b>163</b>
<i>Chapitre 7 : Apports et limites des méthodes utilisées .....</i>	<i>167</i>
<i>Chapitre 8 : Analyse des résultats par secteur d'étude .....</i>	<i>179</i>
<i>Chapitre 9 : Enseignements généraux et préconisations de gestion .....</i>	<i>201</i>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>213</b>
<i>Bibliographie .....</i>	<i>225</i>
<i>Annexes .....</i>	<i>233</i>
<i>Liste des figures .....</i>	<i>245</i>
<i>Liste des tableaux.....</i>	<i>249</i>
<i>Table des matières .....</i>	<i>251</i>



## Avant-propos

Ce mémoire est l'aboutissement de six années d'étude pendant lesquelles il n'a pas toujours été aisé de garder le moral et l'espoir. Mais j'ai la chance d'avoir été entourée par des personnes formidables (famille, amis, collègues) qui ont su m'apporter leur aide dans les moments difficiles et m'aider à garder le cap jusqu'à la conclusion de cette grande aventure. Avec cet avant-propos je tiens à les remercier sincèrement.

En premier lieu, je souhaiterais remercier sincèrement mes directeurs de thèse. J'ai eu la chance de bénéficier de deux points de vue à la fois différents et complémentaires. Ma directrice de thèse, **Marie-Françoise André**, a fait preuve d'une grande patience à mon égard, m'a toujours encouragée et m'a apporté une aide précieuse. À mon co-directeur de thèse, **Raphaël Paris**, qui m'a encadré depuis mon Master 2, je tiens à lui adresser ma grande reconnaissance pour la confiance qu'il m'a accordée et pour ses conseils avisés qui m'ont permis de progresser. Je n'oublierai pas les nombreuses journées passées ensemble sur le terrain.

Outre l'apport matériel et pratique qu'il m'a apporté, le laboratoire **Geolab** a été un formidable lieu d'accueil pour mener cette thèse à son terme dans les meilleures conditions. Je tiens à remercier l'ensemble des membres du laboratoire et en particulier **Erwan Roussel** (pour son aide précieuse et nos discussions improvisées autour d'un café en 107 ou d'une bière à la BJ), **Franck Vautier et Olivier Voldoire** (pour leur aide sur le terrain et leurs conseils avisés), **Emmanuelle Defive** (ses stages terrain avec les étudiants de licence m'ont beaucoup appris), le directeur du laboratoire **Jean-Luc Peiry** (pour son accueil chaleureux au sein du laboratoire), et tous les autres (pour leur gentillesse et leur accueil) : Johannes, Dov, Jean-Pierre, Christophe, Jérôme, Sébastien, Manon, Nathalie... Je remercie également mes collègues doctorants pour leur bonne humeur quotidienne : les anciens : **Erwan, Susanne, Alexandre, Marion et Ana** ; et les actuels : **Paul-Edgard, Borbála, Alfredo et Adrien**. Mais je tiens surtout à remercier l'ensemble de mes amis du **Club des Gourmets**, nos repas du vendredi midi me manqueront terriblement. Membres acharnés ou occasionnels, ces repas hebdomadaires ont été

pour moi une bouffée d'air frais, merci de votre participation : Chantal, Aude, Estelle, Marta, Wendy, Mohamed, Stéphane, Olivier, Gaspard, Bori, Paul-Edgard, le Grand Paul, Alfredo, Yannick, Marta M, Ana C, Ana E, Manon, Virginia, Sébastien, Vincent Valentina, Coline, Arthur, Amélie, Loïc, Soizic et Daouda.

Je souhaite également remercier les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail : **Samuel Étienne, Charles Le Cœur, Philippe Labazuy, Patrick Wassmer et Thierry Leroy.**

Je souhaite remercier vivement tous mes collègues et amis qui m'ont apporté leur aide et soutien dans les divers aspects de ma thèse. Un immense merci à mes relecteurs préférés, **Coline et Gaspard**, qui m'ont corrigé de nombreuses fautes et parfois même traduit en français quelques phrases écrites en « berrichon ». Vous m'avez été d'une très grande aide. À mes nombreux compagnons de terrain avec qui j'ai partagé le lourds poids du matériel de relevé topographique le temps d'une journée, merci à vous : Susanne, Marion, Erwan, Alexandre, Olivier, Franck, Borbála, Saraline, Coline, David Arthur, Paul-Edgard, Nicolas, Christophe, Marjorie, Vahiné, Lewis, Anaïs, Seydou, Denis et Thomas, en espérant n'avoir oublié personne.

Sur un plan plus personnel, je tiens à remercier ma famille et ma belle-famille pour leur soutien et leur aide. J'avoue qu'il n'a pas dû être très facile de composer avec mes obligations et parfois mes sautes d'humeur liées au stress. Je tiens à remercier ma maman avec un clin d'œil particulier : *Quaque c'est qu'la thèse a m'causait d'la déplasantise, queques aubertas ou ben eune grosse acabasse, eule simp fait d'fafioter ensemb ça me r'mettait l'tétiau en place !*

Et enfin, un grand merci à mon mari, sans qui je ne serais probablement jamais arrivée au terme de cette thèse. Tu as été mon plus grand soutien, pour cette raison et pour une infinité d'autres, je te remercie.

# Introduction générale

## Contexte et enjeux de la recherche

L'érosion liée aux pratiques touristiques au sein des parcs naturels est une thématique récurrente pour les gestionnaires de ces espaces. Les régions montagneuses sont particulièrement prisées pour les activités touristiques, tant hivernales qu'estivales. Elles sont d'autant plus impactées par la fréquentation touristique qu'elles présentent de fortes pentes et sont affectées par un climat rigoureux caractérisé par des excès pluviométriques (précipitations orageuses, effet du gel...); ces conditions particulières rendent parfois délicate l'implantation durable ou la réimplantation d'une couverture végétale. Ces milieux sensibles sont souvent soumis à des réglementations de protection et de préservation; les classifications qui en découlent, tel que le label « parc naturel », ajoutent à leur attrait touristique. La surfréquentation provoque des dégradations morphologiques et environnementales, parfois irréversibles (Pop *et al.*, 2009a) car le développement des différentes activités touristiques et sportives (randonnées, ski, évènement sportif...) conduit de plus en plus les gestionnaires à aménager ces espaces montagnards pour les rendre plus attractifs.

Par ces interventions, les gestionnaires répondent à une demande croissante de loisirs en plein air, de « retour à la nature ». Cependant, ces aménagements impactent l'évolution des versants de moyenne montagne par le biais d'un forçage anthropique venant perturber les interactions entre des traditionnels facteurs physiques liés au contexte morphostructural (lithologie, topographie) et bioclimatique (végétation, climat). Notons que cette fréquentation contemporaine liée aux loisirs prend en quelque sorte la suite d'une fréquentation liée au pâturage intensif, qui était encore très développé à la fin du XIXe siècle.

Dans ce contexte, nous avons choisi de travailler sur les sentiers de la moyenne montagne auvergnate. Ces sentiers situés sur des estives sont à la fois des lieux de passage pour les touristes et pour les troupeaux. L'utilisation des sentiers, l'hétérogénéité des substrats volcaniques et le climat montagnard qui y règne rendent

ces sites particulièrement propices aux processus érosifs dont l'évolution est mesurable à une échelle de temps relativement courte.

## **Problématique et objectifs de recherche**

Il existe de nombreuses études de suivi d'érosion des sentiers ou ravines en milieu de moyenne montagne, mais de telles études réalisées en terrain volcanique sur des substrats aussi hétérogènes que ceux de la Chaîne des Puys ou du Massif du Sancy sont relativement rares.

Lorsque les sentiers deviennent trop endommagés et font courir un risque aux randonneurs, les solutions apportées sont : (1) la mise en place d'aménagements, souvent lourds, pour réhabiliter le sentier ; (2) voire l'interdiction d'accès et l'abandon du sentier. Ces solutions ne semblent pas idéales sur le long terme, le but n'étant pas de dénaturer l'environnement avec des aménagements lourds sur l'ensemble des sites accessibles ou d'interdire ces sentiers au public. Ce travail cherche donc à apporter des connaissances permettant de déterminer des solutions intermédiaires permettant de concilier accès au public et préservation de l'environnement.

Dans ce contexte, notre réflexion s'articulera autour des questions suivantes :

- Quels sont les facteurs contrôlant l'érosion des sentiers de moyenne montagne auvergnate ?
- Dans quel cadre temporel s'inscrivent les processus érosifs et quels sont les volumes impliqués par l'érosion des sentiers ?
- Existe-t-il des modèles d'évolution morphologique de ces sentiers ?
- Peut-on agir avant d'arriver à un stade trop avancé nécessitant des interventions extrêmes ?
- Une fois abandonnés, quel est le devenir des sentiers ?

Pour répondre à cette problématique nous avons défini les objectifs suivants :

- Quantifier les volumes d'érosion et de dépôt des secteurs choisis ;
- Localiser et cartographier, au sein des sentiers étudiés, les secteurs les plus sensibles à l'érosion, en nous plaçant dans une perspective diachronique ;
- Effectuer des relevés saisonniers pour déterminer les volumes impliqués et identifier les processus érosifs estivaux et hivernaux ;

- Réaliser un outil simple, utilisable par les gestionnaires, suggérant des dispositifs anti-érosifs en adéquation avec leur problématique.

Nous chercherons donc à mesurer l'évolution spatio-temporelle des sentiers à l'aide d'un suivi topographique saisonnier. Ce travail sera couplé avec une étude climatique et une étude sur le comportement des randonneurs sur les sentiers. Les différentes étapes de ce travail nous permettront de comprendre les facteurs qui contrôlent les processus érosifs et appréhender leur rythmicité dans l'optique de proposer une gestion adaptée aux différents types de sentiers de la moyenne montagne auvergnate.

## **Terrain d'étude**

Nous avons choisi d'effectuer ce suivi d'érosion au sein du Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne (PNRVA) pour plusieurs raisons. Tout d'abord, la protection des territoires de moyenne montagne auvergnate ne s'arrête pas au label « parc naturel régional ». En effet, certains secteurs des 388 957 hectares que compte le PNRVA sont classés sous plusieurs labels tels que les réserves naturelles nationales, le site du Puy de Dôme classé « Grand site de France », les sites Natura 2000, les différentes ZNIEFF (Zone Naturelle d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique), et plus récemment, le projet d'inscription de la Chaîne des Puys et faille de Limagne au patrimoine mondiale de l'UNESCO.

Le besoin de protection et de conservation des écosystèmes particuliers demande une connaissance particulière des milieux pour envisager une gestion adaptée. De plus, le PNRVA, et plus particulièrement les terrains d'étude choisis (Fig. 1), sont situés à proximité de hauts lieux touristiques : trois stations de ski (la station du Mont-Dore, Super-Besse et Chastreix-Sancy), nombreux centres thermaux (notamment aux Mont-Dore et à la Bourboule), proximité de Clermont Ferrand (capitale auvergnate), réseau de sentiers de petites et grandes randonnées. Ces sites sont donc soumis à des enjeux économiques et sociaux importants. Pour ces raisons, la fréquentation touristique est grandissante et devrait augmenter avec l'éventuelle inscription de la Chaîne des Puys au patrimoine mondiale de l'UNESCO.

Dans le double contexte d'une pression touristique de plus en plus forte et d'une volonté de protection et de préservation des espaces, notre projet est de contribuer à ouvrir de nouvelles perspectives de gestion durable en apportant des outils d'aide à la décision.

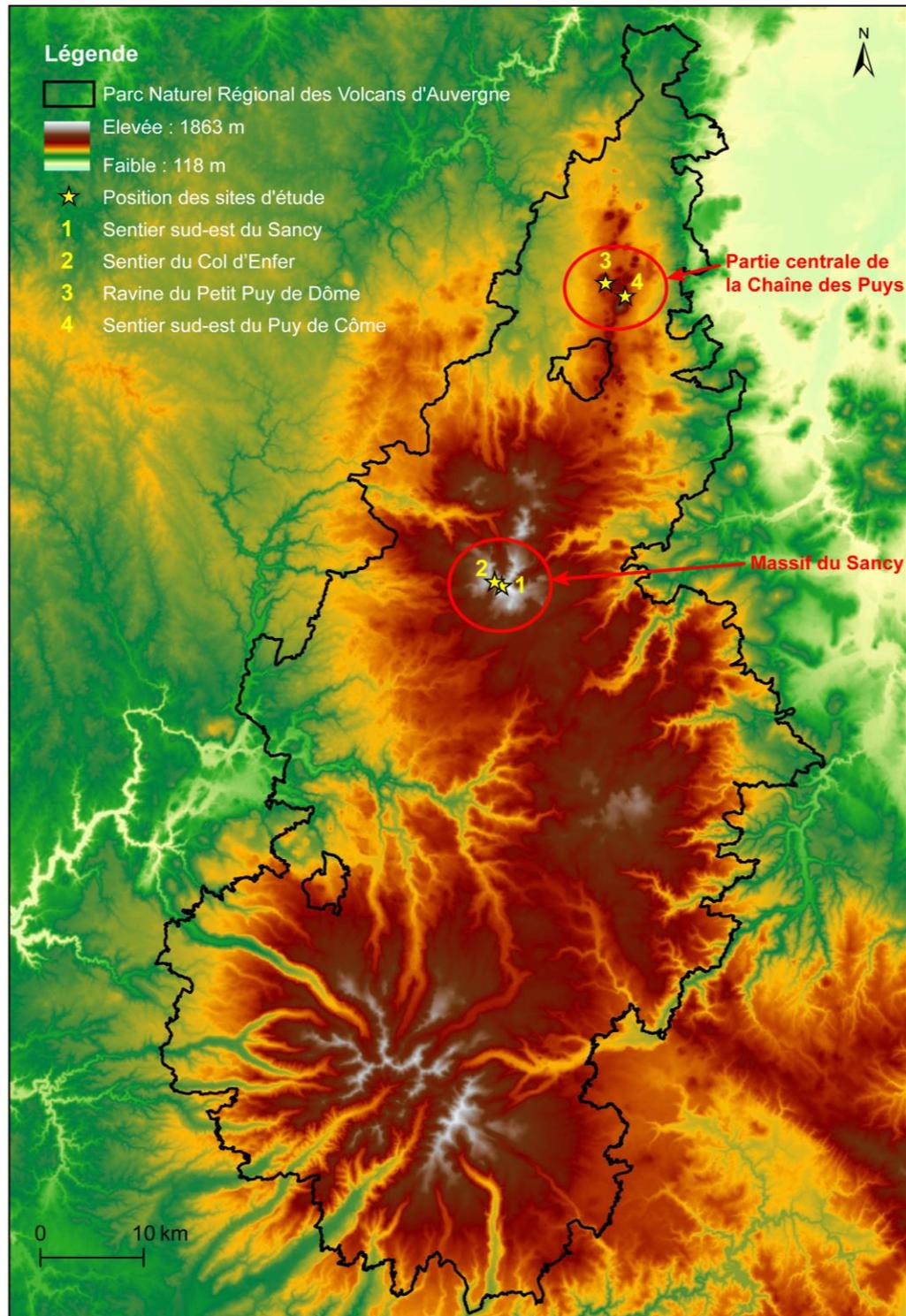


Fig. 1. Localisation des sites d'étude situés dans le Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne (PNRVA).

## Méthodologie

L'état de dégradation des sentiers et leur évolution récente sont au cœur des préoccupations des chercheurs depuis les années 1960. Jusque dans les années 1980, les études sur la thématique des sentiers ont été réalisées à partir de méthodes qualitatives (méthode de classement : Frissell, 1978 ; Bratton *et al.*, 1979) et de méthodes quantitatives (relevés manuels : Helgath, 1975 ; Leonard et Whitney, 1977 ; Cole, 1983), stéréophotogrammétrie (Walker, 1968 ; Rinehart *et al.*, 1978)). Beaucoup de ces travaux ne présentent qu'un état des lieux des sentiers à un instant donné. Depuis la fin des années 1990, le développement de nouvelles technologies, à la fois au niveau des appareils de mesures et des logiciels de traitement, a permis la conception de nouvelles méthodes. Ces dernières produisent des résultats de plus en plus précis avec des résolutions spatiales de plus en plus fines telles que les méthodes basées sur l'utilisation de GPS différentiel (Perroy *et al.*, 2010 ; Marion *et al.*, 2012), puis les méthodes de photogrammétrie multi-images (Marzolff *et al.*, 2011) et de LiDAR aéroporté (Evans et Lindsay, 2010 ; Kinsey et Challis, 2010) et terrestre (Dąbek *et al.*, 2013 ; Rengers et Tucker, 2015). Cette gamme de méthodes permet de répondre à des problématiques variables en termes de résolution spatiale et temporelle.

Plutôt que de choisir une méthode de suivi d'érosion unique applicable à l'ensemble de nos terrains, nous avons opté pour différentes méthodes adaptées aux caractéristiques de chaque terrain d'étude. Ainsi, nous avons utilisé des méthodes telles que la lasergrammétrie terrestre et des méthodes traditionnelles comme une méthode de relevé manuel qui permet d'étudier des secteurs sous couvert forestier (Fig. 2). Des études complémentaires (climatique, comportement des randonneurs) ont apporté des informations sur la dimension spatio-temporelle des processus.

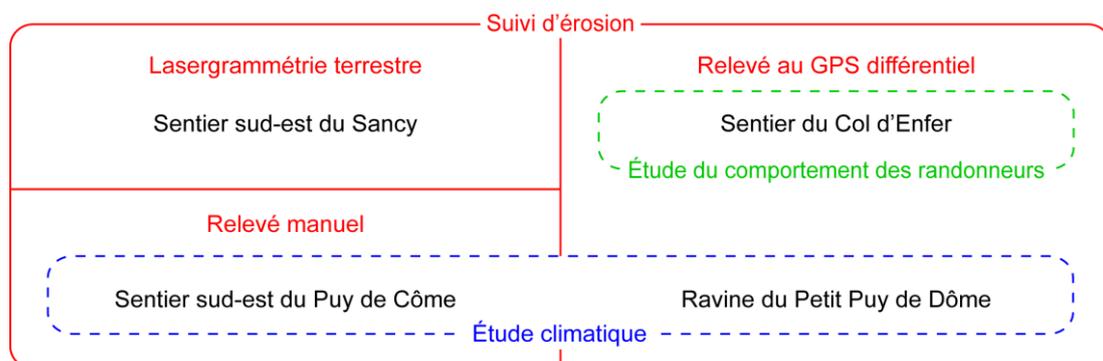


Fig. 2. Synthèse méthodologique.

## **Plan de la thèse**

La première partie proposera un état de l'art sur les formes d'érosion et les dispositifs permettant de lutter ou de limiter l'érosion des sentiers et ravines de moyenne montagne (chapitre 1), et sur les méthodes de suivi d'érosion des sentiers et ravines (chapitre 2).

La deuxième partie sera consacrée à la présentation des secteurs étudiés (chapitre 3) et à la présentation de la méthodologie utilisée (chapitre 4).

La troisième partie exposera les résultats des études menées au cours de cette thèse. Le chapitre 5, consacré au Massif du Sancy, présentera les suivis topographiques du sentier sud-est du Sancy et du Col d'Enfer et les résultats d'une étude effectuée sur le comportement des randonneurs. Les résultats des suivis topographiques et climatologiques des secteurs de la Chaîne des Puys (ravine du Petit Puy de Dôme et sentier sud-est du Puy de Côme) seront présentés dans le chapitre 6.

Enfin, la quatrième et dernière partie sera consacrée à l'interprétation et à la discussion des résultats. Le chapitre 7 permettra de réaliser un bilan méthodologique, où seront discutés les apports et les limites des méthodes utilisées au cours de ce travail. Dans le chapitre 8, l'analyse des résultats obtenus par secteur permettra d'envisager le devenir de chacun de nos sites d'étude. Des tendances plus générales découlant de ces analyses sectorielles seront présentées dans le chapitre 9 et déboucheront sur des propositions de gestion.

# Partie 1 : ÉTAT DE L'ART



# Introduction

L'intérêt des chercheurs pour l'érosion des sentiers n'est pas un fait nouveau, les premiers articles ayant été publiés dès les années 70 (Helgath, 1975 ; Leonard et Whitney, 1977 ; Rinehart *et al.*, 1978). Les analyses de terrain sont principalement axées sur les observations qualitatives, accompagnées parfois de quelques relevés de base à caractère ponctuel (ex. mesures au décimètre). Certaines études sont réalisées en deux dimensions sous la forme de relevés topographiques au niveau de coupes transversales ou dans le cadre d'études diachroniques conduites à partir de photographies. Depuis le milieu des années 90, cette thématique de l'érosion des sentiers a connu un grand développement, l'équipement permettant un suivi d'érosion plus perfectionné. Les relevés topographiques deviennent alors de plus en plus précis et ont une résolution de plus en plus fine. Cet engouement pour les nouvelles technologies permet aux chercheurs d'obtenir rapidement des données en trois dimensions. À la charnière des années 1990 et 2000, l'avancée technologique se fait à une telle vitesse qu'un grand nombre d'études porte plus sur la mise au point de méthodes de suivi d'érosion que sur le suivi en lui-même. Depuis quelques années, certaines méthodes moins sophistiquées sont cependant revenues sur le devant de la scène. Bien que très performants, les appareils de haute technologie ont en effet montré leurs limites. Ils ne sont pas adaptables à tous les milieux et présentent parfois des contraintes d'utilisation disproportionnées par rapport à ce qu'ils peuvent apporter de plus à l'étude. Enfin, les outils de haute technologie ont un coût (à l'achat et en maintenance) parfois très élevé qui n'entre pas toujours dans le budget des gestionnaires. Le choix de la méthode utilisée pour effectuer un suivi d'érosion sur les sentiers se fera donc en fonction de la problématique, du terrain, et des gestionnaires.

Un état de l'art sur la caractérisation et la classification des sentiers et des ravines associées par les chercheurs, qu'elles soient morphologiques (formes) ou dynamiques (processus), sera suivi par la présentation des méthodes d'étude utilisées par les auteurs antérieurs.



# **Chapitre 1 : Sentiers et ravines en moyenne montagne : formes d'érosion et dispositifs anti-érosifs**

Dans la littérature, la thématique de l'érosion des sentiers est souvent abordée à travers l'utilisation de méthodes qualitatives, telles que la méthode de classement des sentiers et la méthode de recensement de l'érosion, pour décrire et classer les sentiers à un instant donné. Ces méthodes qualitatives sont souvent utilisées par les gestionnaires pour déterminer les secteurs nécessitant une intervention.

Dans un premier temps, nous présenterons une description des sentiers en fonction de leur état de dégradation au travers des méthodes qualitatives utilisées par les chercheurs pour déterminer l'érosion des sentiers. Dans un second temps, nous aborderons les formes d'érosion qui affectent les sentiers et ravines. Puis nous terminerons par un recensement des dispositifs permettant de lutter contre l'érosion.

## **1.1. Descriptions et classements des sentiers : les méthodes qualitatives**

### **1.1.1. Méthodes de classement des sentiers**

La méthode de classement des sentiers est une méthode experte d'évaluation rapide, résultant d'une série de descriptions des conditions des sentiers, déterminées par les objectifs de gestion. Les sentiers sont subdivisés en segments qui sont classés en différentes catégories en fonction d'un certain nombre de critères différents suivant les auteurs. Les critères principaux sont souvent la largeur du sentier, la profondeur de l'incision, le nombre de sentes présentes, la présence de fines, l'absence de sol organique, l'exposition des racines, les traces de véhicule, les traces de ruissellement concentré, le ravinement... Le nombre de classes varie également selon les auteurs : généralement, les sentiers sont répartis en 4 ou 5 classes (Tableau 1). Marion *et al.* (2006) n'utilisent que 4 classes, mais elles correspondent plus ou moins aux 4 dernières classes de Bratton *et al.* (1979). Selon certains auteurs, cette

méthode est appliquée à partir de critères essentiellement visuels (Frissell, 1978), tandis que d'autres ont listé un certain nombre de paramètres demandant des mesures plus précises pour que le sentier entre dans une ou l'autre des classes prédéfinie.

En effet, Frissell (1978) effectue son classement à partir de l'observation de l'état de la végétation et de l'exposition du sol. Il propose 5 classes allant d'une végétation aplatie mais réellement abîmée à un ravinement évident et des arbres morts. Cole (1989) discute cette méthode notamment parce qu'il n'est pas rare qu'un sentier n'entre pas dans l'une ou l'autre des classes. Par exemple, un sentier peut parfaitement avoir un système racinaire dénudé, ce qui tendrait à le mettre dans la classe 4, mais il peut en même temps conserver la litière et l'humus du sol, ce dernier argument ne le ferait pas sortir de la classe 3 (Tableau 1). Pour pallier à ce genre de problème, certains chercheurs (Marion, 1984), introduisent des classes ou valeurs intermédiaires. Dans notre exemple, le sentier serait classé 3,5. Mais dans ce cas précis, il serait difficile de savoir si le sentier est de classe 3,5 parce qu'il possède des racines dénudées et un sol avec humus et litière, ou s'il est dépourvu de sol organique mais que le système racinaire n'est pas à nu. Une autre possibilité pour éviter ce problème serait de mieux définir les classes avec des mesures plus précises qu'une simple évaluation visuelle, ce qu'ont fait Bratton *et al.* (1979) et Marion *et al.* (2006) (Tableau 1). Outre ce problème de sentier pouvant appartenir à deux classes, le classement de Frissell (1978) présente un autre inconvénient. Certes, dans une forêt sur sol bien développé il semble très efficace, mais il devient caduc dans beaucoup d'autres environnements comme les milieux arides ou les prairies. Il faudrait donc développer un classement pour chaque type de milieu (Cole, 1989).

Cette catégorisation est facile à mettre en place et peu coûteuse en logistique. Les résultats obtenus par cette méthode sont tout à fait corrects pour une utilisation par des gestionnaires, à condition que les différentes classes soient renseignées par des paramètres mesurables de façon précise pour limiter les biais induits par la subjectivité. Plus il y a de classes et plus la sensibilité est forte, mais cela peut induire une baisse de la précision puisque la probabilité de différences d'avis sur la classe correspondant à un secteur donné augmente (Cole, 1989).

Classes	Descriptions		
	(Frissell, 1978)	(Bratton <i>et al.</i> , 1979)	(Marion <i>et al.</i> , 2006)
1	Végétation basse aplatie mais non blessée de manière permanente.	<b>Très peu.</b> Largeur $\leq 1.2$ m ; profondeur $\geq 5$ cm ; érosion dû à l'eau, ornières de boue, impacts de cheval, traces de véhicule $\leq 5$ % ; racines exposées ; érosion de berges $\leq 10$ % ; surface zones de boue érodées $\leq 10$ %	/
2	Végétation basse abîmée autour du centre d'activité.	<b>Peu.</b> Secteurs boueux, racines apparentes ou action de l'eau évidente. Largeur $\leq 2$ m ; profondeur $\geq 15$ cm ; érosion dû à l'eau, ornière de boue, impacts de cheval, traces de véhicule $\leq 15$ % ; racines exposées, érosions de berge $\leq 25$ % ; surface zones boueuse $\leq 30$ %	<b>Légerement endommagé.</b> Présence d'un ou plusieurs paramètres caractéristiques : largeur $< 1,5$ m ; nombre de sentes apparentes $\leq 3$ ; potentiel d'expansion bas à modéré ; présence possible de boue ; incision $< 15$ cm ; sol nu localement. En général les sentiers de cette catégorie n'exigent pas de maintenance.
3	Végétation basse disparue sur la plupart du site, mais l'humus et la litière restent présents globalement sauf sur quelques surfaces.	<b>Modéré.</b> Trous boueux, racines et roches exposées mais faible évidence d'élargissement. Largeur $\leq 2$ m ; profondeur $\geq 30$ cm ; érosion dû à l'eau, ornières de boue, impacts de cheval, impacts de pied, ou traces de véhicule $\leq 30$ % ; racines exposées ou érosions de berge $\leq 50$ % , surface des zones de boue érodées $\leq 100$ %	<b>Modérément endommagé.</b> Présence d'un facteur significatif ou d'une combinaison de facteurs : largeur $> 1.5$ m ; incision entre 15 et 30 cm (45 cm en absence d'autres facteurs) ; plus de 3 sentes ; présence de boue et trace de ruissellement concentré ; sentier déplacé ; sol non-consolidé. Le degré et l'ampleur des dégâts sont assez significatifs pour prescrire des actions de gestion.
4	Sol minéral à nu flagrant. Racines d'arbre exposées sur la surface.	<b>Important.</b> Présence de socle rocheux, de racines endommagées ; largeur $\leq 2$ m ; profondeur $\geq 50$ cm ; érosion dû à l'eau, ornières de boue $> 20$ cm de profondeur, impacts de cheval, ou traces de véhicule $\leq 50$ % ; racines exposées ou érosions de berge $\leq 70$ % ; surface des zones de boue érodées $\leq 300$ %	<b>Fortement endommagé.</b> « Hotspot » potentiel montrant un ou une combinaison de critères, l'ampleur et l'étendue des dégâts sont significatifs : largeur, sentes multiples et incision (critères souvent combinés : sentier en tresse excessivement large, largeur moindre mais plusieurs sentes incisées $> 45$ cm) Socle rocheux et racines apparentes. Un sentier localement affecté par des glissements de terrain ou des mouvements de masse est aussi dans cette catégorie.
5	Ravinement évident. Arbres fortement réduits et morts.	<b>Très important.</b> Sentier à socle rocheux ou autre substrat, racines d'arbres gravement endommagées, ou quelques ornières $> 50$ cm de profondeur, ou trous boueux si vastes que le sentier est dépassé la largeur entretenue. Les mesures de largeur, profondeur et pourcentages divers d'érosion sont supérieures aux valeurs maximales de la classe 4.	<b>Sévèrement endommagé, « hotspot ».</b> Combinaison de critères affectant significativement le sentier : largeur excessive ( $> 3$ m), sentes multiples ( $> 5$ ), incision ( $> 45$ cm) ; signes de glissement de pente ; sol non-consolidé ; aucune couche organique ; lit rocheux affleurant ; exposition excessive des racines ; pente extérieur du sentier $> 10$ % . Un tel sentier exige une intervention urgente.

Tableau 1. Comparaison des méthodes de classement des sentiers de Frissell (1978), Bratton *et al.* (1979) et Marion *et al.* (2006).

### **1.1.2. Méthodes de recensement de l'érosion**

Les méthodes de recensement de l'érosion sont des méthodes d'évaluation rapide et subjective exigeant une bonne connaissance de la conception et de la construction des sentiers ainsi qu'une expertise du terrain (Leung *et al.*, 1997 ; Jewel et Hammitt, 2000). Il existe plusieurs méthodes de recensement comme celle du recensement de l'érosion active (Leung *et al.*, 1997 ; Farrell et Marion, 2001) ou encore la méthode du recensement d'évènement érosif (Leung *et al.*, 1997), cette dernière étant souvent considérée comme une sous-catégorie de la méthode de recensement de l'érosion active (Jewel et Hammitt, 2000). Les segments de sentier soumis à l'érosion active sont affectés par une perte de sol importante en l'espace de quelques mois à quelques années.

Une évaluation du sentier est faite en parcourant celui-ci et en comptant le nombre de segments d'érosion active, ou d'évènement érosifs, ainsi que la longueur de ces segments. Donc le recensement consiste à dire qu'il n'y a que deux conditions possibles, soit le segment fait partie de la catégorie « segment touché par le paramètre étudié », soit il n'en fait pas partie. Cependant, certains auteurs (Marion et Leung, 2001) utilisent une variante de cette méthode de recensement qui consiste toujours à effectuer un recensement en fonction d'un paramètre en particulier, mais une sorte de classement se fait en fonction de l'importance de l'impact du paramètre en question sur le segment de sentier. Marion et Leung (2001), par exemple, font une sorte de classement pour un paramètre donné tel que le recensement de l'érosion du sol, ou plutôt l'incision du sol estimée par rapport à la surface originelle du sentier. Ainsi il y a trois classes avec différentes profondeurs : de 30 à 59 cm, de 60 à 89 cm et de 90 à 119 cm. En revanche, chaque paramètre est traité indépendamment des autres, et on retrouve, pour chacun, le nombre d'occurrence et la longueur totale de sentier touché ; il n'est pas question d'un réel classement de segments de sentier tel que décrit précédemment.

Pour résumer, contrairement à la méthode précédente (Partie 1.1.1.), il n'est pas question ici d'une véritable catégorisation. L'évaluation des sentiers se fait en se focalisant sur un paramètre en particulier, tel que les secteurs touchés par une érosion active ou par un évènement érosif. Tout comme les méthodes de classement des sentiers, on peut considérer que ces méthodes donnent des résultats en deux dimensions tout en restant des méthodes qualitatives et non quantitatives.

## 1.2. Formes d'érosion des sentiers et ravines

### 1.2.1. Multiplication de sentiers

La fréquentation répétée d'un sentier par les randonneurs va entraîner la détérioration de la végétation jusqu'à mise à nu du sol. Le piétinement répété va ainsi avoir tendance à engendrer la multiplication des sentes (Veyret *et al.*, 1990). L'apparition de nouvelles sentes parallèles au sentier d'origine est en quelque sorte une réponse des randonneurs à l'inconfort du sentier (Hammitt et Cole, 1998). En revanche, quand de nouvelles sentes apparaissent, qui recoupent le sentier (Fig. 3), ce n'est pas l'état du sentier qui est en cause mais le comportement des randonneurs. Cette pratique de hors-sentier engendre des dégradations immédiates (Thénoz, 1981). Ces sentes rectilignes et parallèles à la pente vont servir de lit au ruissellement lors des fontes nivales ou des orages d'été (Veyret *et al.*, 1990). Le ravinement, engendré par ce ruissellement concentré, encourage l'abandon de ces sentes par les randonneurs et donc favorise le tracé de nouveaux sentiers (Thénoz, 1981 ; Veyret *et al.*, 1990). Cela entraîne un cycle de création-érosion-abandon des sentes, susceptible de se répéter indéfiniment dans le temps si des politiques de gestion/aménagement ne sont pas mises en place.

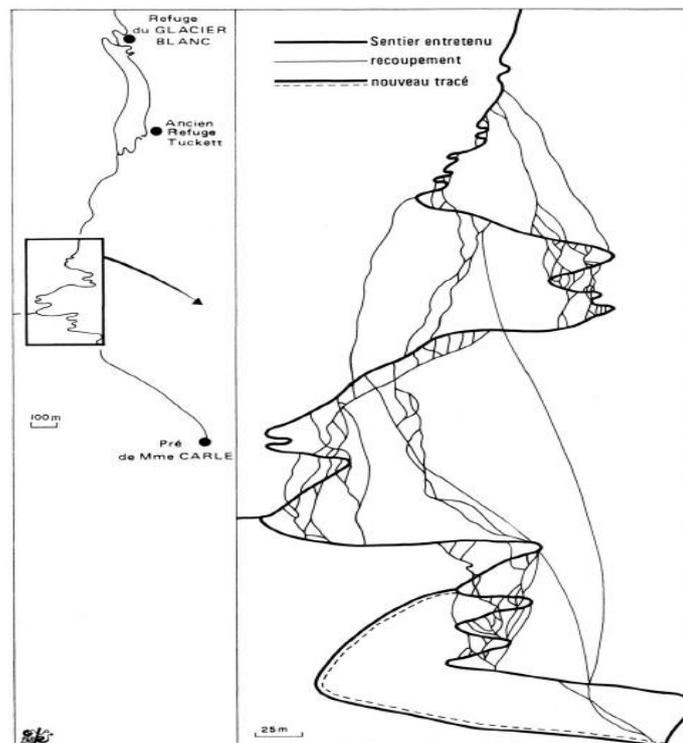


Fig. 3. Exemple de recoupement de sentier sur le Glacier Blanc dans le Parc National des Ecrins (Thénoz, 1981).

### 1.2.2. Le ravinement

Dans son ouvrage « l'Homme et l'érosion », Neboit (1991) définit la ravine comme étant « une incision durable, qui comporte un fond assimilable à un talweg, le long duquel l'écoulement exerce un creusement linéaire périodique, et des flancs qui font moins figure de berges que de versants en réduction, soumis à leur propre dynamique. La ravine est une forme bien délimitée, dont le profil longitudinal diffère de celui du plancher alluvial ou du versant dans lequel elle s'inscrit, soumise à une morphogénèse spécifique déjà complexe ». D'après Neboit (1991), ce qui définit le mieux une ravine, même de faible section, par rapport à la rigole qui peut être large et profonde, c'est un degré supérieur de permanence et d'autonomie par rapport au profil du versant.

Puech *et al.* (2009) proposent une typologie des formes et modelés d'incision en fonction de leur échelle (Tableau 2). Ils font une distinction entre les griffures et les rigoles qui sont des entailles temporaires et peu profondes sur les versants, entre les ravines élémentaires, les ravines qui sont plus profondes et surtout permanentes.

Type d'objets linéaires	Largeur <i>in situ</i>	Taille maximale du pixel MNT	Type de MNT pour une détection possible
Vallée	1 km à qq km	100 à 200 m	MNT génériques
Ravin – Vallon –	100m à qq hm	10 à 20 m	SPOT 20 m
Ravine	10 m à qq dam	1 à 2 m	Photo aérienne, LiDAR aéroporté
Ravine élémentaire	1 m à qq m	10 à 20 cm	Photo drone, ULM, LiDAR terrestre
Rigole	10 cm à qq dm	1 à 10 cm	Photo drone, ULM, LiDAR terrestre
Griffures	< 10 cm	1 à 2 cm	LiDAR terrestre

Tableau 2. Typologie des formes et des modelés d'incision selon leur taille et MNT permettant de les appréhender (Puech *et al.*, 2009).

Il existe plusieurs morphologies de ravines (Neboit, 1991 ; Radoane *et al.*, 1995), qui se répartissent en deux grandes catégories : les ravines en U, à fond plat et parois très raides à subverticales et les ravines en V. Ces dernières tiennent leur forme de l'action du ruissellement concentré. La morphologie des profils en U ou en V des ravines dépendrait des catégories de substrat dans lesquels elles se sont implantées. Ainsi les ravines en U seraient plutôt installées dans des formations superficielles à texture limoneuse quand les ravines en V s'établiraient dans des argiles, marnes, schistes ou arène granitique (Neboit, 1991).

Outre la morphologie transversale des ravines, la morphologie des têtes de ravine varie. Ootwoud wijdenes *et al.* (1999) regroupe les différentes formes de tête de ravine observées dans la Sierra de Gata, en Espagne, en quatre catégories (Fig. 4). La première forme, le type graduel, démarre par une rigole qui s'approfondit et s'élargit progressivement. Le type transitionnel, comme son nom l'indique, fait transition entre le premier et le troisième type, une pente plus forte se formant au niveau de la tête de ravine. Le troisième type possède une tête de ravine bien développée avec une paroi verticale et une petite dépression en aval de cette dernière. Le dernier type est une ravine qui démarre directement avec une tête de ravine sans rigole associée.

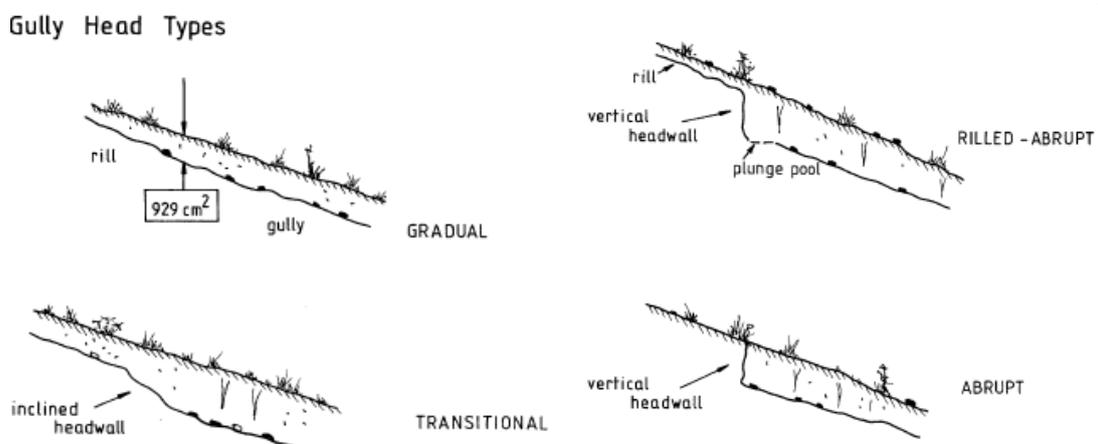


Fig. 4. Profil longitudinal des types de tête de ravine (Oostwoud Wijdenes *et al.*, 1999).

### **1.3. Dispositifs anti-érosifs**

Il existe de nombreux dispositifs anti-érosifs allant de l'aménagement léger et quasiment invisible (canalisation de randonneur à l'aide de fils guide) à l'aménagement lourd (escalier). Ces dispositifs doivent être choisis en fonction de l'état de dégradation des sentiers bien sûr, mais aussi en fonction des facteurs lithologiques, climatiques et du type d'utilisation des secteurs (taux et type de fréquentation, usages agropastoraux). De plus, il est préférable d'agir en amont d'une dégradation trop importante des sentiers et ainsi de privilégier les aménagements préventifs plutôt que curatifs.

#### **1.3.1. Les aménagements sur le sentier**

##### *– L'aire de marche*

Afin de ne pas inciter le randonneur à sortir du sentier pour marcher, l'aire de marche doit être confortable à la randonnée. Certains obstacles, perçus comme un risque, pourraient pousser le randonneur à sortir du sentier, comme par exemple des pierres instables, des racines, des flaques de boue, des surfaces glissantes (Fédération Québécoise de la Marche, 2004).

En plus d'être bien dégagée, la surface du sentier doit être suffisamment large pour permettre aux randonneurs de circuler facilement. Selon un rapport de la fédération québécoise de la marche (2004), la largeur idéale d'un sentier serait comprise entre 0,5 et 1 m. Un sentier trop petit induit un risque de multiplication des sentes.

Afin de ne pas avoir de problème de flaques d'eau stagnante après un épisode pluvieux et pour favoriser l'écoulement de l'eau en dehors du sentier, celui-ci doit avoir une inclinaison latérale. Cependant, cette inclinaison ne doit pas dépasser 4 % pour que le sentier ne soit pas rendu inconfortable à la marche (Fédération Québécoise de la Marche, 2004).

Il semble important de prendre en compte ces paramètres lors de la création de nouveaux sentiers, ou dans le cadre l'entretien de sentiers existants.

– *La canalisation des randonneurs*

Une des principales causes de dégradation des sentiers est le comportement inapproprié du randonneur. Il est important d'empêcher les randonneurs de pratiquer le hors-sentier. Pour ce faire, deux types d'action complémentaires sont possibles : la canalisation des randonneurs par la mise en place d'aménagements, et la sensibilisation par la signalisation et l'information.

Une bonne signalisation est une signalisation visible, pertinente, claire et concise, qui ne soit pas utilisée de façon excessive au risque de ne plus interpeller les randonneurs (Fédération Québécoise de la Marche, 2004). Cette signalisation peut se faire au travers de panneaux disposés à des endroits stratégiques (départ ou convergence de sentiers par exemple), et expliquant les bons comportements à adopter pour randonner dans le respect de l'environnement (Pop *et al.*, 2009a), ou par le biais de panneaux d'interdiction d'accès à des zones sensibles.

La canalisation des randonneurs pour éviter leur divagation en dehors du sentier peut se faire par la mise en place de fils guide, de murets en pierre ou de barrières tressées en bois (Fig. 5). Plus que pour canaliser les randonneurs, ces dernières sont surtout mises en place pour mettre en défens certains secteurs.



Fig. 5. Exemple d'aménagements visant à canaliser les randonneurs.

La photo de gauche présente à la fois un fils guide et une barrière en bois tressé sur un sentier du versant nord du Puy de Dôme (PNR des Volcans d'Auvergne, 2013). La photo de droite présente un muret en pierre empêchant l'accès à une sente secondaire dans le Val de Courre (PNR des Volcans d'Auvergne, 2013).

## – Le drainage

L'accumulation d'eau et le ruissellement concentré au sein d'un sentier sont les phénomènes provoquant des dégâts très importants. Il est important que le sentier soit bien drainé pour empêcher l'action de l'eau. Plusieurs outils existent pour drainer un sentier. Les chenaux d'évacuation d'eau, aussi appelés cassis, barre d'eau ou renvoi d'eau, installé à intervalle régulier, contrecarrent le pouvoir érosif du ruissellement concentré. Ces aménagements peuvent être en pierre ou en bois, ou encore creusés à même le sol avec la formation d'un merlon à l'aval (Fig. 6).

Lorsque l'écoulement de ces chenaux d'évacuation ne peut pas se faire dans la pente à côté du sentier, un fossé de captage peut être mis en place parallèlement au sentier ou un puits perdu. Le puits perdu est un trou rempli de matériaux grossiers (pouzzolane par exemple) permettant la captation des eaux provenant des chenaux d'écoulement du sentier (fiche technique : Annexe 1).

Cependant, pour qu'ils soient efficaces, il faut que ces aménagements soient régulièrement entretenus, car une fois comblés ils ne sont plus efficaces.



Fig. 6. Photo d'un chenal d'évacuation creusé à même le substrat sur le versant nord du Puy de Dôme (PNR des Volcans d'Auvergne, 2013).

– *La pente du sentier*

Quand cela est possible, il est préférable de dessiner le sentier de sorte qu'il présente des lacets dont les secteurs rectilignes auront une faible pente. Il faut cependant prévoir des aménagements visant à canaliser les randonneurs qui sont trop souvent tentés de recouper les lacets.

Lorsque la pente est trop forte et ne peut être modifiée par le tracé du sentier, il est toujours possible de mettre en place des marches d'escalier ponctuelles, taillées dans le substrat (Fig. 7).



Fig. 7. Exemple d'emmarchement dans le Massif du Sancy (PNR des Volcans d'Auvergne, 2013).

### **1.3.2. Les aménagements de lutte contre le ravinement**

– *La stabilisation des sols bordiers*

Les géotextiles sont souvent utilisés en génie civil et génie biologique pour lutter contre l'érosion des sols dont ils permettent la stabilisation. Il existe plusieurs types de géotextiles (Bayfield et Aitken, 1992 ; Lambert, 2000), qui possèdent

plusieurs fonctions intéressantes dans la lutte contre l'érosion. En effet, Lambert (2000) explique les fonctions de filtration, drainage et anti-érosion des géotextiles.

L'utilisation de géotextiles lors d'opération de lutte contre l'érosion est souvent accompagnée d'un objectif de re-végétalisation. Lors des travaux réalisés dans le massif du Sancy et la Chaîne des Puys, des géotextiles de type toile de coco ou toile de jute ont souvent été utilisés pour favoriser la stabilisation du sol et donc la reprise de la végétation (PNR des Volcans d'Auvergne, 2008 ; 2009).

La végétalisation est une action prenant une part importante dans la lutte contre l'érosion et la stabilisation des abords des sentiers. La végétation limite l'ablation du substrat et favorise la sédimentation (Rey *et al.*, 2004). Dans son rôle anti-ablation des sols, la végétation permet la réduction de l'énergie du ruissellement notamment en augmentant l'infiltration de l'eau (Cerdà, 1998). L'augmentation de l'infiltration a également pour effet la réduction de l'énergie de transport de l'écoulement ce qui favorise le dépôt de sédiments (Lee *et al.*, 1998). De plus, grâce à son système racinaire, la végétation permet d'améliorer la cohésion des sols et donc leur maintien (Rey *et al.*, 2004). Outre le rôle de la végétation dans le maintien et la fixation des sols, elle joue également un rôle dans la sédimentation. La végétation est susceptible de piéger des sédiments fins (Beuselinck *et al.*, 2000), ainsi que des sédiments parfois plus grossiers, notamment à l'amont d'obstacles végétaux (Meyer *et al.*, 1995).

#### – *Les aménagements de rétention de sédiments*

Afin de retenir les sédiments au fond des ravines, les gestionnaires utilisent souvent des aménagements de type muret en pierre ou fascine en bois (Fig. 8).

Rey (2005) et Lavandier *et al.* (2010) montrent l'importance des fascines en bois, combinées à une végétalisation en amont, dans la stabilisation des ravines marneuses du bassin versant de Draix. Ils développent même un modèle (le modèle simulfascine) afin d'estimer le nombre optimal d'ouvrages par ravine en fonction des paramètres de celle-ci et des coûts d'aménagement (Lavandier *et al.*, 2010).



Fig. 8. Murets en pierre (ravine latérale du sentier sud-est du Sancy) et fascine en bois (au pied de la ravine du Petit Puy de Dôme dans la Chaîne des Puys) (PNR des Volcans d'Auvergne, 2013).

### 1.3.3. Les aménagements lourds

Lorsque le sentier est trop fortement endommagé, il est parfois nécessaire d'envisager des solutions drastiques. Des méthodes de réhabilitation telles que l'installation d'escalier sont alors possibles. En moyenne montagne auvergnate, il en existe plusieurs : l'escalier en bois reliant l'arrivée du téléphérique au sommet du Sancy (Massif du Sancy), l'escalier en bois sur le versant est du Puy de Pariou (Chaîne des Puys), ou encore l'escalier du Puy Mary (Cantal).

Bien que très efficaces, ces aménagement de type escalier ont plusieurs inconvénients. D'une part, la conception de ces structures est très coûteuse. D'autre part, elles ne sont pas forcément très appréciées des randonneurs car peu esthétiques. À l'heure où le loisir de plein air est grandissant, avec une envie pressante de « retour à la nature », les touristes perçoivent souvent ces espaces comme étant trop artificialisés, et les qualifient « d'autoroutes à touriste ». De plus, Pop *et al.* (2009a) constatent que ce type d'aménagement ne règle pas toujours le problème de ravinement latéral et n'endigue pas en totalité la divagation des touristes. Dans le cas de l'escalier en bois du Sancy, les marches sont irrégulièrement positionnées, le rendant inconfortable pour les utilisateurs (Pop *et al.*, 2009a).

## **Conclusion**

Bien que la littérature n'abonde pas sur la typologie des sentiers, les méthodes qualitatives sur l'érosion des sentiers nous permettent d'avoir indirectement une bonne description des sentiers et de leurs différents stades d'érosion. Au-delà de l'impraticabilité par les randonneurs de certains sentiers trop érodés, l'érosion entraîne une déstabilisation des versants et un transit accéléré des matériaux vers l'aval. Afin de lutter contre cette érosion, les gestionnaires ont à leur disposition de nombreux outils anti-érosifs. Cependant, avant d'aménager en vue de réhabiliter un sentier, une étude quantitative plus poussée est nécessaire. En effet, l'estimation des volumes mobilisés ainsi que l'étude des rythmes d'érosion (vitesse, temporalité) permettent de définir plus précisément les facteurs d'érosion et les localisations les plus sensibles à celle-ci, le but étant de permettre aux gestionnaires de déterminer le type d'aménagements le plus adapté à mettre en place ainsi que la localisation la plus efficace.

## **Chapitre 2 : Les différentes méthodes de quantification de l'érosion des sentiers ou ravines**

La littérature scientifique traitant du suivi d'érosion, que ce soit à propos des sentiers ou des ravines, aborde un grand nombre de méthodes applicables à différents types de terrain. Les premières études de suivi d'érosion sur les sentiers ont été réalisées dans les années 1960-1970 à partir de méthodes expertes. Ces méthodes très subjectives consistaient essentiellement à décrire plus ou moins précisément l'état du sentier (Frissell, 1978 ; Bratton *et al.*, 1979). Dans le même temps, se sont développées des méthodes plus quantitatives de suivi d'érosion. Ces relevés étaient soit effectués de façon ponctuelle, en une dimension, soit en deux dimensions au travers d'une étude en plan, de relevés de coupes transversales ou longitudinales (Fish *et al.*, 1981 ; Cole, 1983). Avec la forte évolution de la technologie des années 1990-2010, les méthodes de suivi d'érosion se sont peu à peu développées autour d'outils technologiques de plus en plus perfectionnés. Ces appareils produisent des données très précises, à haute résolution et de plus en plus tournées vers la 3D (Marion *et al.*, 2006 ; Marzolff et Poesen, 2009 ; Perroy *et al.*, 2010). Après l'essor de toutes ces techniques de pointe, les études faites à partir de méthodes plus classiques n'ont pas été oubliées pour autant, certains terrains n'étant pas des plus favorables à la mise en œuvre de méthodes lourdement appareillées. Après l'étude de ces différentes méthodes au travers de la littérature, nous verrons que chacune à ses spécificités, ses avantages, ses inconvénients et ses types de terrain préférentiels.

### **2.1. Les méthodes de relevé à une dimension**

#### **2.1.1. Méthodes de la mesure d'incision maximum**

La méthode de mesure de l'incision maximale est une méthode experte. Elle consiste à relever des mesures d'incision le long d'un sentier, en fonction d'un plan d'échantillonnage prédéfini (Jewel et Hammitt, 2000). Au niveau du transect le long duquel une mesure est effectuée, seul le point où l'incision est la plus importante est

relevée. Il y a plusieurs façons de relever cette incision maximale (Marion et Leung, 2001). La mesure d'incision maximale peut s'effectuer soit entre le sol et la surface originelle du sentier avant toute forme d'érosion (Fig. 9, MIP). La mesure d'incision maximale peut aussi être relevée entre le fond du sentier, au point le plus profond, et la surface actuellement utilisée du sentier, soit le dernier stade dans l'érosion du sentier (Fig. 9, MIC). L'incision se mesure perpendiculairement à la surface de référence choisie. Marion et Leung (2001) renouvellent cette mesure tous les 2,5 m le long du sentier.

Cette méthode comporte seulement une mesure par secteur échantillonné. Les données obtenues ne sont donc pas représentatives de l'ensemble du sentier, que ce soit en coupe transversale ou en plan. Elle donne tout de même une idée de l'incision maximale du sentier en coupe longitudinale à condition que l'espacement entre les relevés ne soit pas trop important. Cette méthode de relevé ne se fait donc ni en trois dimensions, ni en deux dimensions ; c'est une méthode de relevé ponctuel, en une seule dimension. La méthode de mesure de l'incision maximum permet d'évaluer rapidement la perte de sol par rapport à la surface initiale ou actuelle du sentier ; cette méthode n'est donc pas ou peu adaptée au suivi d'érosion.

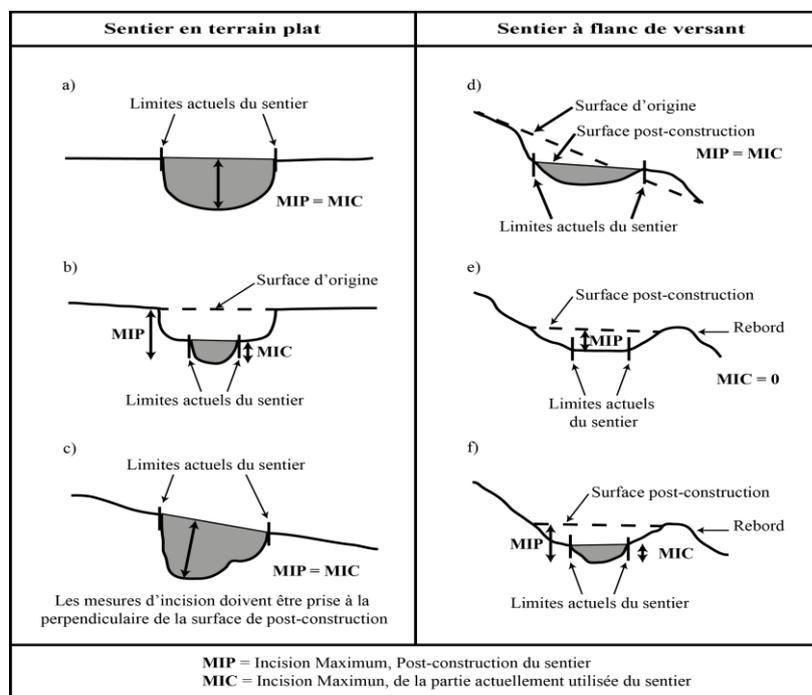
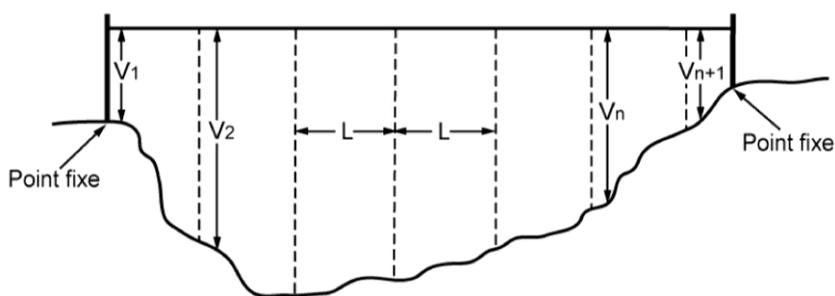


Fig. 9. Schéma illustrant la mesure d'incision maximale en fonction des sentiers en terrain plat ou à flanc de versant et en fonction du type de méthode (MIP ou MIC) (Farrell et Marion, 2001).

## 2.2. Les méthodes de relevé à deux dimensions

### 2.2.1. Méthode des transects

La méthode des transect est une méthode beaucoup moins subjective que les précédentes. Cette méthode consiste à faire un relevé topographique au niveau de chaque transect, ces derniers étant disposés selon un plan d'échantillonnage prédéfini. Une fois que le nombre et l'emplacement des transects est déterminé, une corde fixée de part et d'autre du sentier est tendue parallèlement à la surface pré-érosion du sentier. La corde ainsi tendue matérialise la surface de référence à partir de laquelle l'érosion sera par la suite mesurée. Cette corde peut être attachée à hauteur fixe sur des arbres de part et d'autre du sentier (Helgath, 1975), ou bien sur des piquets préalablement implantés suffisamment loin des bords du sentier en prévision de l'érosion à venir (Leonard et Whitney, 1977 ; Cole, 1983 ; Tinsley et Fish, 1985). Des mesures verticales entre le fond du sentier et cette corde sont ensuite relevées pour obtenir la profondeur du sentier à partir de la surface de référence (Fig. 10). Les mesures de profondeur s'effectuent à l'aide d'une perche ou d'un fil à plomb gradué afin de pouvoir faire des relevés perpendiculairement à la surface de référence, soit à intervalles fixes (Helgath, 1975 ; Leonard et Whitney, 1977 ; Cole, 1983 ; 1991) soit au niveau des changements micro-topographiques observés (Marion et Olive, 2006 ; Olive et Marion, 2009).



A : aire du transect

$$A = \frac{V_1 + 2V_2 + \dots + 2V_n + V_{n+1}}{2} \times L$$

$V_1 \rightarrow V_{n+1}$  : mesure verticale, profondeur du sentier, depuis le premier point fixe jusqu'à la dernière mesure verticale.

Fig. 10. Disposition d'un transect et formule calculant l'aire de la section, d'après Cole (1983).

Cette méthode des transects est largement utilisée pour effectuer un suivi d'érosion sur les sentiers. C'est une méthode facile à mettre en œuvre qui ne demande que peu de logistique. De plus, cette méthode est applicable sur tout type de terrain, un couvert forestier plus ou moins dense ne gênant en rien l'utilisation de cette méthode. Les résultats obtenus par cette méthode ont une précision centimétrique ou pluri-centimétrique et chaque relevé, effectué à différentes dates, est facilement comparable. La méthode des transects fournit donc de bons résultats en ce qui concerne l'étude de l'érosion des sentiers en deux dimensions pour un plan d'échantillonnage prédéfini.

### **2.2.2. Méthodes de la photo-interprétation**

Certains auteurs utilisent les photographies aériennes pour réaliser une étude préliminaire dans le but de repérer et comptabiliser les différentes ravines présentes sur un secteur avant d'effectuer une étude de terrain (Oostwoud Wijdenes *et al.*, 2000 ; Zucca *et al.*, 2006). Cependant, la photo-interprétation est une méthode à part entière qui permet, outre le recensement des ravines, d'effectuer une étude de l'évolution spatiale des sentiers ou ravines (Martinez-Casasnovas, 2003 ; Ghimire *et al.*, 2006 ; Ionita, 2006), d'observer l'évolution de l'activité des ravines (Parkner *et al.*, 2006 ; Gutiérrez *et al.*, 2009) ou encore de dresser une carte du ravinement (Martinez-Casasnovas, 2003). La photo-interprétation est une méthode d'autant plus intéressante qu'elle est applicable sur les photographies aériennes anciennes et permet donc une étude diachronique. Les premières campagnes de photographies aériennes conduites par l'IGN sur l'ensemble de la France datent des années 1946-1948 et ont été conduites tous les 5 à 10 ans suivant les secteurs. L'inconvénient majeur de cette méthode est que la qualité de l'étude dépend de la qualité de la photographie. Avec l'avancée technologique, les photos récentes ont une résolution de plus en plus fine ce qui permet de travailler avec une très bonne précision sur des objets de relativement petite taille.

Un bon exemple d'étude menée par photo-interprétation est celle publiée par Ionita en 2006. En effet, ce chercheur utilise cette méthode pour effectuer une étude de l'évolution spatiale de la tête de ravines entre les années 1960 et 1980, dans le but de compléter une étude de terrain effectuée entre 1980 et 2000. Il en va de même de Martinez-Casasnovas (2003), qui utilise également la photo-interprétation pour

calculer le taux de retrait de la tête des ravines ; mais cette méthode ne permet pas de mesurer l'incision, ce qui conduit Martinez-Casasnovas à coupler la photo-interprétation avec la photogrammétrie. Parkner *et al.* (2006) utilisent les photographies aériennes pour interpréter l'activité des ravines grâce à l'étude de la végétation. Les zones dépourvues de végétation sont considérées comme actives tandis que l'inactivité des ravines se traduit par la réduction de zones actives par la reconquête végétale sur les photographies aériennes séquentielles ; les ravines inertes sont quant à elles végétalisées sur les premières photos (1939) et le sont toujours sur les suivantes.

La méthode de photo-interprétation permet de réaliser des études spatiales en deux dimensions que ce soit pour calculer une évolution latérale ou pour faire de la cartographie. Cette méthode est applicable sur tous les terrains à condition que les objets étudiés soient suffisamment visibles sur les photos, qu'ils ne soient pas occultés par la végétation et que les photographies soient de bonne qualité pour identifier les limites des sentiers/ravines.

## **2.3. Les méthodes de relevé à trois dimensions**

### **2.3.1. Méthodes de mesure à l'aide d'un GPS ou d'une station totale**

Le GPS (*Global Positioning System*) et la station totale sont des outils de mesures topographiques. Qu'il s'agisse de GPS différentiels ou de GPS RTK, ces appareils recalculent les coordonnées réelles de chaque point relevé pour limiter les erreurs induites par les satellites. La station totale est également un outil de très grande précision mais qui transmet ses résultats sous forme de points positionnés les uns par rapport aux autres, qui ne sont pas intégrés à un référentiel terrestre.

L'utilisation d'outils tels que le GPS et la station totale sert souvent à produire des modèles numériques de terrain (MNT) (Wu et Cheng, 2005 ; Cheng *et al.*, 2006 ; Cheng *et al.*, 2007 ; Hu *et al.*, 2007 ; Wu *et al.*, 2008). Cependant, ces outils peuvent aussi servir à faire de la cartographie. Marion *et al.* (2006) utilise un GPS pour faire la cartographie des sentiers informels. Après comparaison avec une cartographie du même secteur par photo-interprétation, Marion *et al.* (2006) concluent que le GPS

fournit de meilleurs résultats, la photo-interprétation ayant tendance à sous-estimer les distances, notamment les longueurs de sentiers informels. D'autres auteurs utilisent un GPS pour relever le contour des ravines et suivre l'évolution des bordures de ravines (Wu et Cheng, 2005 ; Hu *et al.*, 2007 ; Wu *et al.*, 2008 ; Perroy *et al.*, 2010) ; il est ainsi possible de calculer des taux de recul de tête des ravines et des taux d'élargissement de ravines.

L'utilisation d'un GPS n'est pas adaptée aux secteurs sous couvert végétal puisque la connexion aux satellites devient partiel voire absente. L'utilisation d'une station totale est également déconseillée sous couvert végétal pour des raisons de visibilité réduite à moyenne distance. En revanche, sur terrain découvert, Marion *et al.* (2006) montrent que la méthode est plus précise et engendre moins d'erreurs que la photo-interprétation.

Très souvent, le GPS ou la station totale sont également utilisés en complément ou couplés à d'autres méthodes notamment pour le géoréférencement de photographies (aériennes ou prises au sol) dans l'optique d'effectuer de la photogrammétrie (Raclot *et al.*, 2005 ; Giménez *et al.*, 2009), ou encore pour le référencement de nuages de points obtenus par lasergrammétrie (Castillo *et al.*, 2012 ; Rengers et Tucker, 2015), permettant ainsi une comparaison entre différents relevés du même secteur.

### **2.3.2. Méthodes de photogrammétrie**

La photogrammétrie a été définie par Whitmore (1952) comme « la science ou l'art d'obtenir des mesures fiables au travers de la photographie ». Les méthodes de photogrammétrie produisent des données en trois dimensions à partir de photographies aériennes ou prises au sol. Il existe plusieurs méthodes, parmi lesquelles la stéréophotogrammétrie (ou photogrammétrie stéréoscopique) et la photogrammétrie multi-image. Ces deux méthodes peuvent être appliquées à différentes échelles : à l'échelle du paysage avec les photographies aériennes prises à différentes altitudes (Fig. 11), à l'échelle de l'objet géomorphologique avec les photographies prises au sol ou des photographies aériennes de basse altitude, prises avec un drone par exemple. Pour éviter toute confusion, il faut rappeler que le traitement de photographies par le biais des méthodes photogrammétriques permet

surtout de restituer un modèle numérique de surface (MNS) (Raclot *et al.*, 2005) ; la génération d'un MNT hors végétation requérant une étape de post-traitement du nuage de points.

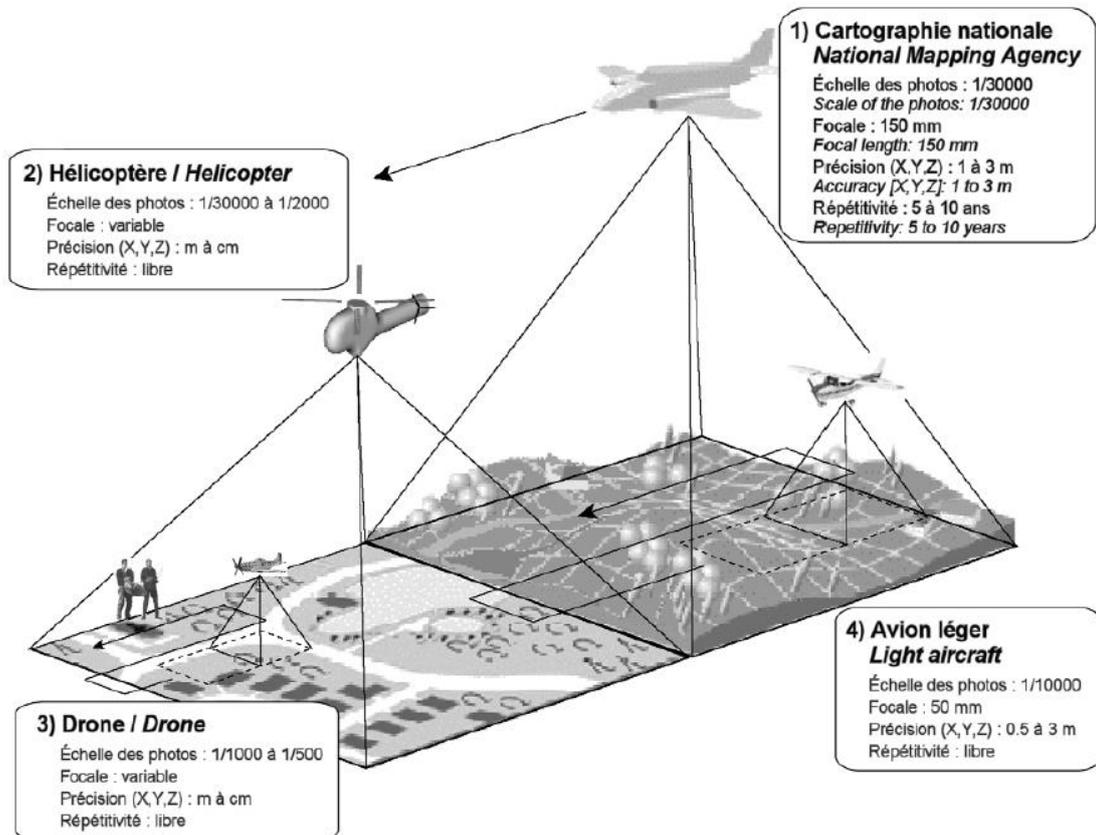


Fig. 11. Différents mode d'acquisition des photographies aériennes et précision attendue des MNT obtenus (Henry *et al.*, 2002).

### 2.3.2.1. Méthodes de photogrammétrie stéréoscopique

La photogrammétrie stéréoscopique (ou stéréophotogrammétrie) utilise la faculté de l'homme à percevoir le relief à partir de deux images planes, prises de deux points de vue différents, d'un même objet. Pour que la topographie d'une zone objet soit correctement restituée, il faut un recouvrement de 60 % entre les deux photos. De plus, les paramètres de distance entre la prise de vue et l'objet ainsi que les angles de prises de vue doivent être réfléchis en amont pour être optimisés.

– *La stéréophotogrammétrie terrestre*

Rinehart *et al.* (1978) utilisent une version améliorée de la méthode de stéréophotogrammétrie terrestre développée par Walker (1968). Leur méthode consiste à prendre des photographies, toujours avec le même appareil photo et la même distance entre l'objectif et le transect pour une échelle cohérente sur toutes les photos. Une cible de dimension fixe est positionnée sur le site étudié au moment de la prise des photographies pour fournir l'échelle. L'appareil photo est stabilisé, toujours au même niveau et à la verticale pour limiter les effets de distorsion de la caméra. Si les photos sont étudiées manuellement, il faut être très rigoureux, alors que si un traceur automatique est utilisé, le photographe aura plus de marge de manœuvre quand à la position de l'appareil photo. Certains paramètres de positionnement de l'appareil photo peuvent être modifiés pour correspondre au terrain : par exemple, si le terrain est trop abrupt pour être photographié avec l'appareil photo vertical, l'appareil photo peut être incliné en direction du haut ou du bas, mais le même point et le même angle doivent être utilisés pendant les années suivantes pour que la comparaison des données du transect soit possible. Le but de cette étude et surtout de l'utilisation d'une telle méthode est de reproduire un transect qui, contrairement à la méthode des transects décrite plus haut (partie 2.2.1.), permettrait d'obtenir des données sur l'ensemble du transect et non seulement à intervalles réguliers. Rinehart *et al.* (1978) souligne que la méthode des transects peut engendrer des biais lors de la comparaison de plusieurs relevés du même transect car les données ne sont pas forcément relevées exactement au même endroit. Or avec cette méthode de stéréophotogrammétrie sur un transect, puisque la totalité des points du transect a été relevée, la comparaison d'une année à l'autre du même transect n'engendre plus ce type d'erreur.

A l'époque de cette étude, Rinehart *et al.* (1978) appliquaient une nouvelle technologie à l'analyse topographique de transects. Ils ne faisaient pas réellement de la 3D même si leur méthode était plus perfectionnée que la simple méthode des transects. Avec l'évolution des appareils photos et des logiciels de traitement stéréoscopique, il est maintenant possible de faire une véritable étude en trois dimensions d'un secteur avec des prises de vue au sol.

– La stéréophotogrammétrie aérienne

La stéréophotogrammétrie aérienne peut se faire à différentes échelles (Fig. 11), le principe restant le même. Jacomes *et al.* (2008) expliquent les grandes étapes de la photogrammétrie stéréoscopique : (1) acquisition d'un couple stéréoscopique ; (2) orientation interne des images, c'est-à-dire estimation de la focale, de l'échelle, du centre de prise de vue sur l'image et réduction des effets de distorsion de la lentille ; (3) orientation externe, soit le positionnement exact des points de prise de vue de chaque image par définition de 6 paramètres de position (3 coordonnées et 3 angles) ; (4) appariement général du couple stéréo des photos par corrélation locale des points homologues. Outre les paramètres d'altitude et de vitesse de vol, une attention particulière est portée au rapport entre la distance séparant les deux positions de l'appareil photo lors des prises de vue ( $B$ ) et l'altitude de prise de vue ( $h$ ) (Fig. 12). En général, pour obtenir un bon couple stéréoscopique, le rapport  $B/h$  doit être proche de 1 mais dans les zones accidentées comme les ravines, un rapport  $B/h$  égal à 1 restituerait une topographie incomplète. Dans leur étude, Jacome *et al.* (2008) utilisent un rapport  $B/h$  plus petit, de l'ordre de 0,2 à 0,3 ; ils estiment que c'est un bon compromis entre les paramètres d'altitude, de focale et de recouvrement entre clichés.

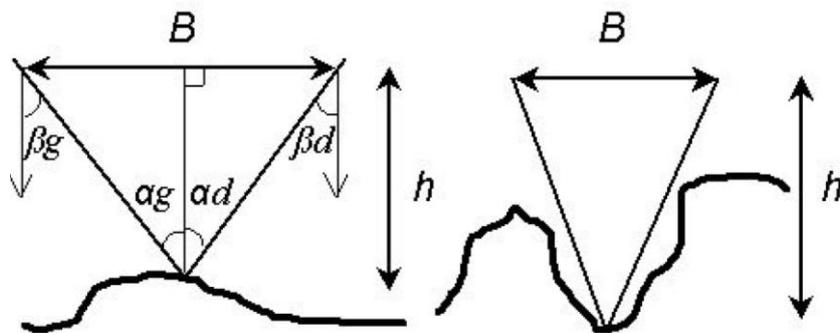


Fig. 12. Rapport  $B/h$  en fonction du terrain (Jacome *et al.*, 2008).

Plusieurs auteurs ont travaillé à l'élaboration ou à l'amélioration d'une méthode de stéréophotogrammétrie par drone dans les mêmes conditions de relief (Henry *et al.*, 2002 ; Raclot *et al.*, 2005 ; Jacome *et al.*, 2008 ; Puech *et al.*, 2009). Les MNS obtenus par stéréophotogrammétrie avec des photos prises par drone sont plus précis (quelques centimètres à décimètres) que ceux réalisés avec des photos

prises par avion (Fig. 11) qui ont une résolution spatiale (XY) de l'ordre du mètre et une précision métrique en altitude (Z) (Puech *et al.*, 2009). De plus l'acquisition de photos est plus simple avec des appareils plus légers comme un drone ou un ULM, et elle peut se faire avec un appareil photo grand public. En revanche, avec ce type d'appareil, les paramètres de prise de vue interne et externe sont parfois mal contraints, ce qui rend le paramétrage de la camera plus complexe (Raclot *et al.*, 2005). Les résultats obtenus par Jacome *et al.* (2008) sont très prometteurs. Avec une prise de vue à 150 m d'altitude, Jacome *et al.* (2008) réalisent des photos avec une résolution de 5 cm. Ils arrivent ainsi à produire un MNT sur les ravines du bassin versant de Draix avec une erreur moyenne de l'ordre de 10 cm, sachant que les crêtes sont plus précises que les fonds de ravines.

### **2.3.2.2. Méthodes de photogrammétrie multi-image**

La photogrammétrie multi-image est une méthode plus souple que la stéréophotogrammétrie. Alors que les paramètres d'échelle, d'axe et d'angle de prise de vue doivent être identiques au cours des relevés stéréophotogrammétriques, une certaine liberté de manœuvre est permise en photogrammétrie multi-image. Ceci permettra au chercheur de s'adapter plus facilement au terrain à étudier. Le protocole d'acquisition de données de la photogrammétrie multi-image est basé sur la masse de photos, la redondance des informations contenues dans cette multitude de photos permet d'obtenir des modèles fiables et précis (Pierrot Deseilligny et Clery, 2011).

#### *– La photogrammétrie multi-image terrestre*

L'acquisition du jeu de données peut se faire de plusieurs manières en fonction du terrain à étudier. Une des méthodes consiste à tourner autour de l'objet pour prendre le même point avec différents angle de vue (Fig. 13). Une autre méthode consiste à prendre des photos de façon linéaire en gardant le même angle de vue mais un avec un taux de recouvrement très fort (80 %) (Fig. 14). La méthode de reconstruction 3D la plus répandue est la méthode SFM (Structure From Motion) (Szeliski, 2010 ; Westoby *et al.*, 2012). Les coordonnées des images et la géométrie de la scène sont calculées simultanément grâce à l'identification automatique de caractéristiques similaires à plusieurs images (points homologues).

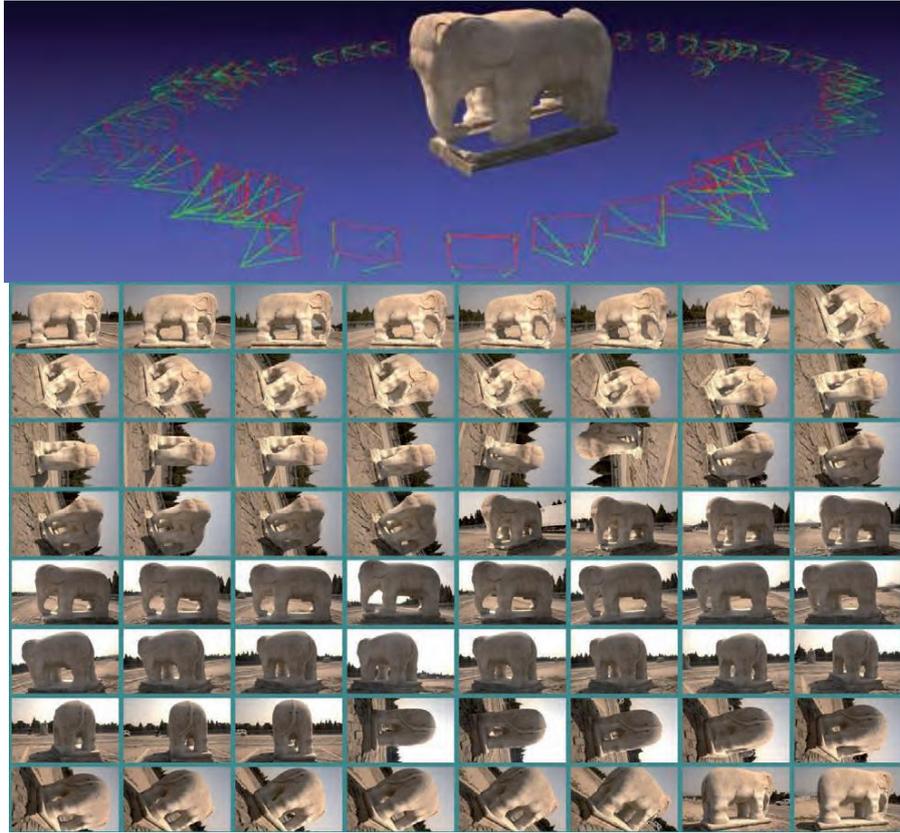


Fig. 13. Exemple d'acquisition de photo en tournant autour d'un objet (Pierrot Deseilligny et Clery, 2011).

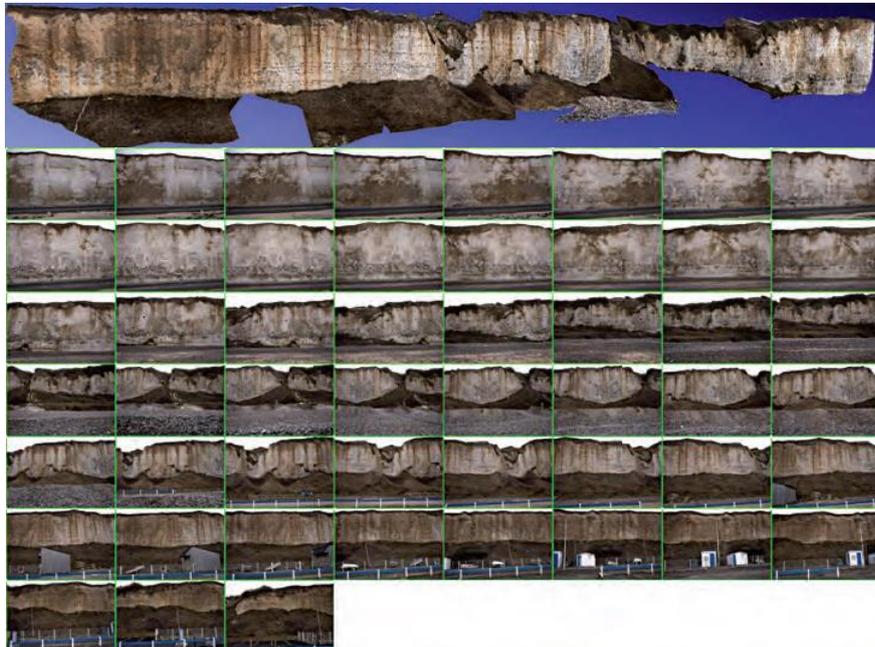


Fig. 14. Exemple d'acquisition linéaire de photos pour modéliser une falaise (Pierrot Deseilligny et Clery, 2011).

## – La photogrammétrie multi-image aérienne

Suivant la taille de l'objet à étudier et la qualité du résultat voulu, plusieurs possibilités s'offrent au chercheur pour acquérir des photos aériennes telles que l'utilisation de petits avions ou de drones (Hortobágyi *et al.*, 2015). Pour obtenir un MNT à haute résolution sur des ravines, Marzolff et Poesen (2009) utilisent des photographies prises depuis un dirigeable ou un cerf-volant suivant les conditions de vent (Fig. 15).

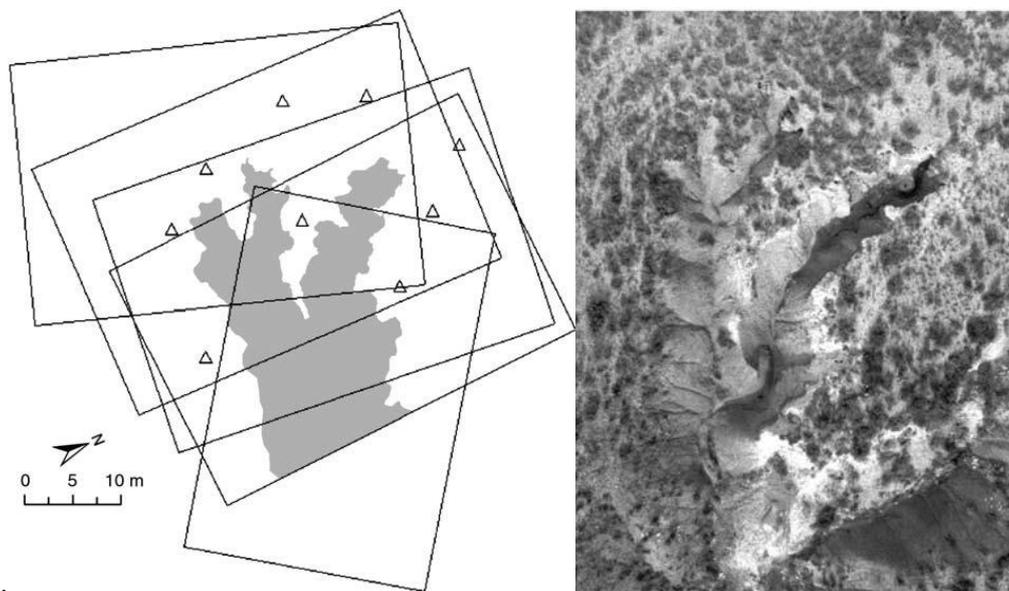


Fig. 15. Exemple de prises de photo pour une étude en photogrammétrie multi-image dans la province de Murcie au sud-est de l'Espagne (Marzolff et Poesen, 2009).  
Photo de la ravine étudiée à droite ; couverture photographique et distribution des points de contrôle à gauche.

La photogrammétrie multi-image est une méthode récente qui est encore peu utilisée sur les ravines et sentiers. Quelques études préliminaires donnent tout de même des résultats prometteurs (Giménez *et al.*, 2009 ; Marzolff et Poesen, 2009 ; Talibart, 2014).

### **2.3.3. Méthodes fondées sur la lasergrammétrie**

L'évolution technologique de ces dernières décennies a vu apparaître de nombreux outils de plus en plus perfectionnés tel que les LiDAR (Light Detection And Ranging). La prolifération croissante et la disponibilité des données ont permis

des études morphométriques mettant en évidence le potentiel de cette technologie pour quantifier et contrôler l'érosion de ravins ou ravines (Perroy *et al.*, 2010). Bien que la majorité des études fondées sur cette technologie de haute résolution soient associées aux systèmes fluviaux (Heritage et Hetherington, 2007 ; Milan *et al.*, 2007 ; Vianello *et al.*, 2009), les applications géomorphologiques s'élargissent et incluent désormais les mouvements de masse (Ruiz *et al.*, 2004 ; Alba *et al.*, 2005) l'érosion saisonnière des versants (Tarroli et Dalla Fontana, 2009) ou encore l'érosion côtière (Rosser *et al.*, 2005 ; Young et Ashford, 2006). Les ravines et sentiers sont encore peu étudiés avec des méthodes de lasergrammétrie, mais certains auteurs ont tenté de quantifier l'érosion de ravines avec ces méthodes (James *et al.*, 2007 ; Hancock *et al.*, 2008 ; Evans et Lindsay, 2010 ; Perroy *et al.*, 2010).

Perroy *et al.* (2010) comparent des évaluations du volume de ravines issues de données LiDAR aérien et terrestre avec des données relevées à la station totale, dans le but d'évaluer l'utilité des deux systèmes pour mesurer des volumes de ravines à l'échelle du paysage. Leur étude se fait en 3 étapes sur un secteur inférieur à 0,1 km<sup>2</sup> et pour chaque relevé LiDAR (terrestre et aérien) : (1) récolte des données LiDAR brutes puis traitement pour obtenir un MNT ; (2) comparaison du MNT obtenu avec les données de la station totale ; (3) modélisation d'une surface pré-érosion (sans ravines) et calcul du volume érodé. Les résultats de cette comparaison montrent une sous-estimation des volumes érodés pour les méthodes de lasergrammétrie, que ce soit au sol ou par voie aérienne. D'après ces auteurs, les erreurs proviennent majoritairement de la résolution trop faible des nuages de points ainsi que des zones dépourvues de points (zones d'ombre).

### **2.3.3.1. Méthode du LiDAR aéroporté**

Les données de lasergrammétrie aérienne utilisées dans l'étude de Perroy *et al.* (2010) ont été obtenues avec un appareil combinant un LiDAR à longueur d'onde hyperspectral et un GPS avec centrale inertielle. Le relevé s'est fait en avion à une hauteur de 3000 m, et il en résulte un nuage de points avec un espacement régulier d'environ 1,5 m entre chaque point. Pour ce type d'étude, il est préférable d'effectuer le relevé à moindre altitude afin d'obtenir une densité de points plus importante. Après correction (exclusion des points faux trop haut, trop bas ou trop isolé) et post-traitement des données, Perroy *et al.* (2010) obtiennent un MNT à 1,5 m. Ce MNT

est comparé avec des données provenant d'une station totale au niveau de plusieurs transects. Les données du LiDAR aérien montrent une erreur moyenne de 5,2 m par rapport aux données de la station totale. Les auteurs estiment que la cause majeure de ces erreurs est la résolution du MNT par rapport à la taille et forme de la ravine. Effectivement, les parois latérales sont très pentues et les ravines ont un profil en V produisant des changements d'élévation rapides sur des distances courtes. À moins que le laser ne frappe directement l'axe des ravines, le MNT obtenu sous-estimera toujours la profondeur des ravines et donc le volume incisé (Perroy *et al.*, 2010).

Evans *et al.* (2010) utilisent des données de LiDAR aérien pour développer une méthode de détection automatique et d'extractions de cartes de ravines à partir de modèles numériques de terrain à haute résolution (2 m dans ce cas précis). La profondeur des ravines a été obtenue en interpolant entre les bords des ravines. Pour évaluer l'exactitude de la cartographie et de la profondeur des ravines, Evans *et al.* (2010) ont comparé leurs résultats avec des photographies aériennes et des données de terrain. Cette comparaison a montré que la cartographie en plan était très correcte puisque des ravines de largeur d'au minimum un pixel (2 m) sont bien représentées. En revanche l'interpolation de la profondeur des ravines produit des résultats moins fiables lorsque la largeur totale de la ravine est inférieure à 3-4 pixels (soit 6-8 m). Il est donc important d'avoir des données à très haute résolution pour extraire toutes les caractéristiques des ravines de petite échelle.

James *et al.* (2007) utilisent également la lasergrammétrie aérienne pour cartographier des ravines et extraire leurs caractéristiques morphologiques, mais en partie sous couvert forestier. Un traitement spécifique des données permet d'enlever tous les points relevés sur la canopée et donc faisant partie du MNS (Modèle Numérique de Surface) pour ne conserver que les points au sol appartenant au MNT. Ces chercheurs testent la capacité du traitement des données LiDAR à identifier les points de départ des ravines et divers chenaux ainsi qu'à extraire les informations morphologiques propres à chacun des objets étudiés. Afin de valider cette étude, des comparaisons sont effectuées avec des relevés obtenus par GPS différentiel sur le terrain. A l'échelle de l'ensemble du réseau de ravines étudié, les données LiDAR sont de très bonne qualité, la cartographie est très précise, notamment la détection de rigoles voire de petites ravines, excepté lorsqu'elles sont trop étroites. Les erreurs de cartographie augmentent lorsque les objets diminuent en largeur. En revanche, à

l'échelle d'une ravine, l'extraction de paramètres morphologiques n'a pas été très concluante, le problème étant le même que pour les études précédentes : la sous-estimation de la profondeur de la ravine. James *et al.* (2007) mettent également en évidence une surestimation de la largeur des ravines. La limite dans l'exactitude des données au niveau morphologique peut être due à une trop faible densité de points au sol, des zones d'ombre dans le fond des ravines et/ou le filtrage des discontinuités topographiques des données lors du post-traitement. Les auteurs expliquent qu'un autre facteur permet d'expliquer ces fausses estimations de la profondeur et de la largeur des ravines. Il s'agit de l'angle d'incidence avec lequel les données topographiques sont relevées (Fig. 16). En général, ce type de données est relevé avec un angle d'incidence faible (20 à 40°) mais étant donné que les parois des ravines peuvent atteindre 50 à 70°, il arrive fréquemment qu'une des parois masque le fond de la ravine et qu'aucun point ne puisse y être relevé (Fig. 16 : pas de point entre le 3 et 4). En raison d'une trop grande différence d'altitude entre deux points adjacents, certains points sont considérés comme faisant partie de la végétation et sont supprimés lors du post traitement (le point 5 de la figure 16 par exemple).

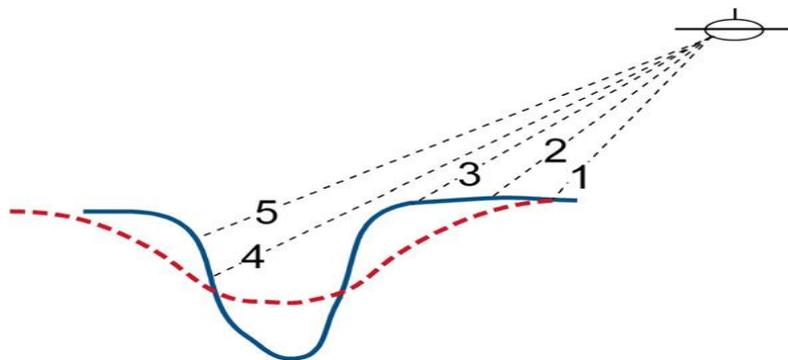


Fig. 16. Schéma présentant une possible explication concernant la profondeur sous-estimée et la largeur surestimée des ravines (James *et al.*, 2007).

Le trait plein bleu correspond à la topographie réelle de la ravine alors que le trait en pointillé rouge se réfère à la topographie extraite du MNT produit grâce aux données du LiDAR aérien.

Le LiDAR aéroporté est un outil très puissant qui permet de réaliser de nombreux calculs de volumes, entre autre, mais il n'est utilisable que là où la taille des objets à étudier sont suffisante par rapport à la résolution des relevés (Astrade *et al.*, 2011). De plus, l'exactitude des points du nuage d'un relevé LiDAR aérien est perturbée au niveau des secteurs à relief contrasté. C'est pourquoi, pour certains

auteurs, le LiDAR terrestre est une solution intéressante, autant en terme de variabilité de la résolution qu'en terme de précision (Heritage et Milan, 2009 ; Heritage *et al.*, 2009 ; Astrade *et al.*, 2011).

### 2.3.3.2. Méthode du LiDAR terrestre

Pour leur relevé au scanner laser terrestre, Perroy *et al.* (2010) collectent des données depuis 37 positions différentes. Les nuages de points résultant de ces 37 scans sont fusionnés grâce aux 20 réflecteurs et 9 points d'attache. Ces derniers sont mesurés très précisément sur le terrain avec un GPS différentiel. Il en résulte un TIN (*triangulated irregular network*) avec une grille de résolution régulière de 0,25 m et une erreur verticale maximale de 0,05 m. La comparaison de ce TIN avec des données provenant d'une station totale sur certains secteurs ou transects particuliers révèle des erreurs moyennes de l'ordre de 9,7 m<sup>2</sup>. Cette importante erreur provient de la géométrie de la ravine qui crée des zones d'ombre. Le scanner laser ne peut relever des points que sur les parties topographiquement visibles de la caméra du LiDAR ; or les pentes abruptes des parois et les fonds encombrés des ravines masquent partiellement la topographie réelle des ravines. D'où un MNT qui, après interpolation des données manquantes, restitue une topographie plus élevée que la réalité notamment au niveau du fond des ravines (Perroy *et al.*, 2010). Ces erreurs pourraient être évitées en faisant davantage de scans pour compléter les secteurs pauvres en points, mais cela prendrait également plus de temps. Dans l'idéal, il faudrait avoir un angle de vue qui limiterait les masques topographiques ce que la géométrie du terrain ne permet pas toujours.

Hancock *et al.* (2008) ont étudié la formation de rigoles et de petites ravines ainsi que leur évolution. Ils ont examiné la capacité d'un scanner laser terrestre à quantifier et à caractériser les rigoles en développement. Leurs résultats montrent que la morphologie globale du versant a été bien saisie et la morphologie d'ensemble des rigoles globalement capturée ; en revanche, les caractéristiques des rigoles n'ont pas été bien définies. Plus précisément, le modèle numérique de terrain créé à partir des données laser n'a pas enregistré les sommets des rives et les fonds des rigoles, il ressort donc une série de dépressions longitudinales mal définies. Leur analyse les amène à conclure que malgré une très grande précision des points, si la résolution n'est pas assez fine, seule la morphologie globale de la pente sera bien appréhendée.

## Conclusion

Il existe un grand nombre de méthodes de suivi d'érosion des sentiers, chacune ayant ses avantages et ses limites. Les méthodes qualitatives, bien que très intéressantes de par leur facilité d'exécution et leur intérêt pour évaluer rapidement l'état des sentiers (diagnostic de priorité d'intervention), ne répondent pas à nos objectifs de calcul de volumes d'érosion/dépôt et de vitesses d'érosion.

Les méthodes quantitatives (Tableau 3) sont très variées et permettent de réaliser des études plus ou moins complexes en fonction du nombre de dimensions prises en compte :

- Méthode à une dimension : mesure d'incision maximum
- Méthode à deux dimensions : transect, photo-interprétation
- Méthode à trois dimensions : mesure GPS et théodolite / station totale, photogrammétrie, lasergrammétrie

Elles ne répondent pas toujours aux mêmes conditions de réalisation et sont plus ou moins complexes à mettre en œuvre. En fonction de l'objectif visé et des conditions de terrain, certaines méthodes seront donc plus adaptées que d'autres. Le tableau 3 récapitule l'ensemble des méthodes quantitatives présentées précédemment, avec leurs avantages et leurs inconvénients.

Ainsi par exemple, la méthode de mesure d'incision maximale ne se prête pas à une étude diachronique, car, étant basée sur des relevés ponctuels, elle ne permet pas un réel suivi l'évolution du sentier. Des sentiers n'offrant pas une visibilité sur une longue distance en raison d'un couvert forestier important se verront appliquer une méthode de relevé manuel de type transect. Pour une étude plus exhaustive de la topographie, la lasergrammétrie terrestre peut fournir un nuage de points très dense d'une grande précision, mais certaines configurations de terrain très accidenté avec des zones de masques ne sont pas adaptées à cette méthode.

Méthodes	Description	▲ Avantages / ▼ Inconvénients	Références
<b>Mesures d'incision maximum</b>	Mesures d'incision ponctuelles selon un plan d'échantillonnage prédéfini en fonction des secteurs les plus érodés.	▼ Nécessite une expertise du terrain	(Jewel et Hammitt, 2000) (Marion <i>et al.</i> , 2006)
<b>Transects</b>	Couples de données horizontales et verticales relevés manuellement à partir d'une surface de référence, surface originelle post-construction du sentier ou surface actuelle, visible à partir des bords du sentier.	▲ Applicable sur tout type de terrain, y compris sous couvert forestier dense ▲ Méthode demandant peu de logistique ▼ Extrapolation inter- transects peu viable	(Helgath, 1975) (Leonard et Whitney, 1977) (Cole, 1983 ; 1989 ; 1991) (Jewel et Hammitt, 2000) (Olive et Marion, 2009)
<b>Photo-interprétation</b>	Étude spatialisée réalisée par photographie aérienne. Cartographie des ravines. Évolution de l'activité érosive.	▲ Possibilité d'étude diachronique à partir de photos aériennes anciennes ▼ La précision dépend de la qualité des photos	(Nachtergaele et Poesen, 1999) (Vandekerckhove <i>et al.</i> , 2003) (Ionita, 2006)
<b>GPS / Station totale</b>	Relevés topographiques point par point. De la façon de relever les points dépendra la résolution et la qualité du MNT résultant.	▲ Précision centimétrique au niveau du point relevé ▼ Pas adapté sous couvert forestier	(Marion <i>et al.</i> , 2006) (Perroy <i>et al.</i> , 2010) (Marion <i>et al.</i> , 2012)
<b>Stéréo photographie</b>	Utilisation d'un couple de photographies (aériennes ou terrestres) d'un même objet pris avec deux angles de vue différents pour obtenir une vision 3D.	▼ Contraintes importantes pour réaliser un couple stéréoscopique de bonne qualité (qualité des photos, taux de recouvrement, angle de vue...)	(Walker, 1968) (Rinehart <i>et al.</i> , 1978) (Nachtergaele et Poesen, 1999) (Jacome <i>et al.</i> , 2008)
<b>Photogrammétrie multi-image</b>	Utilisation de multiples photographies (aériennes ou terrestres) recouvrant un secteur pour en calculer la topographie	▲ Méthode légère à mettre en place (pour la photogrammétrie multi-image terrestre) ▼ La précision et la résolution dépendent de la qualité des photographies	(Marion <i>et al.</i> , 2006) (Marzolff <i>et al.</i> , 2011)
<b>LiDAR terrestre</b>	Le scanner laser longue portée piloté par ordinateur restitue la topographie sous forme d'un nuage de points non géoréférencé.	▲ Relevé rapide de nombreux points ▲ La résolution peut être extrêmement fine ▼ Nécessité de relevés depuis différentes positions pour limiter l'effet de masque ▼ Matériel lourd et coûteux	(Hancock <i>et al.</i> , 2008) (Puech <i>et al.</i> , 2009) (Perroy <i>et al.</i> , 2010) (Astrade <i>et al.</i> , 2011) (Dąbek <i>et al.</i> , 2013)
<b>LiDAR aéroporté</b>	Restitution de la topographie sous forme de nuages de points relevés selon une résolution et une précision fixe.	▲ Adapté aux sites d'études vastes ▼ Résolution trop faible pour des objets spatialement peu importants ▼ Surestimation du fond des ravines	(Evans et Lindsay, 2010) (Kincey et Challis, 2010) (Perroy <i>et al.</i> , 2010)

Tableau 3. Synthèse des différentes méthodes quantitatives de suivi d'érosion sur les ravines et les sentiers de randonnées.

# Partie 2 : Sites d'étude et méthodologie



# Introduction

La seconde partie de cette thèse présentera, dans un premier temps, les sites d'étude choisis pour réaliser un suivi d'érosion des sentiers en moyenne montagne auvergnate. Parmi les quatre secteurs sélectionnés, deux se situent sur le chemin des crêtes du Massif du Sancy : le sentier sud-est du Sancy et le sentier du Col d'Enfer. Les deux autres secteurs sont localisés dans la partie centrale de la Chaîne des Puys : la ravine du Petit Puy de Dôme et le sentier sud-est du Puy de Côme.

Dans un second temps, nous détaillerons les choix méthodologiques que nous avons faits pour répondre à nos objectifs. Ainsi l'étude topographique de nos secteurs d'étude nous permettront de réaliser des quantifications de volumes d'érosion et dépôts et de cartographier les secteurs les plus sensibles. Ces levés topographiques croisés avec des données météorologiques nous permettront d'identifier les processus érosifs estivaux et hivernaux et de déterminer les volumes impliqués. Outre la localisation des secteurs sensibles à l'érosion anthropique, une étude du comportement des randonneurs nous apportera des éléments de réponse quant à la réalisation d'un outil aidant les gestionnaires dans leur choix de dispositif anti-érosifs répondant à leur problématique.



## Chapitre 3 : Présentation des sites d'étude

La moyenne montagne auvergnate est composée, pour l'essentielle, de paysages dominés par des reliefs volcaniques, avec des édifices complexes et largement érodés de type stratovolcan tels que le Cantal, les Monts Dore et le Sancy, et des édifices monogéniques de plus petite taille telles que la Chaîne des Puys et le Velay (Nehlig *et al.*, 2003). Ces édifices, avec leurs styles éruptifs variés, ont produit des substrats de nature très hétérogène qui réagissent différemment à l'érosion, qu'elle soit naturelle et/ou anthropique. Mais la diversité des processus érosifs et des vitesses d'érosion ne dépend pas uniquement de la nature des terrains. Elle est également contrôlée par les niveaux d'agressivité climatique – qui diffèrent selon les saisons et selon les années – ainsi que par la fréquentation touristique, notamment estivale.

De nombreux sentiers de moyenne montagne en Auvergne mériteraient une étude approfondie. Nous avons sélectionné quatre secteurs d'étude en raison de leurs spécificités. Le sentier situé entre le Col de la Cabane et le sommet du Sancy et le sentier du Col d'Enfer font partie du Massif du Sancy, tandis que la ravine du Petit Puy de Dôme et le sentier sud-est du Puy de Côme se situent dans la partie centrale de la Chaîne des Puys (Fig. 17). Ces deux ensembles volcaniques appartiennent au Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne (PNRVA), créé en 1977. Bien que cette labellisation des volcans d'Auvergne ait contribué à l'augmentation de l'affluence touristique, elle s'accompagne également de la mise en œuvre de projets de conservation, d'étude et de développement des territoires concernés. Les terrains sélectionnés sont également situés sur des sites classés Natura 2000 et des Zones Naturelles d'Intérêt Écologique Faunistique et Floristique (ZNIEFF), cartographiés sur la figure 17. De plus, deux de nos secteurs d'étude s'inscrivent dans le site classé de la Chaîne des Puys et les deux autres dans la réserve nationale de Chastreix-Sancy (périmètre Annexe 2), créée le 13 juillet 2007.

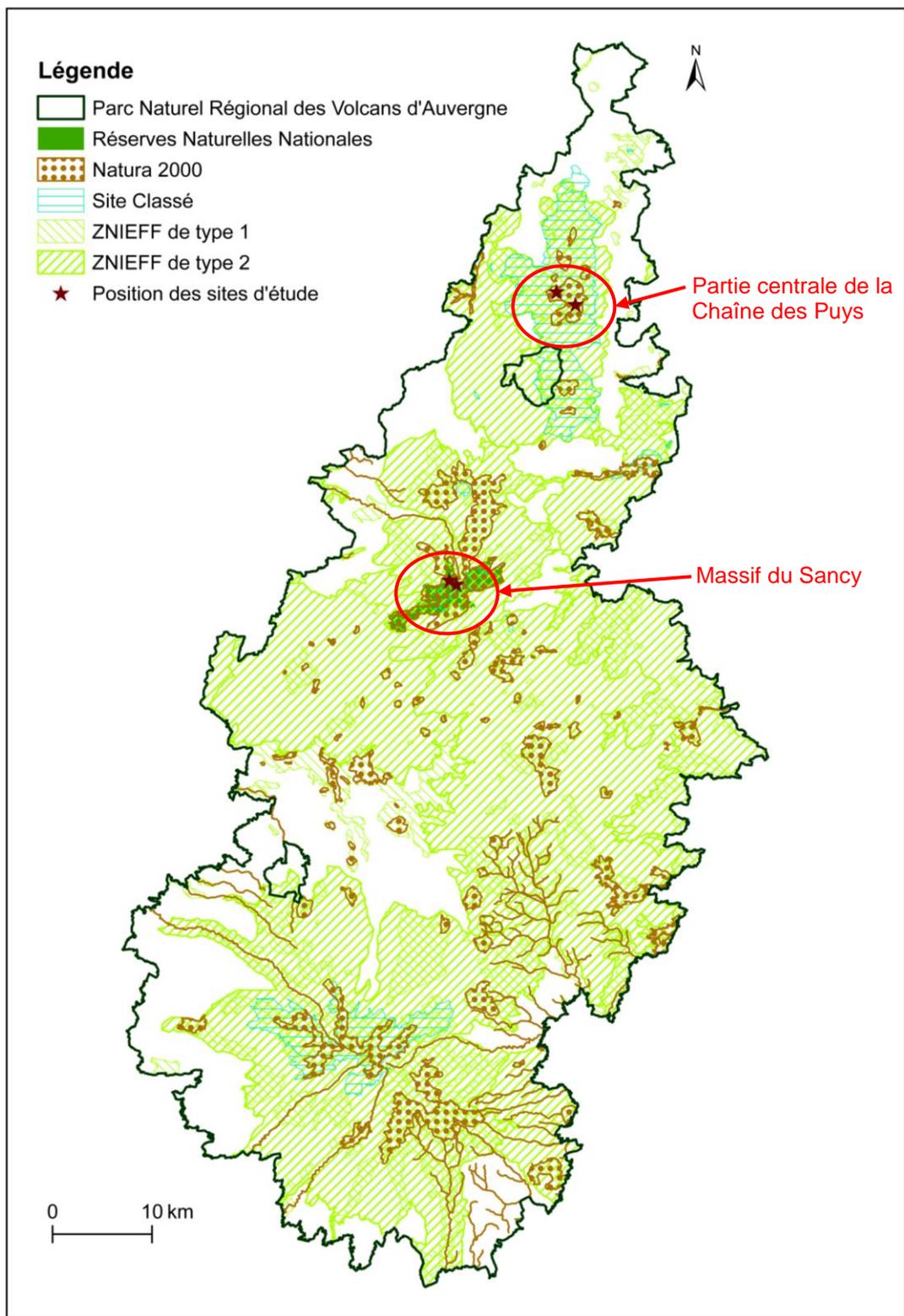


Fig. 17. Secteurs bénéficiant d'une protection, d'une gestion des paysages, ou d'un inventaire de la faune et de la flore au sein du PNRVA.

Les ZNIEFF de type 1 sont des secteurs de superficie en général limitée, définis par la présence d'espèces, d'association d'espèces ou de milieux rares, remarquables ou caractéristiques du patrimoine naturel national ou régional. Les ZNIEFF de type 2I sont de grands ensembles naturels riches et peu modifiés, offrant des potentialités biologiques importantes. Ces dernières peuvent inclure une ou plusieurs ZNIEFF de type 1 (d'après les définitions de la DREAL Auvergne).

## 3.1. Le Massif du Sancy

### 3.1.1. Contexte géologique et bioclimatique

#### 3.1.1.1. Un stratovolcan à topographie contrastée

Le Massif du Sancy fait partie d'un édifice composite de deux stratovolcans. Il s'est édifié entre 1 et 0,2 millions d'années sur le flanc sud des Monts Dore (Nehlig *et al.*, 2003), et se compose de roches très hétérogènes (Fig. 18) allant de formations massives comme des dômes, coulées de lave et dykes, jusqu'à des dépôts plus meubles tel que des coulées pyroclastiques ponceuses, nuées ardentes et dépôts d'avalanches de débris (Lavina, 1985 ; 1999 ; Nehlig *et al.*, 2003 ; Morel et Genevois-Gomendy, 2009).

Les deux secteurs étudiés dans ce massif se situent dans sa partie centrale, près du Puy de Sancy, point culminant du Massif Central (1885 m). Le sentier sud-est du Sancy part du Col de la Cabane pour atteindre le sommet du Sancy. On passe d'une alternance de téphras de type dépôts de nuées ardentes à blocs et cendres en contact avec des roches trachy-andésitiques altérées en bas du sentier à des trachy-andésites (sancyites) beaucoup plus massives vers le sommet. Le secteur du Col d'Enfer a pour substrat des dépôts de nuées ardentes trachy-andésitiques voire trachytiques (Morel et Genevois-Gomendy, 2009). La fraction fine cendreuse des dépôts de nuées ardentes fournissent des argiles, facteur d'instabilité.

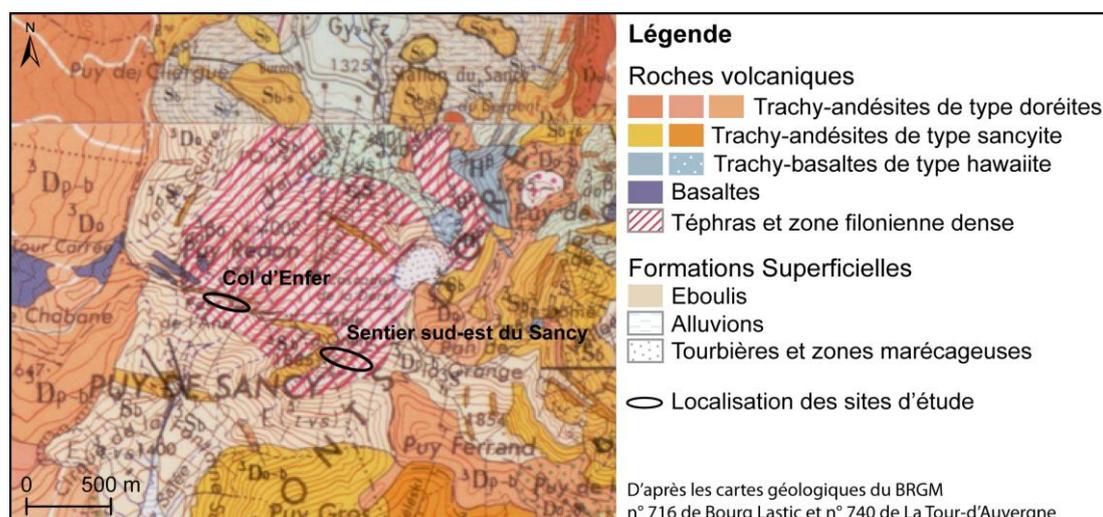


Fig. 18. Carte géologique de la partie centrale du Massif du Sancy.

L'édification du Massif du Sancy résulte donc d'une alternance de phases de construction et de destruction (Lavina, 1985 ; 1999). Ces épisodes volcaniques ont été pour partie contemporains des phases d'englacement quaternaire dont subsistent des témoins morphologiques et sédimentaires (Veyret, 1978 ; Valadas, 1984). Les processus morphodynamiques contemporains ont achevé de façonner le relief de ce massif (Krzemien et Sobiecki, 2004 ; Pop *et al.*, 2009b). Ce dernier présente un fort contraste topographique entre les fonds de vallée relativement plats et les pentes très fortes qui permettent d'accéder aux crêtes qui les entourent (Fig. 18). Les pentes du secteur du Col d'Enfer, situé sur un versant orienté sud-ouest, sont de l'ordre de 20° en moyenne et peuvent avoisiner 30° localement. Le sud-est du Sancy, exposé sud-est, possède de faibles pentes à la base du sentier mais lors de l'ascension vers le sommet la valeur de la pente augmente rapidement pour dépasser parfois les 30°.

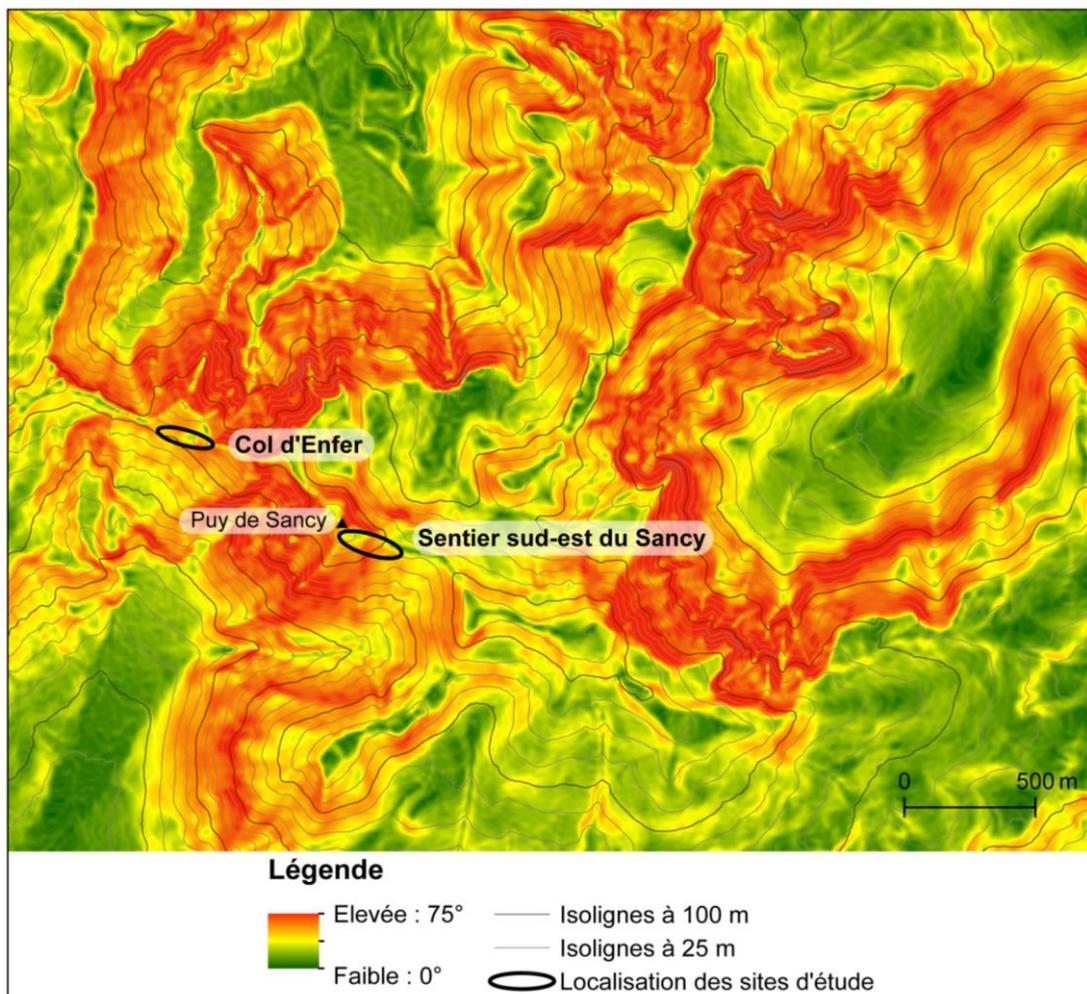


Fig. 19. Carte des pentes du Massif du Sancy, réalisée d'après le MNT à 10 m de 2010 fourni par le CRAIG (Centre Régional Auvergnat de l'Information Géographique).

### 3.1.1.2. Un climat montagnard à influence océanique

Avec son relief imposant, le Massif du Sancy constitue un des premiers obstacles depuis l'océan et forme une barrière orographique aux masses d'air engendrées par les dépressions atlantiques. Le climat y est de type montagnard à forte influence océanique, caractérisé par des précipitations abondantes, des températures relativement froides et un hiver long.

Les diagrammes ombrothermiques des stations Météo France du Mont Dore et de Super-Besse (Fig. 20) soulignent l'influence océanique du climat. Les précipitations présentent peu de variations dans leur répartition tout au long de l'année. Les moyennes annuelles sont de 149 mm pour le Mont Dore et de 176 mm pour Super-Besse. La station météo du Mont Dore affiche des valeurs plus faibles en raison de sa position géographique différente : étant plus éloignée des sommets, elle est moins soumise aux flux océaniques. Durant les mois d'été, les moins humides, les précipitations sont de type orageux. Les températures moyennes mensuelles masquent les fortes amplitudes thermiques diurnes estivales. Le nombre de jours de gel sur le Sancy s'élève en moyenne à 150 jours par an ; de plus, au-dessus de 1000 m d'altitude, il peut geler en toutes saisons (Belenguier et Birard, 2013).

Le régime d'enneigement du massif est dépendant des circulations atmosphériques. Au-dessus de 1000 m, les circulations perturbées provenant du nord-nord-ouest favorisent un apport en neige important tandis que les circulations sud et ouest ont tendance à provoquer un déneigement. En revanche, un même flux océanique aura pour conséquence un déneigement en dessous de 1300 m et une augmentation du couvert neigeux au-dessus de 1500 m (Serre, 1998 ; 2001). L'altitude joue également un rôle important dans l'épaisseur de la couverture neigeuse. De plus, un stock important de neige ralenti la fonte nivale. Il en résulte une couverture neigeuse importante et constante sur une longue période à haute altitude, et une couverture plus variable et souvent fugace à plus basse altitude (Serre, 1998 ; 2001).

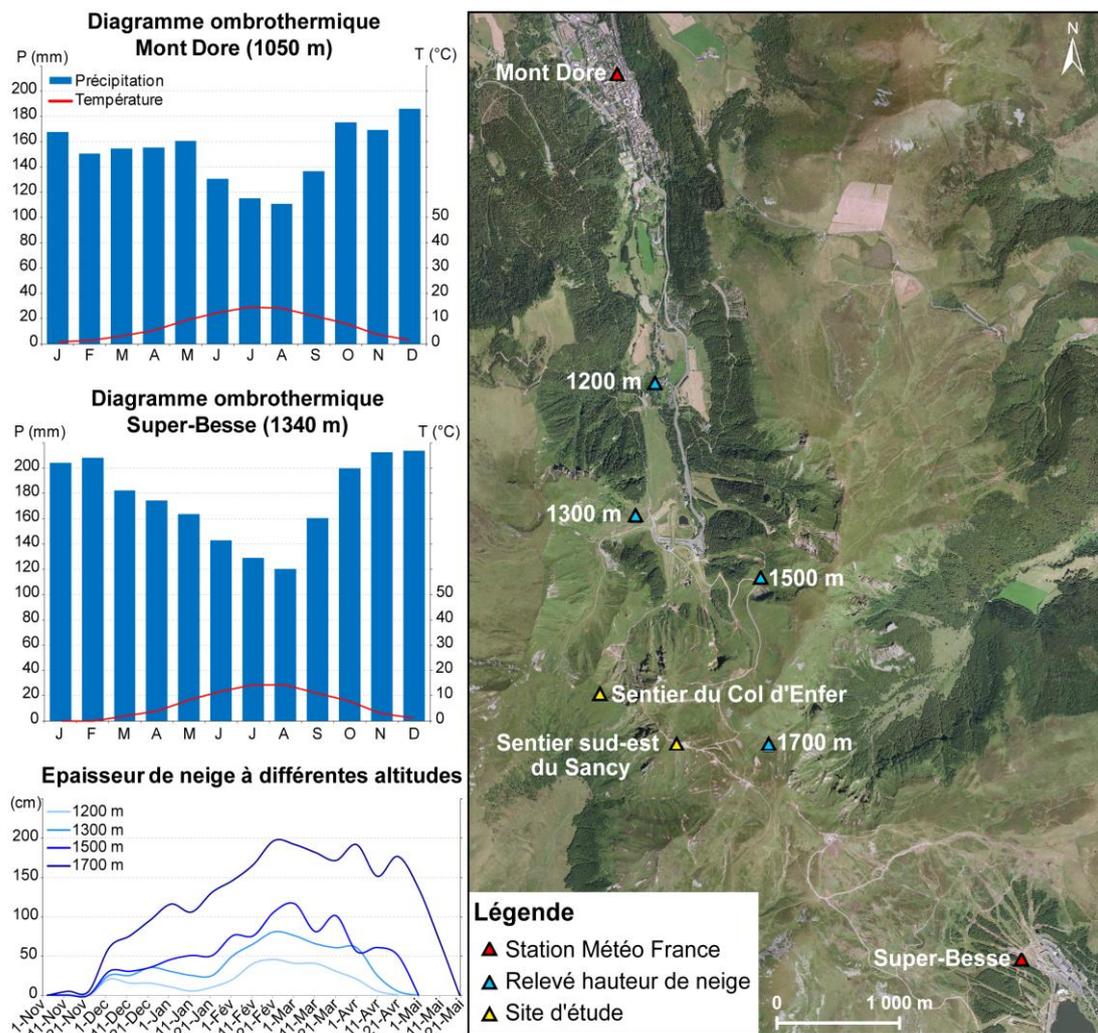


Fig. 20. Synthèse des données climatiques disponibles autour du Puy de Sancy.

Les diagrammes ombrothermiques ont été réalisés à partir de moyennes mensuelles sur la période 1983-2009. Le diagramme représentant l'épaisseur de neige est fondé sur les médianes décadaires sur la période 2004-2014 (données collectées et traitées par F. Serre).

Le climat plutôt froid (moyenne annuelle : 6 à 8 °C) et humide (cumul annuel : 1790 à 2110 mm), et la durée de l'enneigement (3 à 5 mois par an) conditionnent le développement de la végétation de ce massif.

### 3.1.1.3. Une végétation subalpine

Le massif du Sancy combine deux étages de végétation : l'étage montagnard de 800 et 1500 m d'altitude et l'étage subalpin au-dessus de 1500 m. En Auvergne, ce dernier est caractérisé par l'absence de forêt. Il intègre une grande diversité et qualité des milieux, et des habitats d'intérêt communautaire (39 % du site Natura 2000) ou

des habitats prioritaires (32 %), au titre de la directive « Habitats, faune et flore » (Natura 2000, 2010 ; Belenguier et Birard, 2013).

Les abords de nos secteurs d'étude sont colonisés par des landes et des pelouses (Fig. 21). Ces dernières sont de deux types : des formations herbeuses à *Nardus*, et des pelouses à *Festuca*. Les landes sont de types lande montagnarde à *Calluna* et *Genista* ou de type lande à *Empetrum* et *Vaccinium*. Cette végétation se développe sur des andosols dont l'horizon organo-minéral de surface, riche en matière organique, peut atteindre 50 cm d'épaisseur (Morel et Genevois-Gomendy, 2009). Ces sols andiques ont une densité très faible (inférieure à 0,9 g/cm<sup>3</sup>) engendrant une porosité importante (60 à 90 %) (Legrand *et al.*, 2007). La forte capacité de rétention de l'eau de ces sols leur procure une très faible portance. Ainsi, à l'état humide, ces sols présentent une tendance au fluage et sont très sensibles à l'orniérage (Legrand *et al.*, 2007 ; Morel et Genevois-Gomendy, 2009). Ces andosols sont également caractérisés par une faible cohésion à l'état sec ainsi qu'une grande aptitude à se rétracter irrévocablement en séchant (Nanzyo *et al.*, 1993 ; Bartoli *et al.*, 2007). Cette faible cohésion associée à un substrat riche en cendres rend ces types de sol très sensibles à la solifluxion, ainsi qu'à l'érosion éolienne lorsqu'ils affleurent.

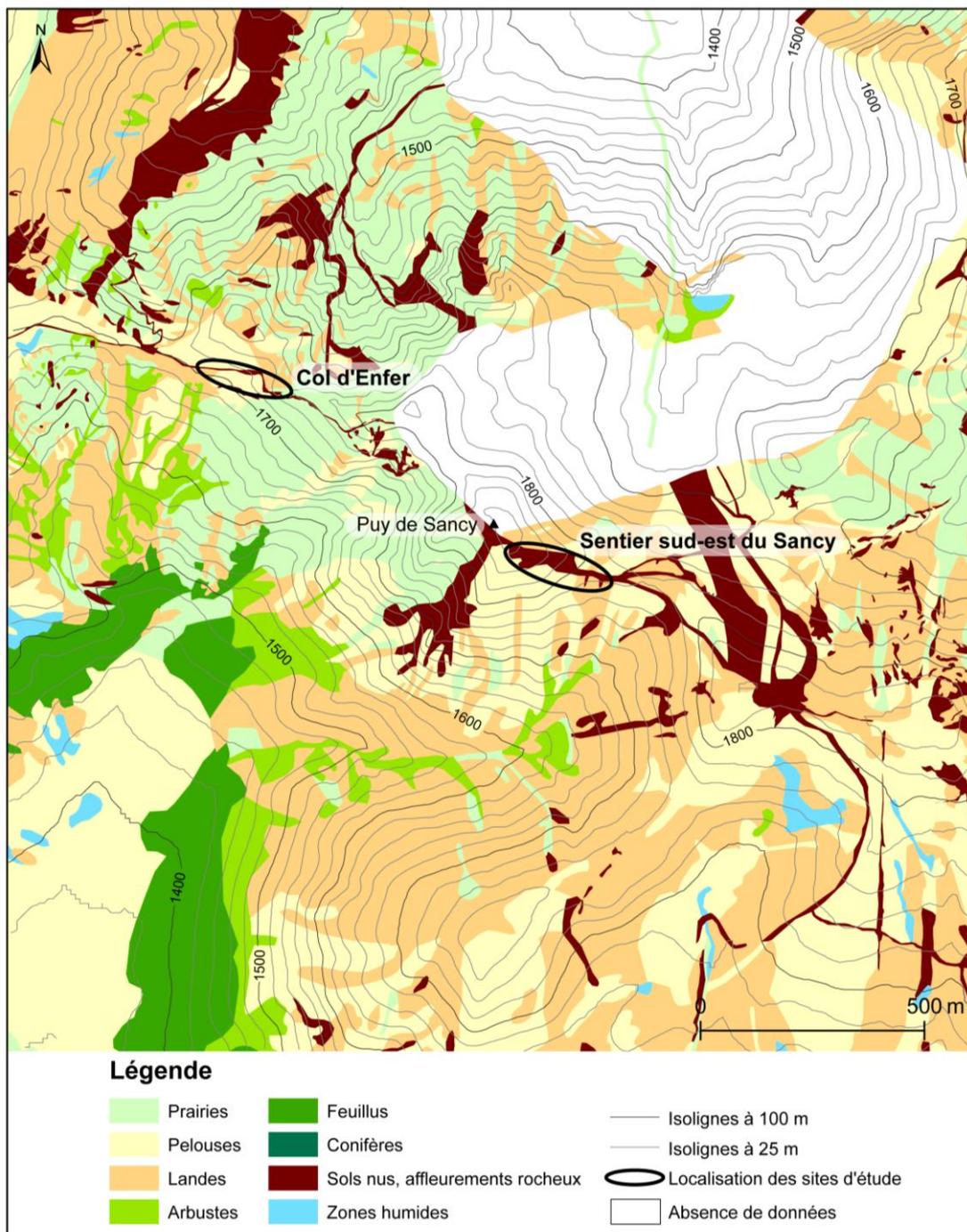


Fig. 21. Carte de la végétation du massif du Sancy, d'après les données du programme CHANES (Natura 2000, 2010).

Les usages de ce territoire, tel que les sports de nature, le tourisme, ou le pastoralisme, peuvent parfois mettre en péril l'équilibre de ces milieux naturels riches en diversité.

#### **3.1.1.4. L'importance des activités touristiques au sein du Massif du Sancy**

Les activités humaines impactant le cœur du Massif du Sancy sont pour l'essentiel l'agropastoralisme et les activités récréatives telles que la randonnée, l'escalade, le ski ...

L'agropastoralisme, sur le site du Massif du Sancy, se pratique principalement sous la forme d'élevage bovin pour la production de viande ou de lait (le site est compris dans les zones des cinq AOP (Appellations d'Origine Protégée) fromagères auvergnates, dont celle du Saint Nectaire) (Menadier, 2012). Mais on y trouve également des troupeaux ovins et équins. Les estives sont utilisées de mi-mai à fin octobre/mi-novembre, et de manière plutôt extensive avec un faible chargement : environ 0,5 UGB/ha/an (UGB = Unité Gros Bétail). Il peut toutefois y avoir localement un surpâturage du fait de la non-surveillance des bêtes (Belenguier et Birard, 2013). En dehors de quelques ovins à proximité du Col d'Enfer, l'activité pastorale ovine est peu présente sur nos terrains d'étude. À noter tout de même que l'activité sylvicole est également représentée dans le massif, mais à des altitudes plus basses et éloignée de nos terrains.

L'activité touristique s'est développée très tôt dans le secteur du Mont Dore en particulier avec le développement du thermalisme au début du 19<sup>ème</sup> siècle (stations thermales du Mont Dore et de la Bourboule), mais aussi à la pratique du ski dès le début du 20<sup>ème</sup> siècle (Pop *et al.*, 2009a). Par la suite, le développement de la randonnée ne fera qu'accentuer la fréquentation touristique d'été. Outre la randonnée et le ski, beaucoup d'activités touristiques et de pleine nature sont possibles dans le Massif du Sancy (Fig. 22). L'activité ayant le plus d'impact sur nos secteurs d'étude reste la randonnée. Le secteur des crêtes, qui passe par le Col de la Cabane, le Puy de Sancy et le Col d'Enfer, est le plus prisé. Plus des deux cinquièmes des randonneurs du Massif du Sancy passent par nos secteurs d'étude : 19,5 % empruntent le Col d'Enfer et 21,8 % le Col de la Cabane (pourcentages calculés par Bussière sur les 21 circuits les plus pratiqués ; Bussière, 2009). Des pics de fréquentation sur le sommet du Sancy affichent plus de 1000 personnes par heure (Belenguier et Birard, 2013). La fréquentation est maximale de mi-juillet à mi-août, avec des pics importants autour des 14 juillet et 15 août. Sur la journée, les horaires préférentiels de fréquentation du site se situent entre 12h et 14h, avec une préférence pour les jours de semaine

(Bussière, 2009). Cette importante fréquentation touristique engendre une détérioration de l'état des sentiers. Un diagnostic des sentiers sur le site Natura 2000 du Monts Dore a été réalisé en 2012 (Fig. 23) en vue d'identifier les secteurs nécessitant une restauration. La typologie utilisée pour réaliser cette carte est la suivante (Belenguier et Birard, 2013) : un sentier en bon état ne nécessite ni aménagement ni entretien particulier ; l'état correct d'un sentier laisse envisager un entretien seul du sentier ; le sentier dégradé implique de réaliser des travaux légers ; et l'état très dégradé d'une portion de sentier nécessite des travaux de restauration lourds. Les sites étudiés dans cette thèse font partie de cette dernière catégorie.

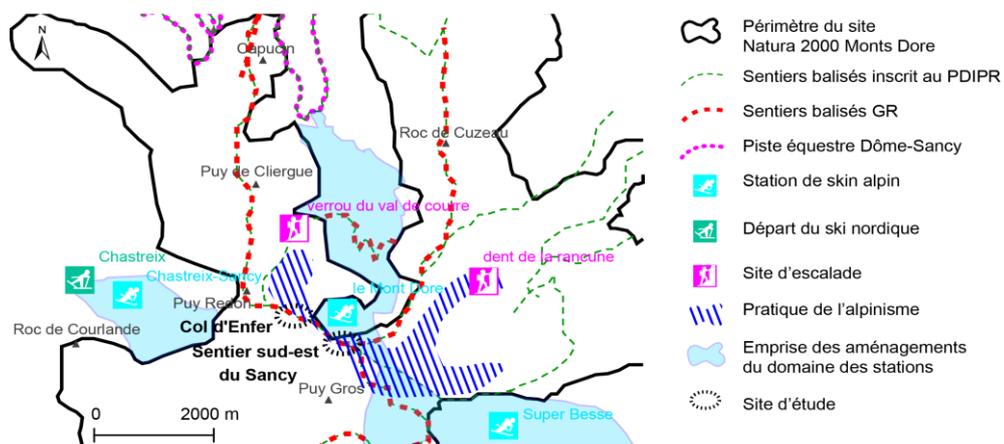


Fig. 22. Extrait de la carte des activités touristiques et de pleine nature du site Natura 2000 Monts Dore (Belenguier et Birard, 2013).  
(PDIPR = Plan Départemental des Itinéraires de Promenade et de Randonnée)

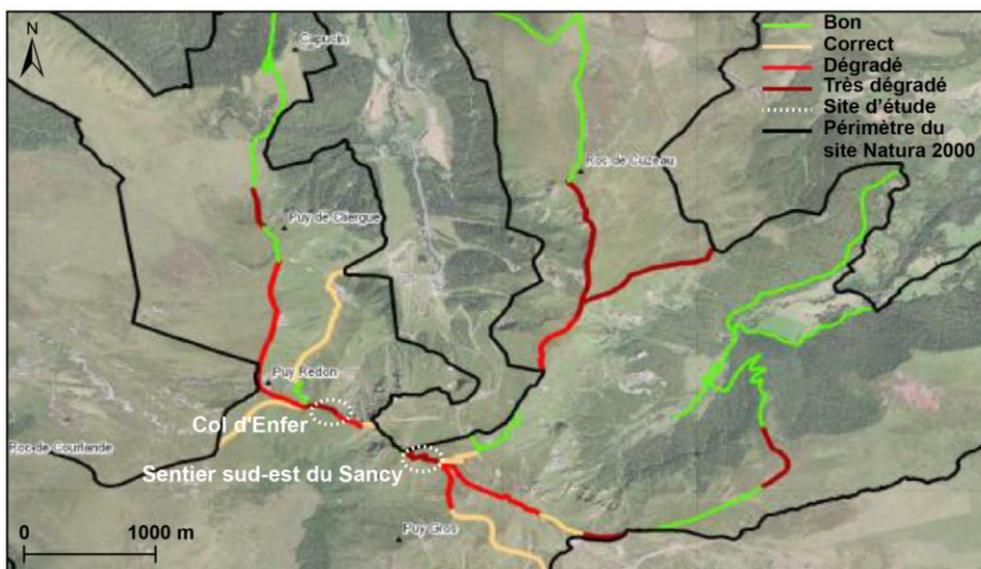


Fig. 23. Extrait de la carte d'état des lieux 2012 des sentiers de randonnée du site Natura 2000 du Mont Dore (Belenguier et Birard, 2013).

### **3.1.2. Les secteurs d'étude**

#### **3.1.2.1. Entre le sommet du Sancy et Col de la Cabane**

La première partie de sentier étudié descend les pentes du Puy de Sancy depuis son sommet (1885 m) jusqu'au col de la Cabane (1785 m) avec une orientation sud-est à est-sud-est. Près de ce col, la pente du sentier est relativement faible, mais elle atteint plus de 20° en se rapprochant du sommet. Ce secteur fait plus de 380 m de longueur sur 3 à 4 m de largeur en moyenne, avec des zones de près de 15 m de largeur (Fig. 24 b). La végétation avoisinant le sentier est de type subalpin, mais le sentier lui-même est dépourvu de couverture pédologique exceptés quelques rares îlots composés d'un andosol parfois végétalisé (Morel et Genevois-Gomendy, 2009). Le substrat sur lequel se trouve le sentier est constitué d'une roche massive trachyandésitique (Lavina, 1985). L'érosion de cette roche engendre la formation de blocs de taille modeste (de l'ordre de 10 à 20 cm de diamètre) qui s'accumulent sur le sentier et le rendent inconfortable à la randonnée.

Actuellement, l'ensemble du sentier dessine un lacet avec une sente unique, excepté sur la partie la moins pentue qui est plus rectiligne et se divise en deux sentes. Ce sont les gardes nature du parc et le conservateur de la réserve Chastreix-Sancy qui ont canalisé les randonneurs sur ce tracé au moyen de petits murets en pierres délimitant le sentier. Ce secteur d'étude se situe sur le GR4 et fait partie des deux seuls accès au sommet du Sancy, l'autre étant l'escalier en bois qui relie l'arrivée du téléphérique au sommet, ce qui en fait un secteur très fréquenté par les touristes. Ce sentier permet de redescendre sur les stations de Super Besse et du Mont Dore par le téléphérique ou par la piste de ski et d'accéder à la vallée de Chaudefour et à la Grande Cascade. Ce sentier est donc très fréquenté par les randonneurs puisqu'il se situe sur plusieurs circuits de petite, moyenne et grande randonnées. Une étude, réalisée par Julie Bussière (2009) en collaboration avec le PNRVA sur la fréquentation touristique du Sancy, montre que près de 22 % des touristes empruntent ce sentier. Une entrevue avec Monsieur Leroy, conservateur de la réserve Chastreix-Sancy, ainsi qu'une rapide comparaison photographique (Fig. 24 a-b), nous ont confortés dans notre choix de ce site pour effectuer un suivi d'érosion. La Réserve et le Parc des volcans d'Auvergne avaient déjà commandité une étude sur ce secteur (Morel et Genevois-Gomendy, 2009).

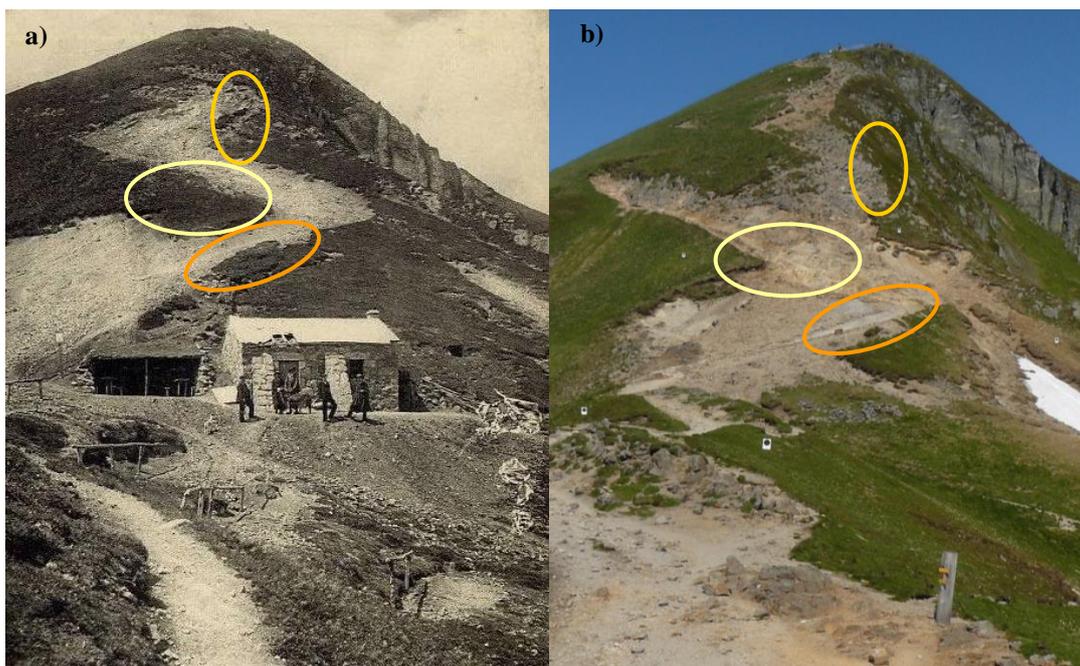


Fig. 24. Comparaison de photographies prises avant 1907 et en 2010. La photo de gauche est issue d'une carte postale qui a été envoyée en 1907. Les zones entourées en couleur permettent de saisir visuellement les évolutions.

### 3.1.2.2. Secteur du Col d'Enfer

Le deuxième secteur sélectionné est une portion du sentier du Pas de l'Âne (sentier situé entre le Col de Courre et le Puy de Sancy). Ce sentier étant très long, nous avons étudié la partie présentant le plus de signes d'érosion, c'est-à-dire le secteur situé au niveau du Col d'Enfer. Il fait approximativement 200 m de long et possède deux parties rectilignes se rejoignant quasiment à angle droit (Fig. 25). La partie amont de notre secteur d'étude a une orientation nord-sud et commence à une altitude d'environ 1780 m, tandis que la partie aval, orientée est-ouest, descend jusqu'à 1710 m d'altitude. Avec ces caractéristiques, il n'est pas étonnant de mesurer des pentes fortes sur l'ensemble du sentier, jusqu'à 22° en moyenne voire nettement plus localement. Ce sentier possède plusieurs sentes (Fig. 25), au minimum trois, qui sont, pour les plus empruntées, profondes de 40 à 70 cm environ, et larges de 1,5 à 2 m en moyenne. Autrement dit, ce site présente toutes les caractéristiques du sentier fortement endommagé selon la méthode de classement des sentiers de Marion *et al.* (2006). De plus, des dépôts éoliens affleurent à la surface du sentier, provenant du remaniement du substrat composé de nuées ardentes trachyandésitiques (Lavina,

1985) et mélangé avec ce qui reste de l'andosol (Morel et Genevois-Gomendy, 2009). Cette composition riche en fines rend la marche glissante, surtout par temps de pluie : le sol possède alors une faible portance et le sentier devient très boueux. Or ce sentier fait partie du GR30, qui est un sentier très fréquenté par les touristes (Bussière, 2009), puisqu'il se situe sur l'un des principaux circuits permettant l'accès au sommet du Sancy depuis la Station des Monts Dore.



Fig. 25. Secteur d'étude du sentier du Col d'Enfer.

De plus, suite à une discussion avec Monsieur Leroy, conservateur de la réserve Chastreix-Sancy, nous avons pris conscience de l'importance d'une étude plus détaillée sur ce secteur. L'étude réalisée par les bureaux d'études *Terra Mater et Sols et Environnement*, commanditée par le PNRVA et la Réserve, montre très bien l'ampleur des dégradations en 2009 (Morel et Genevois-Gomendy, 2009).

## **3.2. La Chaîne des Puys**

### **3.2.1. Contexte géologique et bioclimatique**

#### **3.2.1.1. Un alignement de volcans hétérogènes**

La Chaîne des Puys, qui culmine à 1464 m d'altitude avec le sommet du Puy de Dôme, est un ensemble composé d'une centaine d'édifices volcaniques

diversifiés, aux formes bien marquées et bien conservées, formant un alignement d'orientation nord-sud. Cet alignement volcanique se situe sur un horst cristallin longé à l'est par la grande faille de Limagne (Krafft et De Larouzière, 1999 ; Richet, 2003). Le plateau des Dômes s'élève à 900 m d'altitude en moyenne. La Chaîne des Puys est la dernière manifestation volcanique de la région, ses édifices s'étant formés depuis 156000 ans jusqu'à il y a environ 7000 ans (Nehlig *et al.*, 2003). Les deux sites d'étude choisis sont localisés dans la partie centrale de cet ensemble volcanique : le Petit Puy de Dôme, qui s'est formé il y a environ 42000 ans (Guérin, 1983), et le Puy de Côme, édifié entre -16000 et -13000 ans (Condomines *et al.*, 1982 ; Guérin, 1983). Ces deux volcans sont des cônes des scories (Fig. 26).

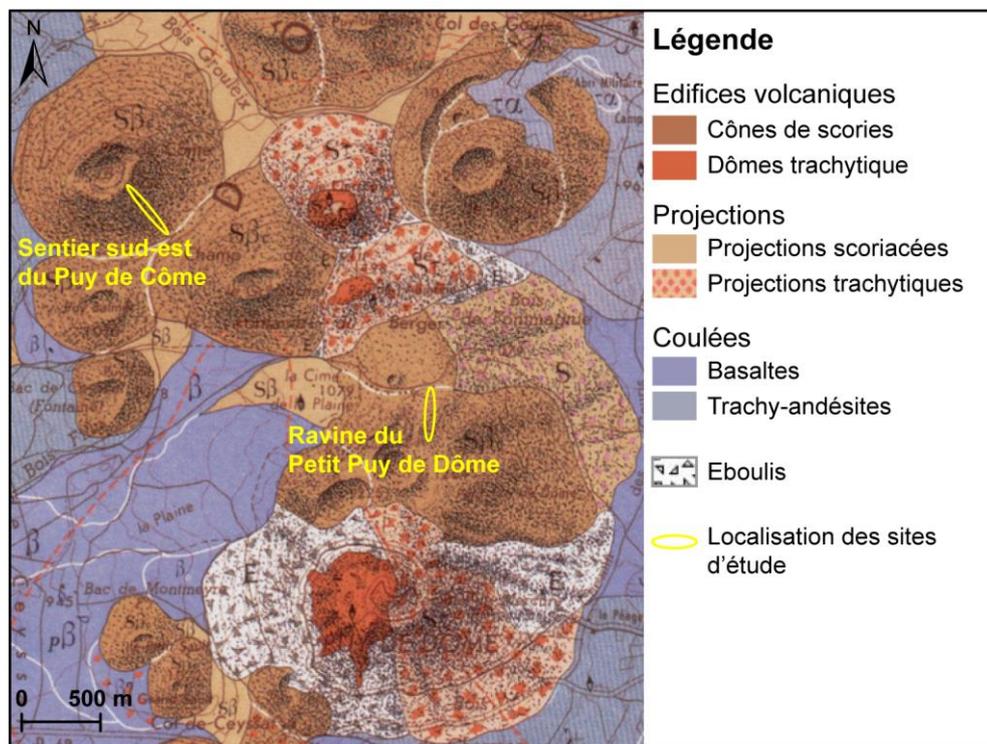


Fig. 26. Carte géologique de la zone centrale de la Chaîne des Puys.

Du fait de la jeunesse de ces édifices volcaniques, leur morphologie a été relativement peu impactée par l'érosion. Les différents types de volcans (cônes, dômes, maars) sont bien reconnaissables dans le paysage : leurs morphologies quasiment « juvéniles » contrastent avec le plateau hercynien sur lequel ils reposent. Les sentiers étudiés suivent la pente maximale des édifices auxquels ils appartiennent : sur le Puy de Côme, le sentier possède une orientation sud-sud-est et

une pente moyenne de l'ordre de  $27^\circ$  ; la ravine du Petit Puy de Dôme est orientée nord et a une pente moyenne d'environ  $22^\circ$ .

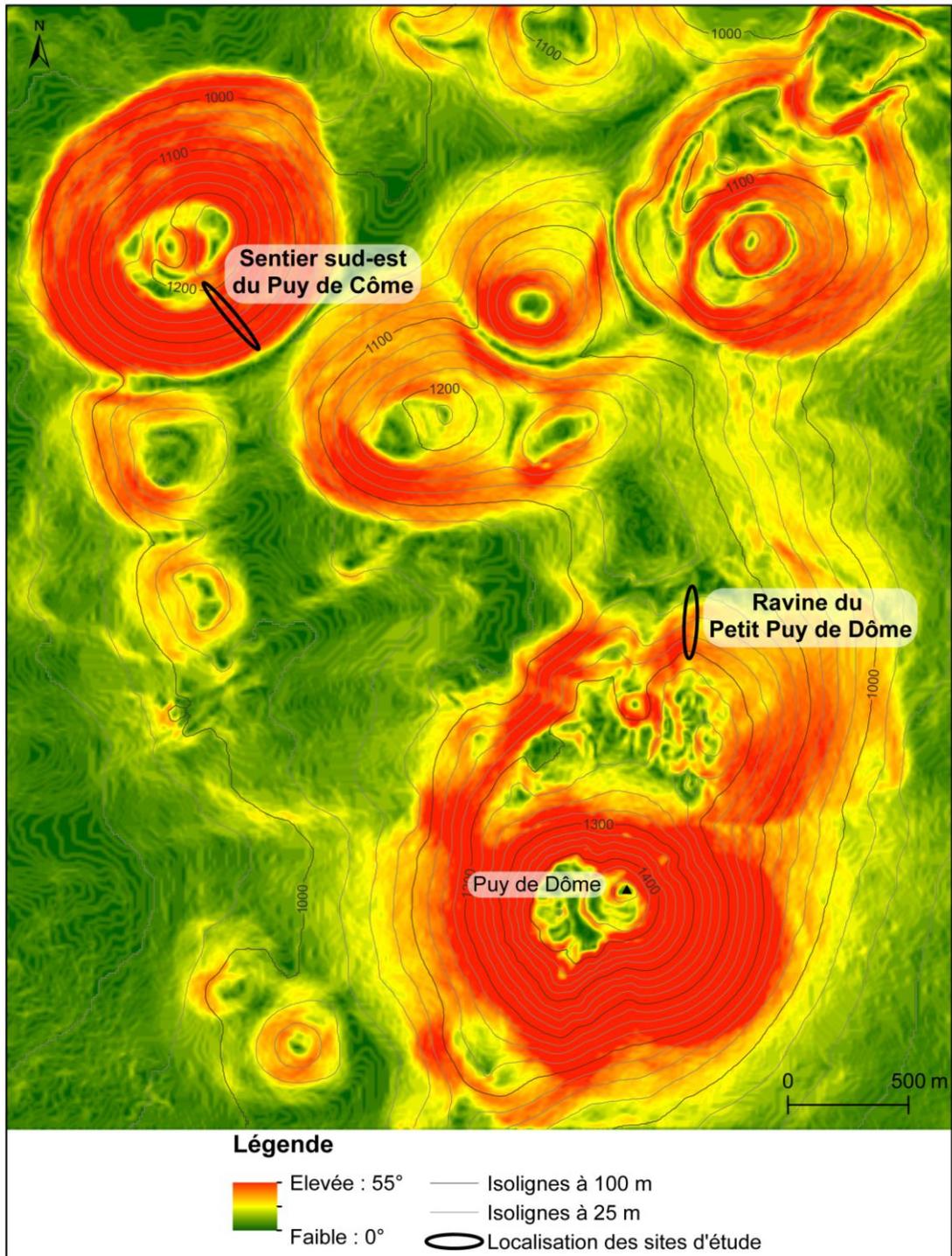


Fig. 27. Carte des pentes de la partie centrale de la Chaîne des Puys, réalisée d'après le MNT à 10 m de 2010 du CRAIG.

Comme le Massif du Sancy qui se situe plus au sud, la Chaîne des Puys constitue une barrière topographique aux flux océaniques d'ouest, ce qui engendre un climat montagnard à forte influence océanique.

### 3.2.1.2. Une variabilité climatique est-ouest et nord-sud

Sur la Chaîne des Puys, le climat est montagnard à forte influence océanique, avec des précipitations importantes réparties de façon homogène sur l'année. Les flux d'ouest, associés à la topographie, entraînent un effet de foehn, avec pour conséquence une variabilité climatique est-ouest. Le versant ouest de la Chaîne des Puys (cumul des précipitations à Gelles : 1046 mm/an) est plus humide que le versant est qui est plus chaud et sec (cumul des précipitations à Clermont-Ferrand : 591 mm/an, cf. Prévosto, 1999). À ce contraste climatique est-ouest s'ajoute une différenciation nord-sud (Coquillard *et al.*, 1988). Cette différenciation tend à subdiviser la Chaîne des Puys en trois parties : une zone nord possédant des conditions climatiques moyennes, une zone centrale froide et humide, et une zone sud abritée, chaude et sèche. Nous nous intéresserons plus particulièrement à la zone centrale, pour laquelle le diagramme ombrothermique de la Station du Puy de Dôme (Fig. 28) confirme un climat froid et humide. Une lacune de quatorze ans dans les données climatiques (de 1982 à 1994) ne permet pas d'avoir une série complète. Cette lacune correspond au déplacement de la station météo du versant sud-ouest vers le versant nord-est du Puy de Dôme. Il y a près de 700 m de distance entre l'ancien et le nouvel emplacement de la station météo.

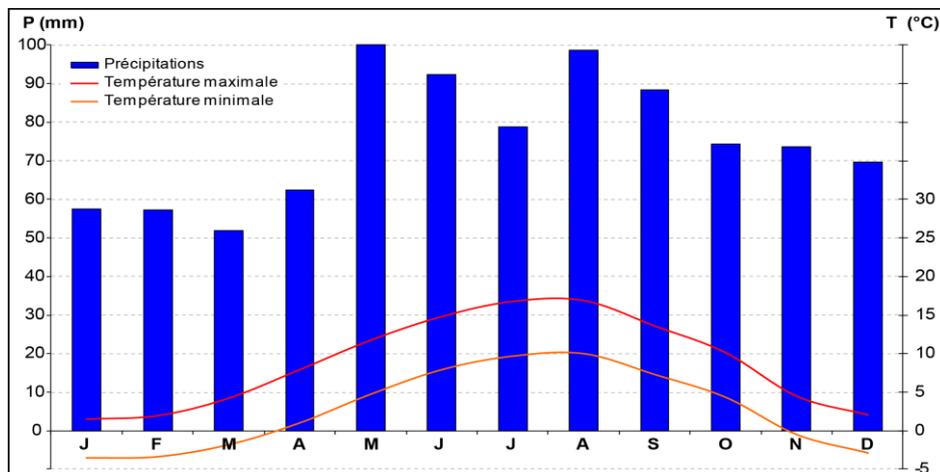


Fig. 28. Diagramme ombrothermique du Puy de Dôme réalisé avec les données climatiques de Météo France de 1948 à 1981 et de 1995 à 2011.

### 3.2.1.3. Une fermeture paysagère

Actuellement, la Chaîne des Puys est soumise à une dynamique de fermeture paysagère. Les milieux ouverts ont une biodiversité importante (Lefeuvre, 2013) : la quasi-totalité des habitats d'intérêt communautaire répertoriés sur le site Natura 2000 de la Chaîne des Puys se situe dans les zones à végétation basse (pelouses, prairies et landes). Ces habitats couvrent 453,2 ha du site Natura 2000 Chaîne des Puys, soit un peu plus de 22 % (Birard et Soulier, 2011).

Le sentier sud-est du Puy de Côme est colonisé par des fourrés de noisetier. Ces derniers sont également présents à proximité de la ravine du Petit Puy de Dôme, mais la majorité des abords de la ravine est occupée par des landes montagnardes à *Calluna* et *Genista*. Des pelouses semi-sèches à *Bromus erectus* entourent et colonisent peu à peu le cône de déjection ainsi que le côté est du bas de la ravine (Fig. 29). Cette végétation se développe sur des andosols oligotrophes (classe des andosols « vrais ») formés sous des conditions humides et fraîches. Ils sont présents, dans la Chaîne des Puys, à des altitudes supérieures à 1000 m (Arnalds *et al.*, 2007 ; Birard et Soulier, 2011 ; Lefeuvre, 2013). Lorsqu'ils sont secs, ces andosols possèdent une faible cohésion. En revanche, ils ont une forte capacité à retenir l'eau du fait de leur grande porosité capillaire (Legrand *et al.*, 2007 ; Lefeuvre, 2013) qui engendre, les jours de gel, la formation de pipkrakes.

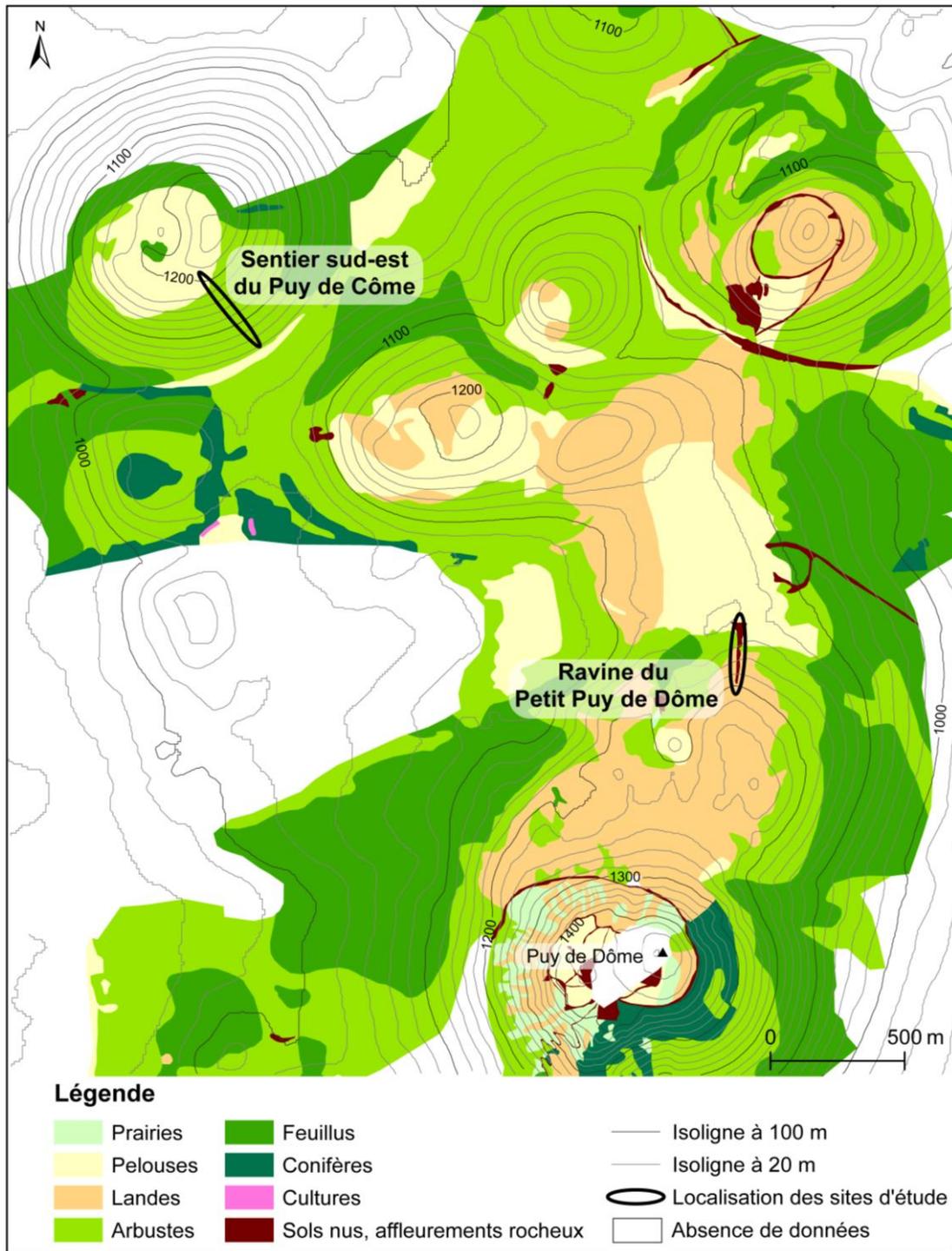


Fig. 29. Carte de la végétation de la partie centrale de la Chaîne des Puys, réalisée d'après les données du programme CHANES de Natura 2000.

### 3.2.1.4. Des activités humaines variées

Les activités humaines présentes sur la partie centrale de la Chaîne des Puys sont essentiellement le tourisme et le pastoralisme. Ce dernier est représenté par la

coopérative d'estive d'Orcines (Fig. 30). Cette estive, d'une superficie de 630 ha, est occupée de mi-mai à mi-octobre par un cheptel ovin d'environ 1850 bêtes (Lefeuvre, 2013). Contrairement au sentier sud-est du Puy de Côme, la ravine du Petit Puy de Dôme fait partie de l'estive. Ce type d'utilisation des terres est d'une importance capitale pour conserver un milieu ouvert, mais peut être source d'érosion localisée. Malgré les efforts réalisés par les acteurs locaux (agriculteurs, PNRVA, élus...), les estives, actuellement sous-pâturées, sont menacées dans leur existence, en raison du manque de subventions (Birard et Soulier, 2011).

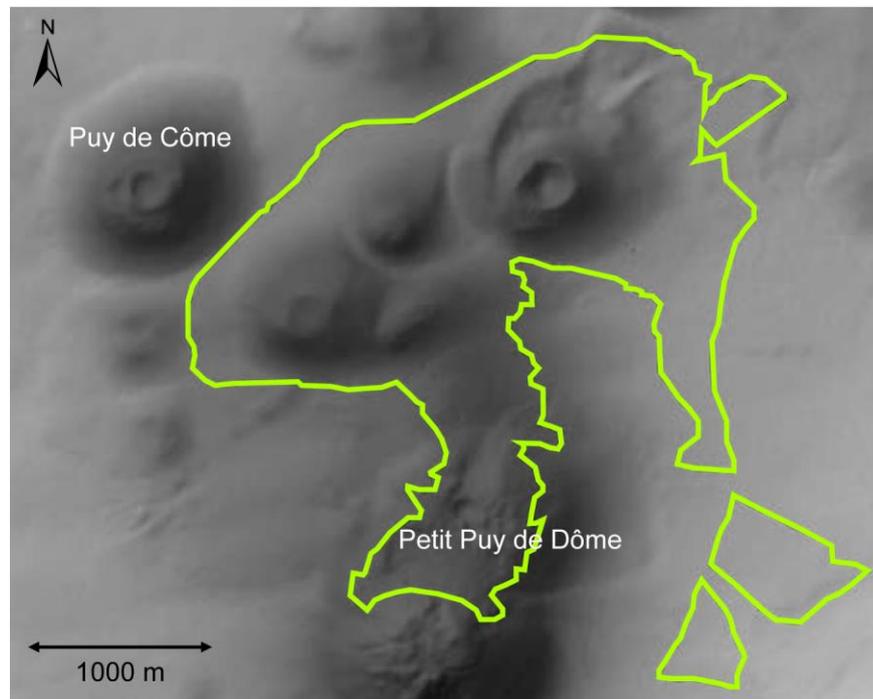


Fig. 30. Périmètres de la coopérative d'estives d'Orcines (Lefeuvre, 2013).

Les activités de pleine nature sont variées dans la Chaîne des Puys. Les activités motorisées, qu'elles soient récréatives (clubs et associations de pratique du quad, 4x4 et motos cross, chasse) ou non (agriculture), sont bien réglementées dans la Chaîne des Puys, malgré quelques pratiques hors pistes non autorisées. Les activités non motorisées, telles que la randonnée, l'équitation, ou encore le cyclisme ont un impact important sur l'érosion des terrains, et notamment des sentiers (Birard et Soulier, 2011). Le recensement de l'état des sentiers, mené par les gardes nature du parc (Fig. 31), témoigne de cet impact. Afin d'informer et de sensibiliser les usagers, qu'il s'agisse de touristes ou de riverains du site, une grande campagne de

communication (Annexe 3), notamment par le biais d'affiches concernant l'utilisation des sentiers (Fig. 32), a été réalisée par le Syndicat mixte du Parc Régional des Volcans d'Auvergne, de 2006 à 2008.

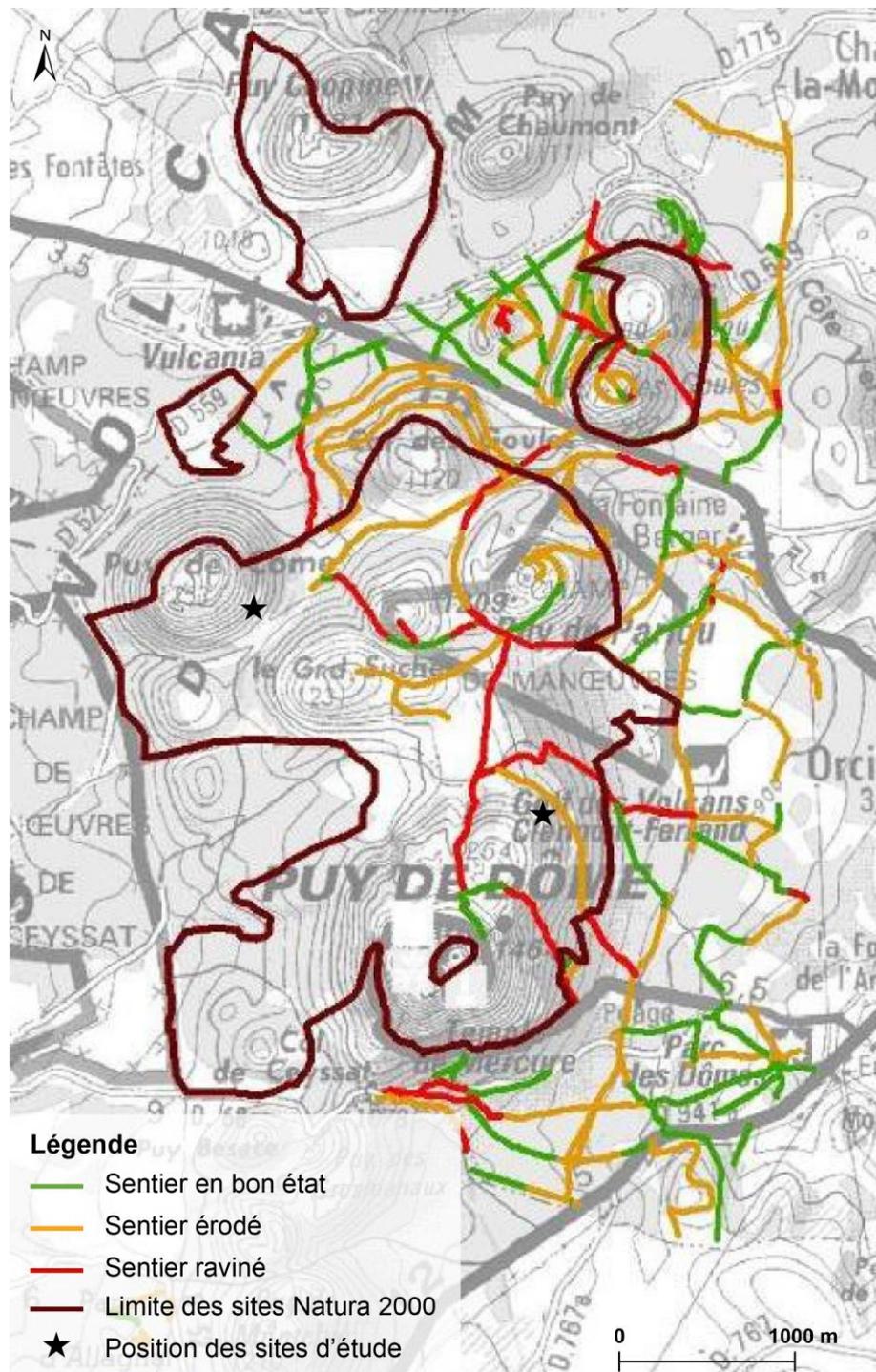


Fig. 31. Extrait de la carte répertoriant l'état des sentiers du site Natura 2000 de la Chaîne des Puys (Birard et Soulier, 2011).



Fig. 32. Affiches de la campagne de sensibilisation, « La Chaîne des Puys, fragile par nature », réalisé par le Syndicat mixte du Parc des Volcans d’Auvergne (Birard et Soulier, 2011).

### 3.2.2. Les secteurs d’étude

#### 3.2.2.1. La Ravine du Petit Puy de Dôme

Le Petit Puy de Dôme est un volcan complexe de type cône strombolien, à cratères multiples. Le cône de scories, de nature trachybasaltique, a été édifié il y a 42000 ans  $\pm$  5000 ans (Guérin, 1983). Après la mise en place du Puy de Dôme (10800  $\pm$  400 ans), une dernière explosion, de type phréatomagmatique, a créé le cratère actuellement visible (Boivin *et al.*, 2004), que l’on nomme le Nid de la Poule.

La photographie aérienne de 1974 laisse apercevoir la trace d’un sentier de randonnée au niveau de l’actuelle ravine du Petit Puy de Dôme (Fig. 33). Interdit à la randonnée depuis 2004, ce secteur n’a plus l’apparence d’un sentier. L’érosion a donné naissance à deux ravines emboîtées en contrebas desquelles un cône de déjection s’est mis en place (Fig. 34). Ce site forme un linéaire de 280 m de long, orienté N006°, sur une largeur variable de quelques dizaines de centimètres à plus de quatorze mètres. Cette ravine est orientée dans le sens de la pente qui est de l’ordre de 20°, ce qui facilite l’érosion par ruissellement concentré. Le maximum d’incision sur ce secteur atteint plus de 2 m de profondeur. La surface du bassin versant de cette ravine mesure 6135 m<sup>2</sup> (Annexe 4).

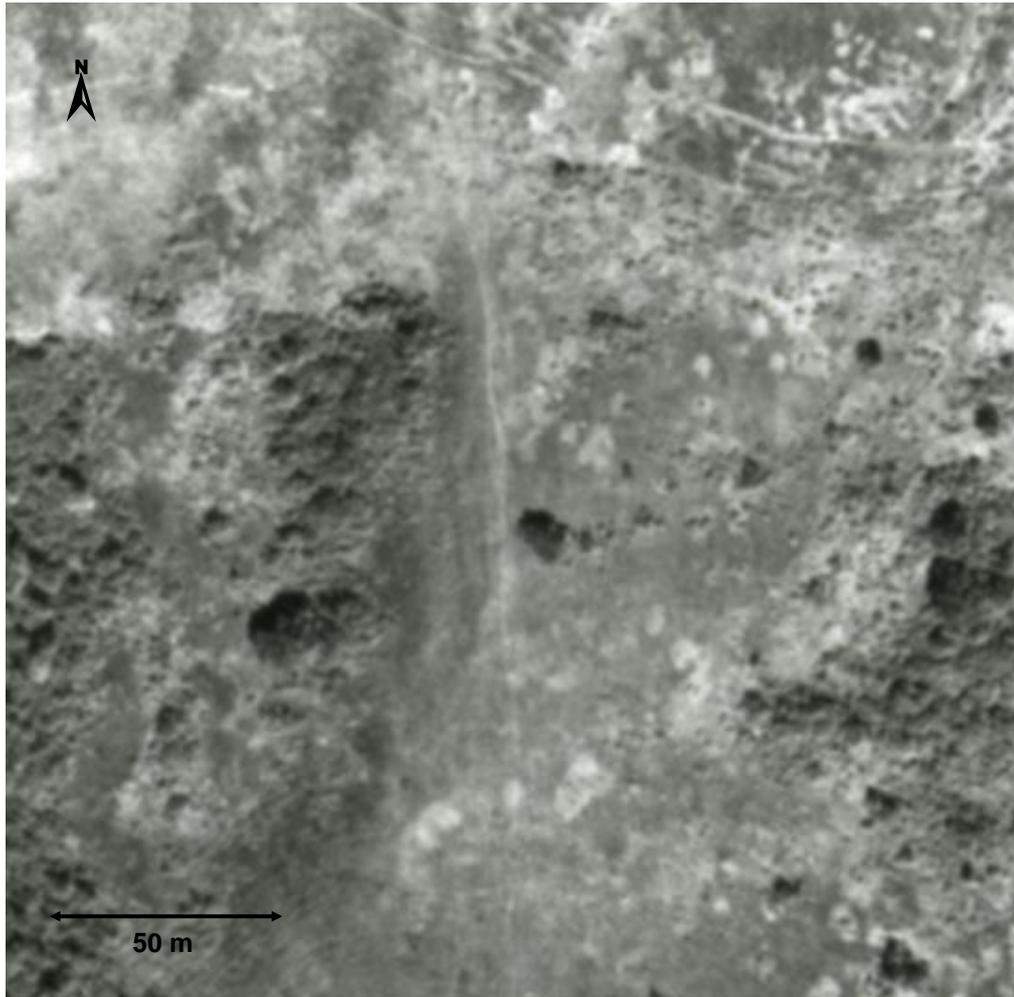


Fig. 33. Photo aérienne de 1974, avant la formation de la ravine du Petit Puy de Dôme (Source : IGN).

La végétation environnant la ravine est de type lande à genêts avec quelques arbustes à l'amont de la ravine. Vers l'aval de la ravine et à côté du cône de déjection il y a de plus en plus d'arbustes. Dans cette végétation, des rigoles incisent le sol et rejoignent la ravine. Ces formes contribuent à concentrer le ruissellement du petit bassin versant que draine la ravine. Dans cette dernière, quelques îlots de végétation subsistent, certains ayant une taille non négligeable, de l'ordre de quelques mètres de long sur quelques dizaines de centimètres de large. En dehors de ces îlots de végétation, il ne reste que très peu de sol, et lorsqu'on note sa présence, il provient très souvent de l'éboulement ou du glissement de mottes depuis le bord du sentier.

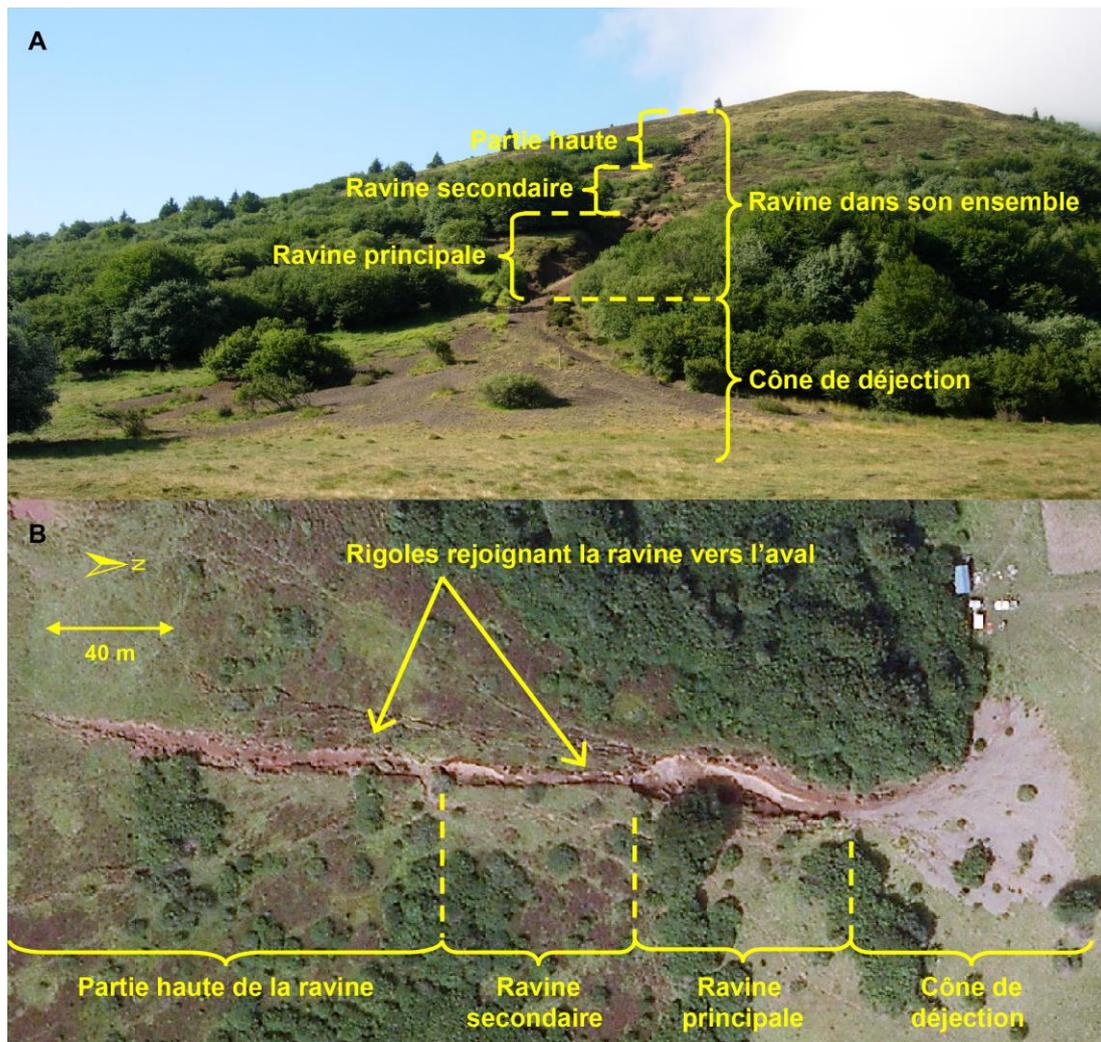


Fig. 34. Photographie de la ravine du petit puy de Dôme.

A. Photographie prise au sol le 8 juillet 2011, B. Photographie aérienne de 2009 (source : IGN).

Une première étude de suivi de l'évolution de la ravine a été réalisée sur deux ans au cours du master d'Alice Fournier (2007, 2008). Elle a ainsi effectué trois relevés topographiques qui lui ont permis d'obtenir des résultats intéressants. Le choix de ce secteur nous permet donc de disposer d'une base de données topographiques plus importante, et d'aller plus loin dans l'étude. Nous avons ainsi réuni cinq ans de relevés de terrain pour le suivi de l'érosion de ce secteur.

Ce site est également un exemple d'évolution d'un sentier fortement impacté et qui ne bénéficie pas d'aménagement. En effet, le secteur représente, en quelque sorte, l'évolution extrême d'un sentier. Une étude diachronique des contours de la ravine sur photographies aériennes, révèle un élargissement et un allongement rapide

du système (Fig. 35). Cette ravine possède des dimensions modestes, ce qui nous permet de l'étudier dans son ensemble, y compris avec son cône de déjection.

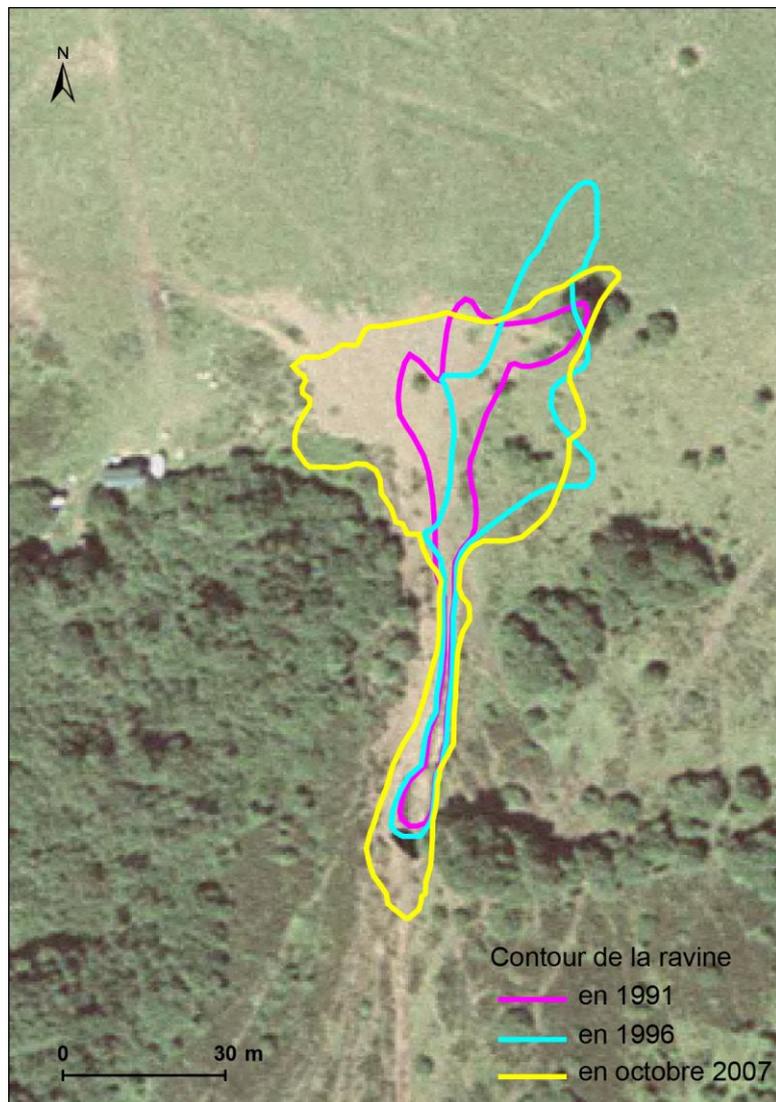


Fig. 35. Évolution du contour de la ravine du Petit Puy de Dôme entre 1991 et 2007 sur une photo aérienne de 1999 (Fournier-Teissedre, 2008).

### 3.2.2.2. Le sentier sud-est du Puy de Côme

La portion de sentier que nous étudions est comprise entre 1010 et 1220 m d'altitude et représente la partie la plus érodée du sentier. Notre secteur s'étend sur un linéaire de plus de 380 m de long (Fig. 36) sur les pentes fortes du Puy de Côme qui avoisinent 28°, et il s'inscrit dans un bassin versant de 7699 m<sup>2</sup> (Annexe 5). Ce sentier débouche sur un cône de déjection au pied du volcan. Sur l'ensemble de la

ravine, les paramètres géométriques, largeur et profondeur, sont très variables. En effet, la largeur fluctue entre 2 m et 14 m, et la profondeur varie de quelques dizaines de cm à plus de 2 m. La surface de la ravine est dépourvue de sol sur sa quasi-totalité, même si ses abords présentent une végétation de type taillis sous futaie.

Ce sentier a été interdit à la randonnée en 2002, par la communauté de communes de Ceysnat. Cette mise en défens est davantage motivée par des questions de sécurité des randonneurs et de responsabilité des maires en cas d'accident que par une réelle volonté de préserver les espaces fragiles. Faisant partie des sentiers balisés, ce chemin a été retiré des sentiers représentés sur les cartes IGN suite à cette décision (Fig. 36).

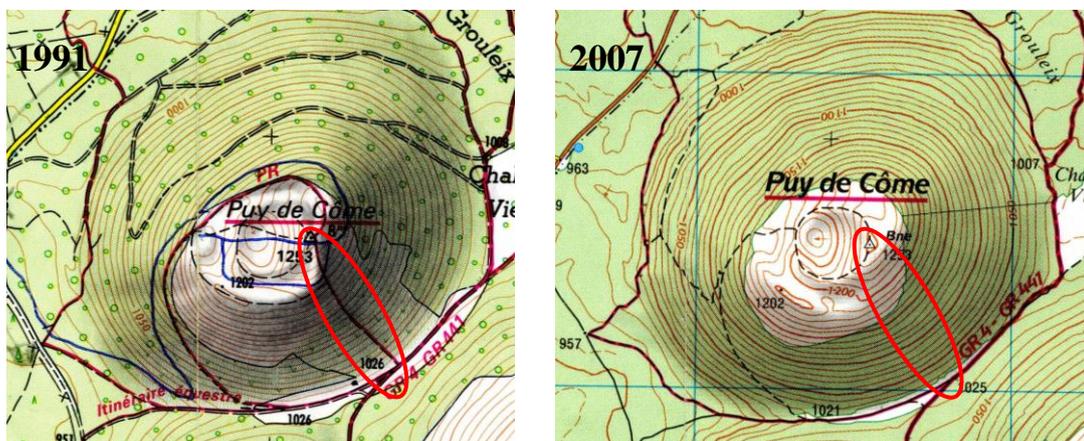


Fig. 36. Carte topographique du Puy de Côme, extrait de carte IGN, datant à gauche de 1991 et à droite de 2007. L'ellipse rouge représente l'emplacement du sentier étudié.

Ce sentier a bénéficié d'une précédente étude (Vaisse, 2005 ; 2006). Avec nos données, nous disposons donc de six ans de relevés, ce qui nous permet d'avoir plus de recul pour comprendre les modalités spatio-temporelles de mise en œuvre de la dynamique érosive. Même si ce sentier a été très fréquenté par le passé, nous pouvons considérer que l'érosion qui l'affecte est naturelle, depuis la mise en défens de 2002, et en l'absence d'aménagements et d'entretien particulier.



## Chapitre 4 : Méthodologie

Dans le but de comprendre, cartographier et quantifier l'érosion annuelle et saisonnière des sentiers de moyenne montagne auvergnate, nous avons réalisé un suivi topographique. Quand cela a été possible nous avons intégré à notre étude, des données antérieures (Vaïsse, 2006 ; Fournier, 2007 ; Fournier-Teissedre, 2008) afin d'étendre notre étude sur un pas de temps plus long. Ainsi, l'évolution de la topographie de la ravine du Petit Puy de Dôme a été suivie sur cinq ans et demi à l'aide d'un GPS différentiel. Le sentier sud-est du Puy de Côme a été étudié pendant quatre ans et demi avec une méthode de relevé manuel. Des mesures topographiques sur deux ans ont été réalisées sur le Col d'Enfer avec un GPS différentiel. Et enfin, le secteur entre le col de la Cabane et le sommet du Sancy a bénéficié d'un suivi très fin sur 2 ans à l'aide d'un scanner laser à longue portée.

Pour mieux comprendre l'évolution de nos secteurs d'étude, nous avons réalisé des études complémentaires en parallèle des relevés topographiques : étude climatique et étude du comportement des randonneurs. Les sentiers de la Chaîne des Puys ont ainsi bénéficié d'une étude climatique avec des données de Météo France provenant de la station fixe située sur le Puy de Dôme, mais également avec la collecte de données plus précises grâce à la mise en place d'une station météo temporaire sur le haut de la ravine du Petit Puy de Dôme. Cette étude climatique n'a pu être menée sur les sentiers du Massif du Sancy. En revanche, nous avons eu accès à des données sur la fréquentation touristique (Bussière, 2009) que nous avons complétées par une étude du comportement des randonneurs sur le site du Col d'Enfer.

### 4.1. Les données topographiques

Parmi les différentes méthodes répertoriées (Chapitre 2), nous en avons retenus trois différentes pour effectuer les relevés topographiques de nos quatre secteurs d'étude : une méthode à base de relevés manuels, l'utilisation d'un GPS différentiel et la lasergrammétrie terrestre. Les deux dernières méthodes permettent d'avoir des résultats en trois dimensions sous forme de modèles numériques de terrain. Les

résultats obtenus ont des précisions et des résolutions différentes selon les méthodes. La lasergrammétrie, appliquée au secteur situé entre le Col de la Cabane et le sommet du Sancy, nous a permis d'obtenir des résultats à haute résolution. Pour ce faire, nous avons utilisé un scanner laser 3D longue portée. Ce sentier étant dépourvu de végétation et peu encaissé, la lasergrammétrie semblait propice à une étude fine de l'évolution topographique. Les secteurs de la ravine du Petit Puy de Dôme et du Col d'Enfer ont été étudiés à l'aide de GPS différentiels. En raison de l'encaissement important et de la géométrie de ces sentiers, l'utilisation d'un DGPS a permis d'obtenir les meilleurs résultats envisageables pour notre suivi d'érosion. La méthode à levée manuelle, utilisée sur le sentier sud-est du Puy de Côme, livre des résultats de bonne qualité, mais seulement en deux dimensions. Le secteur du Puy de Côme étant sous couvert forestier, il n'était pas envisageable d'opter pour une méthode utilisant un appareil à visée directe (lidar, station totale) ou demandant une communication satellite (GPS). Nous avons donc choisi la méthode la plus adaptée au terrain et permettant d'obtenir les meilleurs résultats pour répondre à notre problématique.

#### **4.1.1. Scanner laser 3D longue portée**

La méthode de suivi d'érosion par lasergrammétrie terrestre a été mise en œuvre avec un scanner laser 3D longue portée de marque Optech Ilris 3D (Fig. 37). Cet appareil est un scanner laser par mesure du temps de vol (Fröhlich et Mettenleiter, 2004), c'est-à-dire qu'il calcule la distance entre sa position et celle de chaque point relevé à partir de la mesure du temps d'aller-retour des impulsions laser qu'il émet. Cet appareil est un outil d'une grande précision, chaque mesure de position collectée ayant une précision de 7 mm à 100 m de distance. Il relève automatiquement jusqu'à plusieurs centaines de points par seconde (Optech Incorporated, 2006). Cet appareil relève des points topographiques selon une grille dont l'espacement est prédéfini lors du paramétrage du scanner laser, sur l'ordinateur portable de terrain. Chaque relevé topographique fournit un jeu de données sous la forme d'un nuage de points (Fig. 39), dans un référentiel métrique arbitraire.

Pour effectuer un suivi diachronique, les nuages de points relevés doivent être intégrés dans un même référentiel spatial. Étant donné la nécessité d'obtenir des relevés précis, comparables et partageables avec les gestionnaires, le meilleur référentiel est celui du système international (WGS 84), dont la projection en France

est le Lambert 93. Pour se replacer dans ce référentiel, l'utilisation d'un GPS différentiel centimétrique est nécessaire. Nous avons donc couplé l'utilisation du scanner avec un GPS différentiel de type Magellan ProMark 500 (Fig. 38) afin de mesurer les coordonnées des centres des cibles placées sur le terrain d'étude. La connaissance de ces coordonnées permettra ensuite le géoréférencement de l'ensemble du nuage de points du scanner.



Fig. 37. Scanner laser Optech Ilris 3D. Fig. 38. DGPS Magellan.

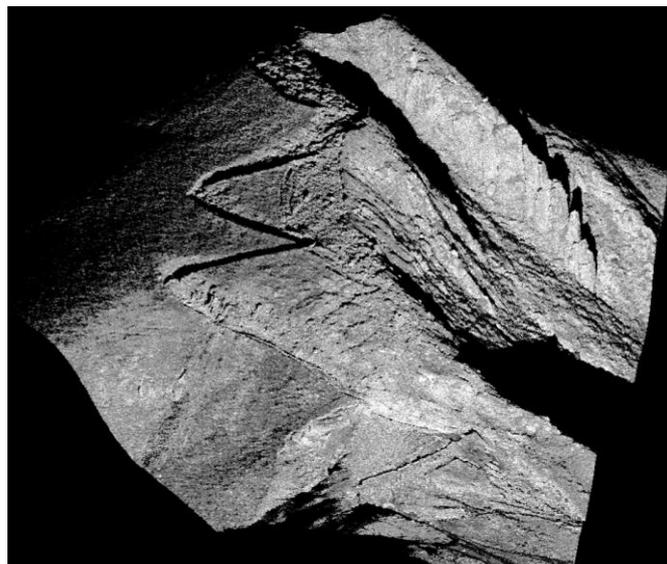


Fig. 39. Nuage de points obtenu par relevé scanner laser.

Pour géoréférencer le nuage de points de l'ensemble du secteur, nous avons utilisé des cibles suffisamment grosses pour être visibles depuis l'emplacement du scanner jusqu'aux parties les plus éloignées du terrain. Elles sont formées d'un cercle noir de 30 cm de diamètre sur un rectangle blanc ; le centre de la cible est positionné à environ 70 cm du sol (Fig. 40). Afin d'améliorer la précision du géoréférencement, nous avons utilisé des cibles ayant la même position pour chaque relevé. Cependant, étant sur un site classé en réserve naturelle très prisé par les touristes, il n'était pas envisageable de laisser les cibles apparentes sur le terrain. Nous avons donc opté pour un support de cible fixe en sous-sol (Fig. 40 A), non visible à la surface. Quatre cibles suffisent pour géoréférencer le nuage de points mais par mesure de sécurité, nous avons choisi d'en implanter six (Fig. 41). Le fait d'avoir plus de cibles que nécessaire nous permet d'utiliser celles qui offrent le meilleur géoréférencement du nuage de points, certaines pouvant être mal scannées à cause d'un léger décalage lors du relevé. Les cibles non utilisées dans la phase de géoréférencement peuvent également servir de point de contrôle afin de valider le calage du nuage de point.

Ces cibles sont scannées en même temps que le reste du secteur d'étude (Fig. 40 C), mais avec une résolution beaucoup plus fine, inférieure à 1 cm pour chacune des cibles quelle que soit leur distance à l'appareil (Fig. 40 B). Une bonne lisibilité de la cible nous permet, lors du traitement des données, de pouvoir repositionner correctement le centre de la cible afin de lui appliquer sa position géographique mesurée sur le terrain avec une précision centimétrique à l'aide du GPS Magellan, et ainsi géoréférencer le nuage de points. Par souci de stabilité de la canne du DGPS et donc de précision des coordonnées, la mesure est effectuée au niveau du sol, sur le support de la cible. Par la suite, une correction est appliquée à chacune des coordonnées mesurées afin que celles-ci correspondent aux coordonnées du centre de la cible et non plus à celle du centre du support (Annexe 6). Il est important d'être le plus précis possible dans ces dernières étapes afin de limiter le cumul d'erreurs.

En revanche, les nuages de points réalisés localement, sur des portions de sentier, sont dépourvus de cibles. Ils ont été calés les uns par rapport aux autres à partir d'objets ayant la même position spatiale et la même géométrie d'un relevé à l'autre (roche en place, fragments rocheux trop imposants pour être déplacés par l'homme ou modifiés par les conditions climatiques sur une courte période...), et visibles à la fois sur le scan général et sur les scans locaux.

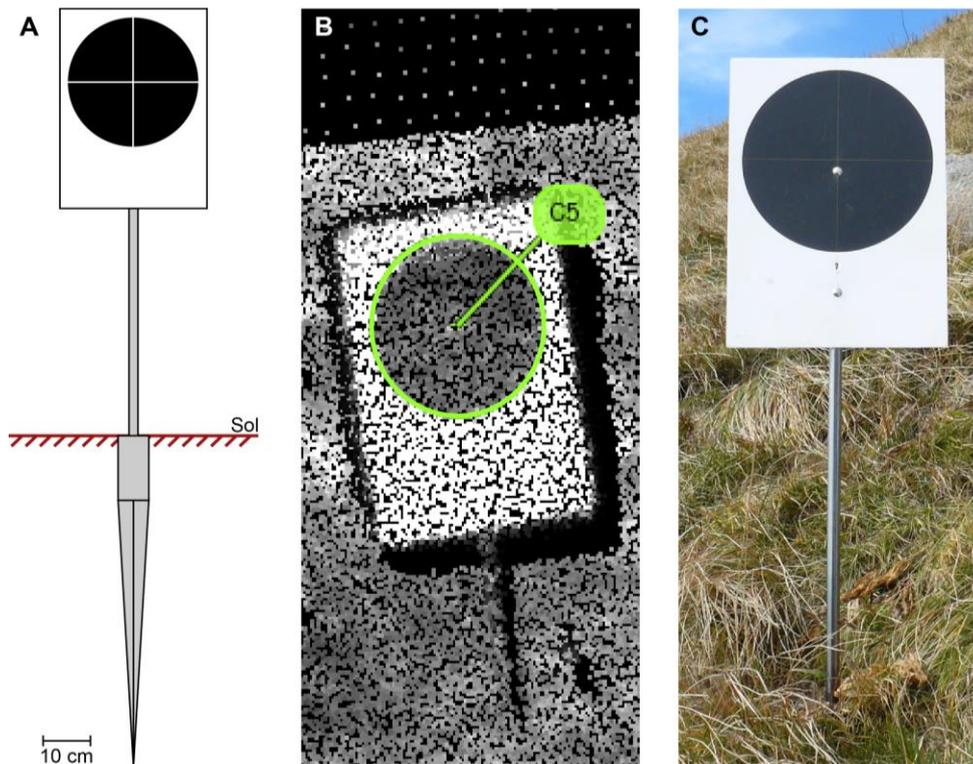


Fig. 40. Cible permettant de géoréférencer les nuages de points.  
 Le schéma A présente le support des cibles, la photo B est issue du nuage de points, l'image C montre la cible *in situ*.



Fig. 41. Emplacement des différentes cibles présentes sur notre secteur d'étude.

Outre la grande résolution des données issues du scanner laser longue portée, l'avantage premier qui nous a poussé choisir cette méthode est sa vitesse d'acquisition des données. En effet, au vu de l'ampleur de la zone à couvrir, des conditions climatiques limitant la période de travail *in situ*, et de la fréquentation touristique importante, il a fallu choisir un outil capable de réaliser un relevé topographique rapidement et efficacement.

L'inconvénient majeur de ce type d'appareil est qu'il ne relève des points que sur les surfaces que le rayonnement laser peut atteindre, ce qui entraîne des masques importants et donc des données manquantes derrière certaines parties en relief (Martinat, 2009). La figure 39 montre des zones noires, sans données, sur le sentier, notamment dans sa partie haute ; les abords du sentier étant plus hauts que le reste du sentier lui-même, ce dernier n'a pu être scanné. C'est pourquoi nous ne nous sommes pas contentés de faire un scan de la globalité du terrain depuis un point extérieur au terrain ; nous avons également réalisé des scans avec des fenêtres de données plus petites sur certaines parties du sentier, invisibles sur le nuage de points global. Au total, nous avons donc réalisé un scan global et 4 à 7 scans localisés, en fonction des conditions météorologiques du jour de la collecte de données et de l'état des batteries ; et ce pour chacun des quatre relevés topographiques réalisés entre le 24 juin 2010 et le 26 septembre 2011.

Un autre inconvénient, non négligeable, de cette méthode est lié au poids du matériel. Étant donné que le site d'étude se trouve à près de 3 km de distance et 450 m de dénivelé du parking le plus proche, l'atteindre le site d'étude à pied avec le matériel n'était pas envisageable. En effet, le scanner laser pèse, à lui seul, plus de 13 kg, sans compter son trépied topographique, les nombreuses batteries ainsi que l'ordinateur portable de terrain dont il a besoin pour fonctionner (Fig. 37), le DGPS (Fig. 38) et les cibles, pour un poids total dépassant 50 kg. Outre le poids, la taille et la fragilité de certains appareils posaient également un problème. Cependant, le sentier étudié étant proche d'une piste, nous avons pu être transportés en pick-up à proximité du site d'étude, ce qui a facilité la mise en œuvre de cette technologie « lourde ».

L'ensemble du terrain d'étude a été scanné quatre fois (les 24 juin et 6 octobre 2010 et les 28 juin et 26 septembre 2011), avec une résolution moyenne de 10 cm à 100 m. Le nuage de points résultant possède une résolution variable de 7 cm sur le

bas du site (à 70 m de distance par rapport au scanner laser) à plus de 30 cm sur les parties les plus éloignées de l'appareil.

#### **4.1.2. Les GPS différentiels**

Le GPS différentiel ou DGPS est un outil permettant de faire des relevés topographiques point par point avec une précision centimétrique. Contrairement à la méthode précédente, les points ne sont pas nécessairement collectés automatiquement selon une grille prédéfinie, chaque point étant relevé librement par l'utilisateur. L'emprise du nuage de points peut avoir une géométrie particulière en fonction des besoins de l'étude réalisée. La résolution dépend du nombre de points enregistrés. Plus le nombre de points sera important, plus le relevé topographique sera a priori précis, plus la résolution sera fine, mais plus la méthode sera chronophage. Il est important de trouver un compromis au niveau de l'espacement entre les points pour répondre à l'objectif scientifique sans y passer plus de temps que nécessaire. L'acquisition de ces points nous permet de produire un modèle numérique de terrain pour chaque campagne, le but étant de comparer les MNT obtenus sur un même secteur, de cartographier et de quantifier l'évolution du sentier entre deux relevés topographiques.

Nous avons choisi une stratégie d'échantillonnage permettant d'enregistrer la topographie de nos secteurs sur une même journée afin de ne pas risquer d'avoir des modifications, liées au climat ou à l'utilisation des sites. Nous avons levé nos points GPS en suivant des transects espacés de 4 à 10 m, en fonction de la configuration des terrains et des changements topographiques visibles (Fig. 43, Fig. 45). Sur ces transects, nous avons relevé nos points au niveau des ruptures de pentes. Ainsi entre chaque point levé, la topographie peut raisonnablement être assimilée à une droite. Les TIN (*Triangulated Irregular Network*), construits à partir de ces jeux de données, sont donc une bonne représentation de la réalité du terrain.

Le GPS différentiel est constitué d'une station de base, qui reste fixe pendant l'acquisition d'un jeu de données, et d'un mobile, qui permet d'enregistrer chaque point du relevé. La station de base fournit en temps réel des corrections permettant d'obtenir un relevé « centimétrique ». Une fois relevée, les données sont post-traitées à partir des stations GPS fixes du réseau GNSS permanent (stations de Clermont-Ferrand, d'Ambert, d'Égletons et de Saint-Julien-Puy-Lavèze) sous le logiciel GNSS

Solution. Ce post-traitement permet un ajustement des données afin quelles soient les plus précises possibles.

Nos deux études basées sur des données collectées au GPS différentiel ont été réalisées avec deux appareils différents (Fig. 42). Si le principe est le même dans les deux cas, les méthodes présentent quelques variantes dues à la différence du matériel utilisé et aux particularités de chaque terrain. Le DGPS Leica (Fig. 42 A) a été utilisé sur la ravine du Petit Puy de Dôme (Chaîne des Puys), tandis que le DGPS Magellan (Fig. 42 B) a été utilisé sur le sentier au niveau du Col d'Enfer (Massif du Sancy).



Fig. 42. GPS différentiel utilisé pour le suivi d'érosion. La photo A montre la base du DGPS Leica, la photo B le DGPS Magellan.

#### 4.1.2.1. Le DGPS Leica sur la ravine du Petit Puy de Dôme

Des relevés topographiques avaient déjà été effectués sur la ravine du Petit Puy de Dôme par Fournier (2007 ; 2008), étudiante de master à Geolab. Ces précédentes collectes ont été réalisées avec différentes méthodes : la photogrammétrie, la lasergrammétrie terrestre et le DGPS (Fournier, 2007 ; Fournier-Teissedre, 2008). Ces trois méthodes ont été testées sur la ravine principale seulement et non sur

l'ensemble de notre secteur d'étude. Seuls les relevés au GPS différentiel ont été réalisés sur l'ensemble du site tel que nous l'avons délimité. Les deux premières méthodes ne permettent pas d'obtenir les résultats que nous souhaitons. De plus, ces méthodes sont difficilement applicables sur l'ensemble de la ravine notamment en raison de sa longueur. Une nouvelle étude par photogrammétrie multi-images a été réalisée, au sein du laboratoire, sur la ravine principale, afin de tester de nouvelles méthodes de traitement (Genet *et al.*, 2011). Les résultats obtenus sont de meilleure qualité que ceux obtenus par Fournier (2007 ; 2008) car cette méthode est plus adaptée au terrain. Cependant, les conclusions de l'étude ont montré que la méthode serait difficile à appliquer sur l'ensemble de la ravine. Nous avons donc décidé d'en rester à une méthode basée sur le GPS différentiel, le même qu'utilisait Fournier (2007 ; 2008) : le DGPS System 500 de Leica.

Sur ce secteur, un point de référence avait été mis en place lors de la toute première campagne effectuée en avril 2007 (Fournier, 2007). Ce point a été mesuré pendant 8 h puis post-traité afin de connaître ses coordonnées avec une précision infra-centimétrique. Ce point, une fois enregistré, a été matérialisé sur le site par un piquet en bois profondément implanté (Fig. 42 A) ; il est resté fixe depuis sa mise en place. Une vérification des coordonnées de ce point de référence a été effectuée au début de ce travail de recherche. Pour chaque collecte de données, la base du GPS différentiel a été positionnée et paramétrée en fonction de ce point de référence, ce qui a permis d'obtenir directement les résultats des points relevés sur le terrain, sans avoir à post-traiter les données enregistrées.

Chaque jeu de données compte entre 2000 et 3000 points (Fig. 43). Sur la partie haute de la ravine, les points sont collectés selon des transects espacés de 4 à 5 mètres. Puis les points sont relevés au niveau de chaque rupture de pente affectant le transect. Cette méthode de relevé est parfois ajustée en fonction des éléments de microtopographie visible sur le terrain, tel que des îlots de végétation situés entre les transects relevés. Sur les ravines, principale et secondaire, et notamment au niveau des têtes de ravines, un plus grand nombre de points est relevé. Sur ces secteurs, il n'est pas possible de faire des transects en raison des reliefs importants et des lacunes que cela entraînerait dans le jeu de données, et pour ne pas dégrader les parois fragiles des ravines. Le relevé s'effectue dans un premier temps sur le contour des ravines, avec des points levés tous les 50 cm environ. Puis le fond des ravines est

enregistré, mais toujours dans une logique de relevé des ruptures de pentes. S'agissant du cône de déjection, un enregistrement de son contour est effectué en premier lieu, avec un espacement d'un mètre. Enfin, des transects distants d'une dizaine de mètres sont levés à l'intérieur du cône.

Au total, 14 relevés topographiques ont été obtenus avec cette méthode, sur la ravine du Petit Puy de Dôme (Fig. 44). Fournier (2007 ; 2008) a réalisé trois relevés entre avril 2007 et avril 2008. Lors des deux premières campagnes, la topographie de la partie haute de la ravine n'a pas été relevée. Puis, nous avons effectué sept campagnes de terrain, avant et après chaque hiver, entre novembre 2009 et mai 2012, afin d'affiner la saisonnalité des taux d'érosion. Les quatre jeux de données restants ont été réalisés au cours de l'été 2011 afin d'obtenir un modèle numérique de terrain avant et après un potentiel évènement climatique important, de type orage d'été avec de fortes précipitations sur un temps court.

Le relevé topographique de l'ensemble de la ravine s'effectue sur une journée complète (7 à 8 h de travail une fois le DGPS monté et paramétré, plus 2 h de marche aller-retour pour accéder au site d'étude). Il est arrivé à plusieurs reprises que les batteries du DGPS soient faibles à la fin de la journée de travail, c'est pourquoi le cône de déjection a parfois été relevé un peu rapidement et de façon moins régulière que le reste de la ravine. Le 12 juillet 2011 un problème de batterie nous a empêchés de terminer l'enregistrement des données du secteur d'étude.

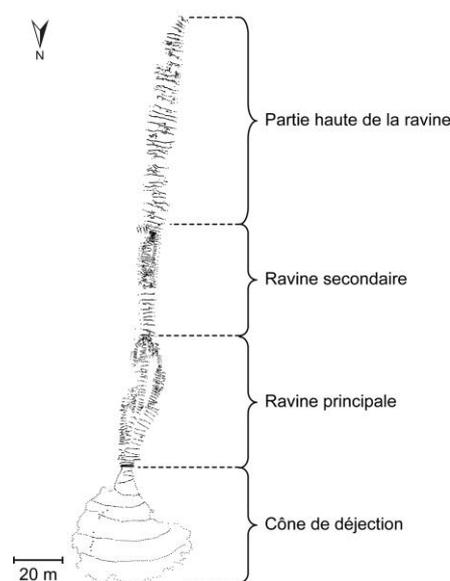


Fig. 43. Ensemble des points d'un relevé topographique effectué sur la ravine du Petit puy de Dôme (02.09.11).

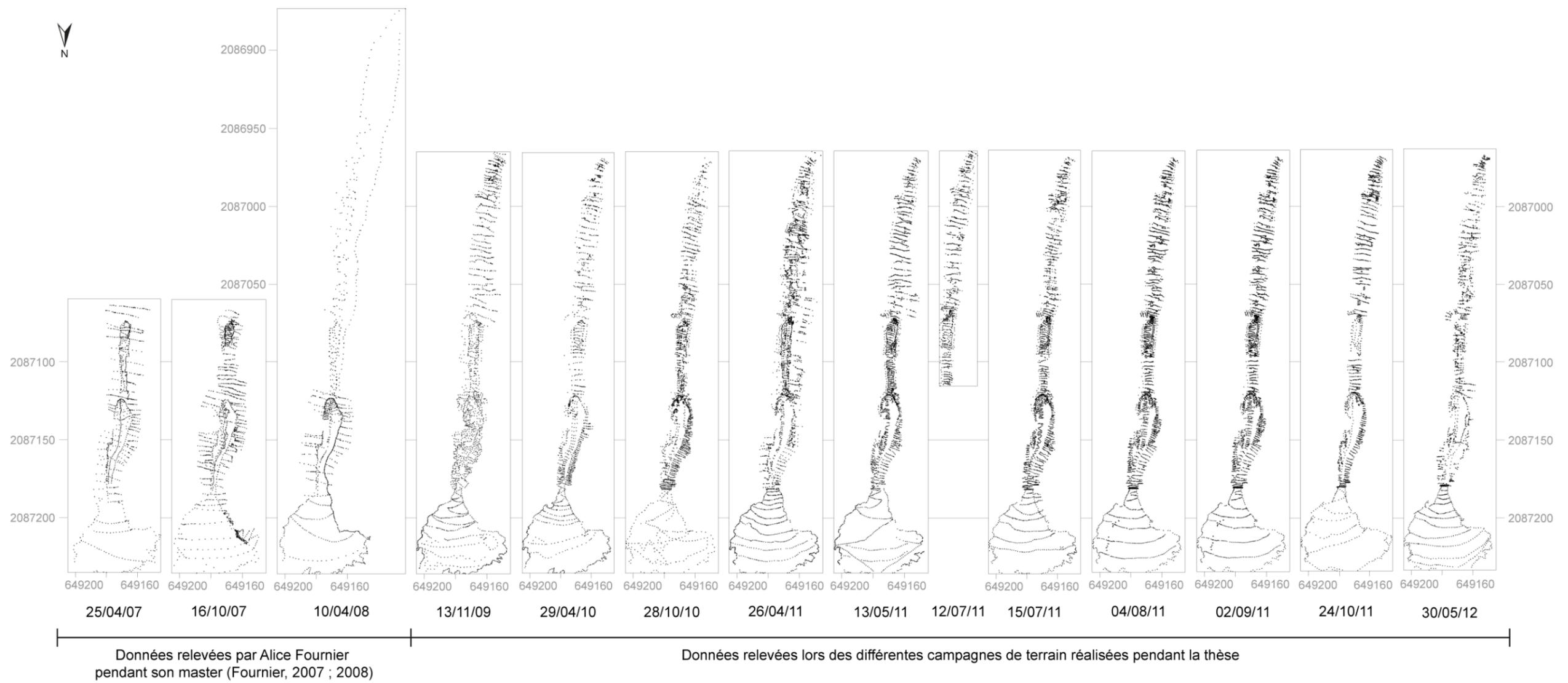


Fig. 44. Ensemble des données topographiques brutes relevées sur la ravine du Petit Puy de Dôme.



#### **4.1.2.2. Le DGPS Magellan sur le sentier du Col d'Enfer**

Le Col d'Enfer étant très fréquenté et faisant partie de la réserve de Chastreix-Sancy (Annexe 1), il n'a pas été possible de mettre en place un point de référence. De ce fait, le DGPS Leica n'a pas pu être utilisé puisque pour pouvoir collecter des coordonnées géographiques avec cet appareil, sans point de référence, il nous fallait le laisser tourner pendant 8 h afin de post-traiter convenablement les données sans introduire des erreurs trop importantes. De plus, les forts reliefs encadrant le sentier du Col d'Enfer engendrent des masques au niveau des communications entre les satellites et la base du GPS. Il nous fallait donc un appareil qui capte un plus grand nombre de réseaux satellitaires, et qui ait besoin d'une durée d'enregistrement moins longue sur le terrain pour post-traiter les données recueillies. C'est pourquoi nous avons opté pour le GPS différentiel Magellan de type ProMark 500, qui capte plus de satellites, notamment la constellation Glonass (que ne capte pas le GPS Leica utilisé sur la ravine du Petit Puy de Dôme), et qui ne nécessite que trois heures d'enregistrement sur le terrain pour post-traiter les données et obtenir un positionnement centimétrique de la base.

Quatre campagnes de terrain ont été réalisées entre mai 2010 et novembre 2011, avant et après la saison hivernale. Les données ont été collectées selon des transects espacés de quatre à cinq mètres sur la quasi-totalité du terrain (Fig. 45). Cependant, par manque de temps, les transects sont distants d'une dizaine de mètres sur la partie ouest du terrain, un secteur où la topographie du sentier est plus régulière, et où la finesse du pas d'échantillonnage a moins de répercussions sur la qualité du MNT final.

Sur le terrain, une description (géocode intégré aux données GPS) a été affectée à chaque point relevé. Cette donnée supplémentaire fournit une indication sur le type de sol où se situe le point. Ainsi, ces descriptions nous permettent de savoir si le point a été relevé sur la végétation, sur le sol nu - autrement dit le sentier - à la limite entre les deux, sur de la roche en place ou des blocs supérieurs à un mètre cube, ou encore si le point a été enregistré au niveau des aménagements mis en place au cours de notre étude. Cette donnée permet de suivre l'évolution du bord du sentier avec une éventuelle perte de végétation mais sans incision significative.

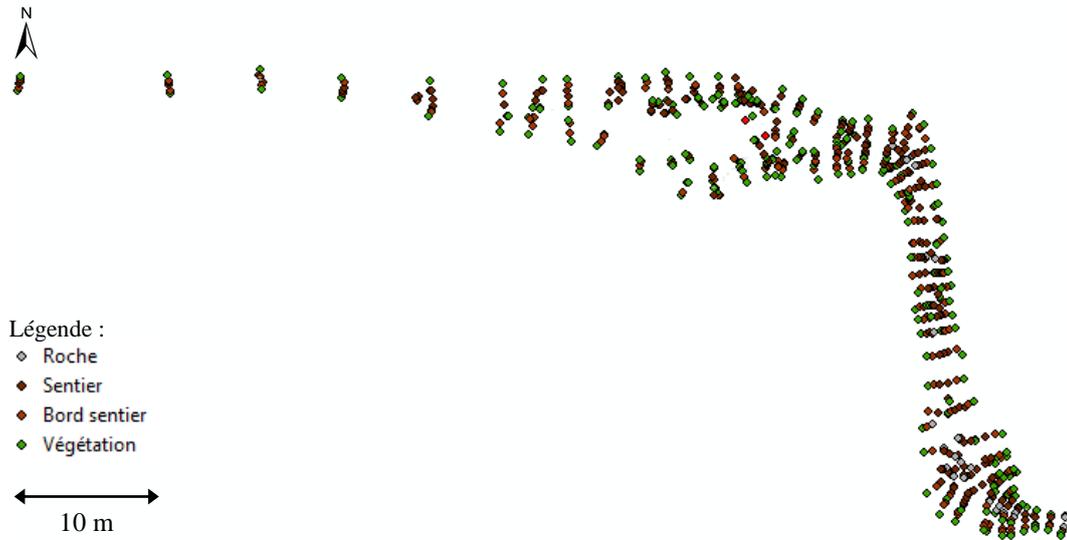


Fig. 45. Ensemble de points d'un relevé topographique effectué sur le sentier du col d'Enfer (12.10.10).

#### 4.1.3. Mesures manuelles

Le sentier sud-est du Puy de Côme étant principalement sous un couvert végétal dense, l'utilisation d'un appareil de mesure ayant besoin d'une liaison satellite tel qu'un GPS ou GPS différentiel n'est pas envisageable. De même, l'utilisation d'appareils de mesure à visée directe, tels qu'une station totale ou un scanner laser, demande une logistique beaucoup trop lourde à mettre en place, ainsi qu'un temps de traitement trop important. De même qu'un relevé par scanner laser engendrerait des lacunes trop importantes en raison des masques causés par la végétation environnant le sentier. Il a donc fallu adopter une méthode à relevé manuel pour obtenir des données fiables et de bonnes qualités.

La méthode de relevés manuels sur le Puy de Côme a été mise en place par Vaisse (2006). Afin de pouvoir intégrer à notre étude les relevés antérieurs à notre étude, nous avons décidé d'utiliser la même méthode, le but étant d'effectuer une étude à plus long terme (2006-2011).

Les relevés topographiques manuels ont été effectués à l'aide de décimètres et d'une perche (Fig. 46) sur des transects définis dès le début de l'étude sur le Puy de Côme. Vingt transects ont été définis tout au long du sentier (Fig. 47). Ces transects sont matérialisés par des piquets repères de chaque côté du sentier, mis en place lors des premières mesures. Ces piquets sont reliés par un décimètre, le tout représentant

des transects perpendiculaires à l'axe principal du sentier. Une perche graduée est ensuite utilisée pour mesurer l'évolution relative des variations de l'altitude du sentier au niveau de chaque transect. Des couples de données (distance à la rive droite (X) et profondeur du sentier (Z)) sont ainsi mesurés. Nous avons choisi comme niveau de référence pour nos mesures la surface située au sol au niveau des piquets délimitant les transects.

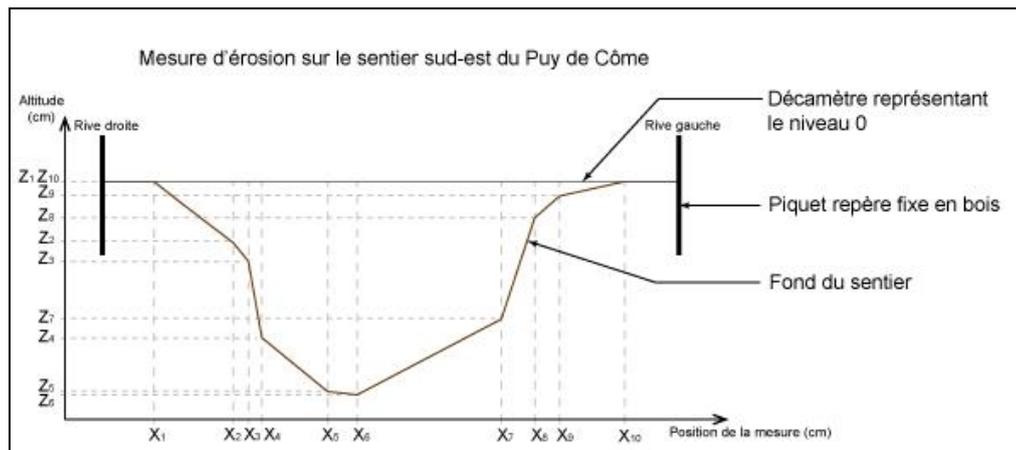


Fig. 46. Méthode manuelle de suivi de l'érosion par transect sur les sentiers.

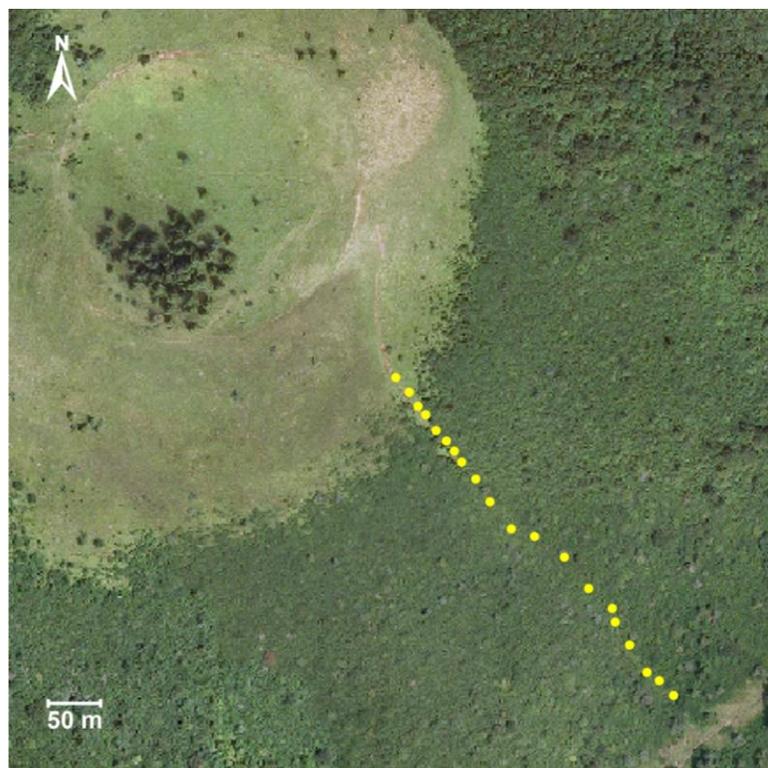


Fig. 47. Position des transects sur le sentier du Puy de Côme.

Les premières campagnes de données ont été effectuées en avril 2006 puis octobre 2007 (Vaisse, 2006). Les données suivantes ont été collectées au cours de cette étude, avant et après l'hiver, entre l'automne 2009 et avril 2011. Au total six campagnes de relevés ont été effectuées entre 2006 et 2011.

## **4.2. Données complémentaires**

### **4.2.1. Collecte de données climatiques**

Une station météo Campbell Scientific a été installée sur le Petit Puy de Dôme fin avril 2011 (Fig. 48). La station météo a été programmée pour enregistrer des données toutes les dix minutes. Puis ces données sont moyennées et transmises sous la forme de données horaires et journalières suivantes à partir des enregistrements :

- Précipitations : un pluviomètre à auget basculant enregistre les cumuls horaires et journaliers.
- Température de l'air : la sonde thermométrique recueille, sous abri, les températures maximales et minimales ainsi que les horaires de ces températures mesurées, et les températures moyennes horaires et journalières.
- Humidité de l'air : la sonde d'humidité relève, sous abri, les pourcentages d'humidité maximums et minimums avec les horaires correspondants aux mesures, et les taux d'humidité moyens horaires et journaliers.
- Énergie solaire : le pyranomètre enregistre l'énergie solaire ( $W/m^2$ ) maximum et minimum avec les heures de relevés correspondantes, sur la journée, ainsi que l'énergie solaire moyenne horaire et journalière, et les cumuls journaliers et horaires (en  $kJ/m^2$ ).
- Vitesse du vent : l'anémomètre à hélice mesure la vitesse maximale du vent sur la journée et l'heure associée, et les moyennes horaires et journalières.
- Direction du vent : la girouette relève les moyennes horaires et journalières des directions du vent.
- Hauteur de neige : le capteur à ultrasons mesure les distances maximums et minimums (et horaires associées), les moyennes horaires et journalières entre le capteur et le sol puis la station calcule les hauteurs de neige de chaque type.

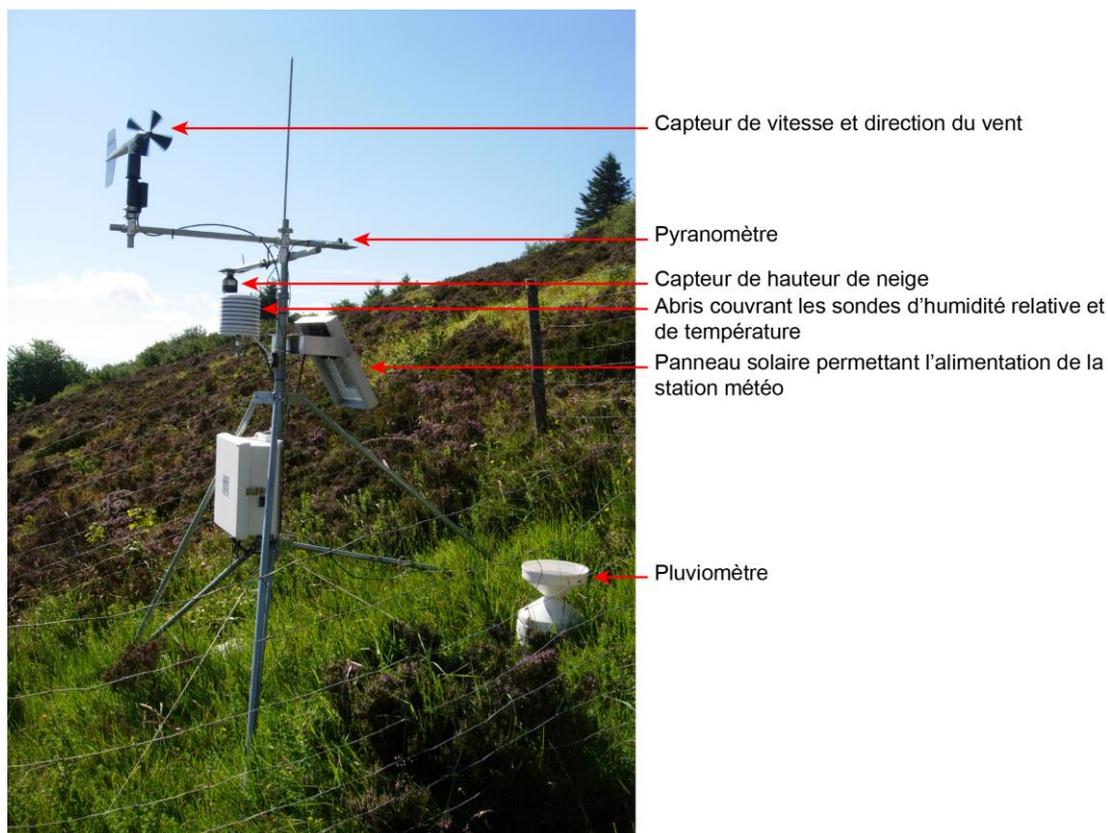


Fig. 48. Station météo installée près du haut de la ravine du petit Puy de Dôme.

En complément des données de la station météo, nous avons pu obtenir les données de la station de Météo France (n°63263006), située sur le Puy de Dôme depuis 2004. L'obtention de données climatiques sur les secteurs du Massif du Sancy est plus délicate, les stations de Météo France sont proches des villes, dans les vallées, et les données reflètent peu le climat des crêtes du Sancy.

#### **4.2.2. Fréquentation touristique et occupation du sentier par les randonneurs**

Bien que la Chaîne des Puys soit très fréquentée, notamment dans sa partie centrale, les deux secteurs d'étude ne sont pas autorisés à la randonnée. Malgré le constat que cette interdiction de randonnée n'est pas toujours respectée, cependant, le nombre de randonneurs empruntant ces sentiers est négligeable. En revanche, l'utilisation du Petit Puy de Dôme comme partie de l'estive d'Orcines entraîne parfois la divagation du troupeau sur la ravine même, ou du moins sur sa partie haute, ce qui provoque des dégradations du sol et des bords du sentier (Fig. 49).

Cette estive se compose d'un cheptel ovin d'environ 1850 animaux sur une surface de 630 ha, pour une utilisation de mi-mai à mi-octobre (Lefeuvre, 2013).

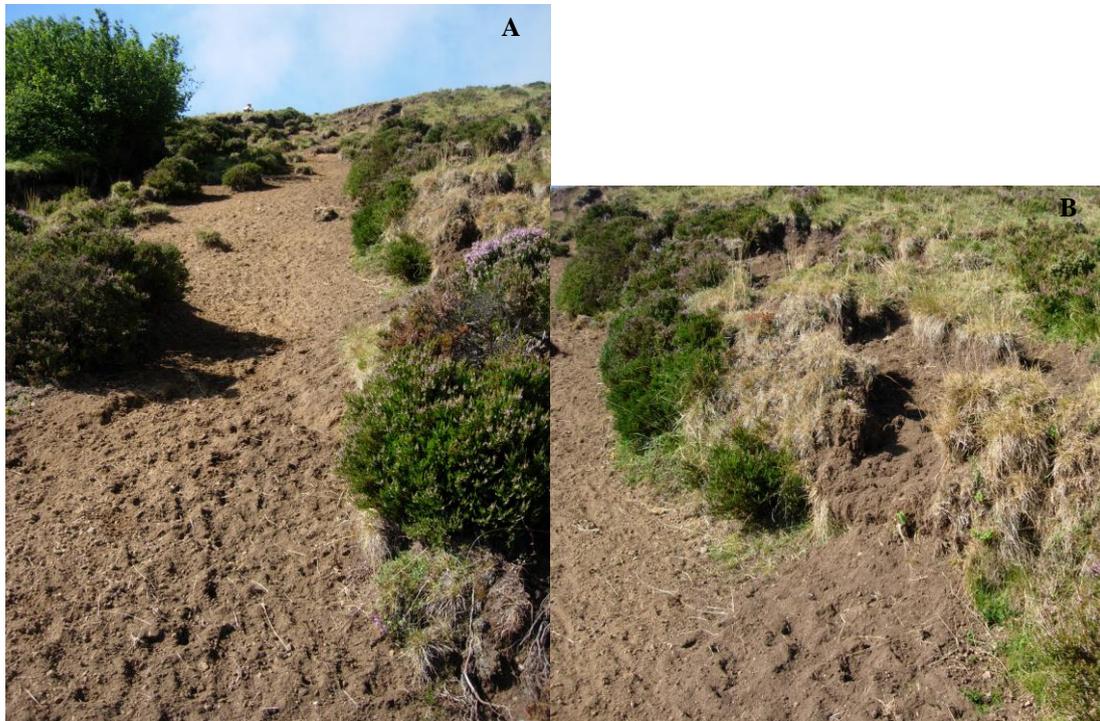


Fig. 49. Indices du passage du troupeau ovin. A. Piétinement sur la partie haute de la ravine. B. Bord de la ravine éboulé.

Pour estimer l'importance de la fréquentation touristique sur le Massif du Sancy, nous disposons de l'étude de Julie Bussière (2009), qui a effectué, avec son équipe, des comptages sur différents secteurs, dont le col de la Cabane, en sortie de notre secteur d'étude descendant du sommet du Sancy, et le Pas de l'Âne, qui inclue le Col d'Enfer. Ces comptages ont été réalisés à différentes tranches horaires de la journée en semaine et en week-end (10h-12h, 12h-14h, 14h-16h), sous différentes conditions météorologiques (nuageux/pluvieux, ensoleillé, orageux) et à différentes périodes de la saison estivale (juin, juillet, août).

Afin de comprendre le comportement des randonneurs face à un sentier très érodé et constitué de plusieurs sentes, nous avons réalisé une étude sur l'occupation du sentier et de ses abords. Pour ce faire, nous avons filmé des randonneurs arpentant le secteur du Col d'Enfer. La caméra était placée sur le puy Redon afin d'avoir une visibilité de l'ensemble du secteur d'étude en contrebas (Fig. 50). Cette position permettait également de ne pas être trop visible par les randonneurs et donc de ne pas

influencer leur comportement. Des vidéos de courte durée (15 min maximum) ont enregistré des randonneurs isolés ou en groupe (jusqu'à 30 personnes) empruntant le secteur du col d'Enfer en direction du Puy de Sancy ou de la Tour Carrée (Fig. 51). Au total, huit heures de vidéo ont été réalisées sur 5 journées entre le 20 juillet et le 20 août 2010. Nous avons ainsi suivi le trajet de 690 randonneurs. Parmi ce panel de randonneurs, nous avons distingué ceux qui empruntent le sentier pour monter vers le sommet du Sancy (332 personnes) de ceux qui descendent vers le Col de Courre (368 randonneurs). Au cours de notre étude, des aménagements légers de type fils guide, consolidation de bords de sentier, rigoles d'évacuation de l'eau ou encore panneaux d'informations ont été mis en place. Ainsi les randonneurs arpentant le sentier avant la mise en place des aménagements (358 personnes dont 171 montants et 161 descendants) et après la mise en place des aménagements (358 personnes dont 151 montants et 207 descendants) ont également été discriminés.

Afin de retracer le trajet des randonneurs sur les différentes sentes et sur la végétation, nous avons sectorisé le sentier (Fig. 52). Cette sectorisation a été effectuée en fonction des choix de bifurcation possible sur et à proximité du sentier. Puis, à partir des vidéo, nous avons suivi un à un tous les randonneurs afin de repérer les secteurs qu'ils traversent, dans le but de relever les cheminements préférentiels et d'évaluer la propension des randonneurs à emprunter un secteur particulier ou à marcher sur la végétation.

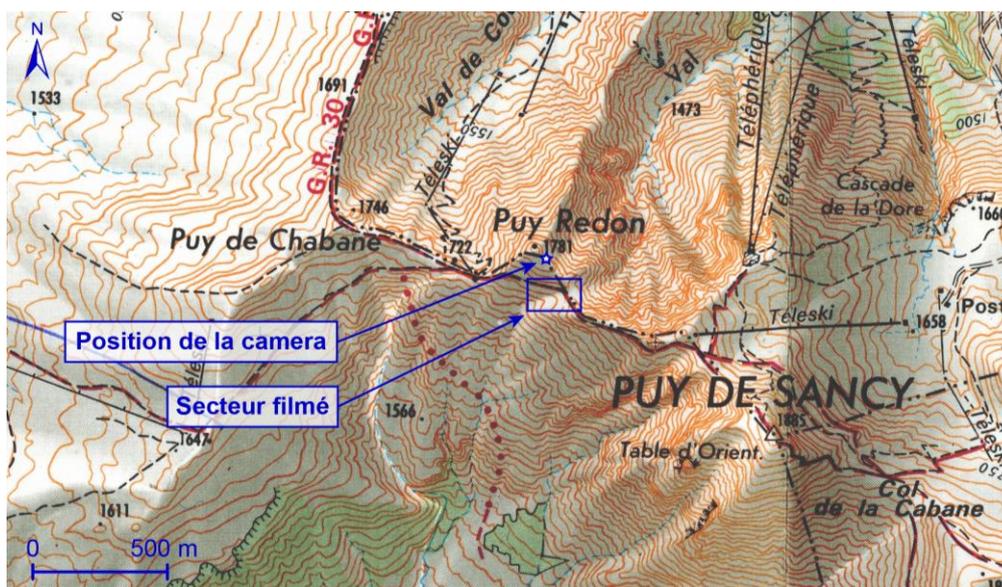


Fig. 50. Position de la caméra par rapport au secteur d'étude.



Fig. 51. Image extraite d'une des vidéos filmant le passage des randonneurs (encerclés en rouge).

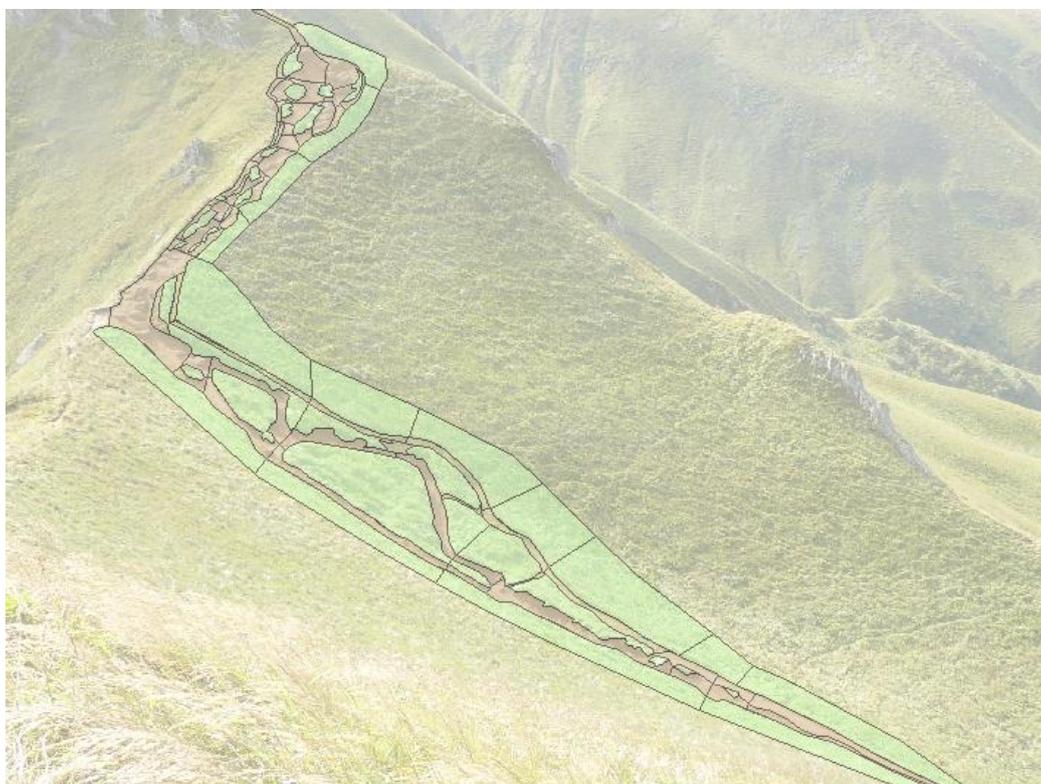


Fig. 52. Sectorisation du sentier.

## Conclusion

Les secteurs d'étude sélectionnés pour réaliser notre étude sur l'érosion des sentiers de randonnées sont répartis dans le Massif du Sancy (le secteur du Col d'Enfer et le sentier entre le sommet du Sancy et le Col de la Cabane) et dans la Chaîne des Puys (la ravine du Petit Puy de Dôme et le sentier sud-est du Puy de Côme). Pour chacun de ces sites, nous avons choisi la méthode de suivi d'érosion la plus adaptée à nos objectifs en fonction des paramètres propres aux terrains (dimension et géométrie, couverture végétale, fréquentation touristique...) (Tableau 4). Une étude climatique et une étude sur le comportement des randonneurs viennent compléter l'étude topographique de certains de nos secteurs afin de comprendre les différentes formes d'érosion cartographiées. Le tableau synthétique suivant répertorie les différentes méthodes utilisées ainsi que les différents paramètres de chacun de nos secteurs d'étude.



Sites d'étude	Type de sentier	Dimensions (m)			Exposition	Végétation	Dispositifs de lutte contre l'érosion		Méthodes de suivi	Dates des relevés topographiques	Études complémentaires
		Longueur	Largeur	Profondeur							
<b>Sentier est du Sancy</b>	Sentier très fréquenté	380	2 à 15	0,2 à 0,5	Sud-est	Subalpine avec des pelouses à <i>Festuca</i> , des formations herbeuses à <i>Nardus</i> , des landes à <i>Calluna</i> et <i>Genista</i> et des landes à <i>Empetrum</i> et <i>Vaccinium</i>	<p><u>Sur le sentier</u> : murets en pierre sur le bord du sentier pour canaliser les randonneurs, panneaux d'informations / interdictions, mise en place de rigoles en bois en travers du sentier pour l'évacuation de l'eau</p> <p><u>Ravine adjacente</u> : murets en pierre au fond de la ravine sur le versant nord à la base de la pyramide du Sancy</p>	Lasergrammétrie (3D)	1. 24 juin 2010 2. 6 octobre 2010 (non utilisé) 3. 28 juin 2011 4. 26 septembre 2011		
<b>Col d'Enfer</b>	Sentier très fréquenté, très érodé sur sa majeure partie et multi-sentes sur sa partie basse	200	0,8 à 13,3	0,2 à 0,95	Sud-ouest	Pelouses subalpine à <i>Festuca</i> ou <i>Nardus</i> , et localement des landes à <i>Calluna</i> et <i>Genista</i>	panneaux d'informations, fils guide, poteaux en bois pour retenir le bord du sentier (ponctuel), creusement de rigoles d'évacuation de l'eau en travers du sentier et à intervalle régulier sur la partie rectiligne du sentier, ces rigoles sont associées à un alignement de poteaux en bois	GPS différentiel (3D)	1. 20 mai 2010 2. 12 octobre 2010 3. 6 mai 2011 4. 4 novembre 2011	Étude du comportement des randonneurs sur le sentier (été 2010)	
<b>Ravine du Petit Puy de Dôme</b>	Ravine, accès interdit depuis 2004	280	0,2 à 14	0,1 à 2	Nord	Landes à genêts ponctués d'arbustes. Présence de fourrés de noisetier sur le côté ouest du cône de déjection.	Mise en place de fascines en bois au cours de l'été 2010, une entre la ravine et le cône de déjection et une autre 2 m en amont sur le côté ouest de la ravine	GPS différentiel (3D)	1. 25 avril 2007 2. 16 octobre 2007 3. 10 avril 2008 4. 13 novembre 2009 5. 29 avril 2010 6. 5 novembre 2010 7. 26 avril 2011 8. 13 mai 2011 9. 12 juillet 2011 (non utilisé) 10. 15 juillet 2011 11. 4 août 2011 12. 2 septembre 2011 13. 24 octobre 2011 14. 30 mai 2012	Étude climatique	
<b>Sentier sud-est du Puy de Côme</b>	Sentier fortement raviné, interdit à la randonnée depuis 2002	380	2 à 14	0,4 à 2	Sud-est	Sentier sous couvert de fourrés de noisetiers					Relevé manuel (2D)

Tableau 4. Tableau synthétique des études et méthodes employées sur chaque terrain.



# Partie 3 : Résultats



# Introduction

Un suivi topographique a été réalisé sur les quatre secteurs d'étude définis, les deux sentiers situés dans la Chaîne des Puys ayant également bénéficié d'une étude climatique. Cette dernière a été réalisée à partir des données de la station appartenant à Météo France (code INSEE n°63263006) située à proximité du sommet du Puy de Dôme et d'une station météo temporaire que nous avons installé près de la partie haute de la ravine du Petit Puy de Dôme. Nous n'avons pas réalisé d'étude climatique précise dans le Massif du Sancy en raison des importantes différences de conditions climatiques entre les positions des stations de Météo France et celles des secteurs étudiés. En revanche, ces secteurs étant soumis à une forte fréquentation touristique, nous avons pris en compte la composante anthropique dans l'érosion de ces sentiers, contrairement aux sentiers choisis dans la Chaîne des Puys qui sont officiellement interdits à la randonnée.

Les résultats de nos différentes investigations sont présentés par secteur d'étude. Le premier chapitre de cette partie présente les études topographiques du secteur du Col d'Enfer et sentier sud-est du Sancy (entre le sommet du Sancy et le Col de la Cabane), ainsi qu'une étude complémentaire consacrée au comportement des randonneurs face à un sentier fortement endommagé à sentes multiples. Le second chapitre est consacré à la Chaîne de Puys avec les études topographiques des sites du Petit Puy de Dôme et du Puy de Côme et l'étude climatique rassemblant les données des stations météo.



## **Chapitre 5 : Les sentiers du Massif du Sancy : présentation des résultats**

Dans le Massif du Sancy, deux secteurs d'étude ont été étudiés : le secteur situé entre le sommet du Sancy et le Col de la Cabane et la portion de sentier localisé au niveau du Col d'Enfer. Ces deux secteurs comptent parmi les plus fréquentés du massif avec respectivement 21,8 % de randonneurs empruntant le premier sentier et 19,5 % sur le second (Bussière, 2009).

Dans un premier temps, nous présenterons les résultats topographiques du sentier est du Sancy étudié par lasergrammétrie terrestre sur une période de 15 mois, ainsi que le secteur du Col d'Enfer suivi au GPS différentiel sur 18 mois. Enfin, nous analyserons l'utilisation du sentier du Col d'Enfer par les randonneurs et la pratique du hors sentier sur ce secteur.

### **5.1. Suivis topographiques**

#### **5.1.1. Sentier sud-est du Sancy**

Les résultats du suivi topographique effectué par lasergrammétrie terrestre sur le secteur entre le sommet du Sancy et le Col de la Cabane sont présentés de la façon suivante : une comparaison MNT avec un intervalle d'un an entre juin 2010 et juin 2011, une comparaison sur un intervalle de 3 mois, soit un été (entre juin et septembre 2011), et enfin une comparaison entre le premier et le dernier relevé topographique (entre juin 2010 et septembre 2011). Les figures suivantes montrent l'ensemble du terrain d'étude (Fig. 53) puis des zooms au niveau des secteurs où des scans plus précis ont été effectués (Fig. 54, à Fig. 57). La dernière figure (Fig. 57) ne présente que la comparaison entre le premier et le dernier relevé puisque le relevé intermédiaire avec une précision plus grande n'a pu être relevé pour les raisons expliquées dans la partie consacrée à la méthodologie.

L'ensemble des comparaisons traduisent une activité plus importante entre les deux premiers relevés, soit entre juin 2010 et juin 2011, qu'au cours de l'été 2011. Ceci est également mis en évidence par les histogrammes de valeurs (Fig. 53). Les relevés de l'ensemble du terrain (Fig. 53) ne sont pas suffisamment précis, surtout dans la partie haute, pour fournir des résultats de bonne qualité concernant les zones d'érosion et d'accumulation sur le sentier. Cependant, ces relevés ont été très utiles pour comparer les secteurs étudiés plus en détail (Fig. 54 à Fig. 57).

La partie haute du Sancy montre une zone dépourvue de végétation qui recoupe un des lacets que dessine le sentier (Fig. 54). La partie droite des comparaisons révèle une multitude de petites zones d'érosion. Derrière ce secteur, il y a une bande d'accumulation, orientée en direction du bas de la pyramide du Sancy. À gauche de cette bande se trouve un agrégat de « tâches » bleues suggérant des petites zones d'érosion, mais en réalité ce secteur correspond à un îlot de végétation ; c'est donc l'évolution de la végétation qui est enregistrée, et non l'érosion du sol. Au-dessus de cet îlot, on retrouve une alternance de petites zones de dépôt et d'érosion. Les calculs de bilan sédimentaire effectués (Tableau 5) font abstraction de cet îlot de végétation (Fig. 54, délimitation en noire de la zone concernée). Les valeurs de dépôt semblent être surestimées : 8,98 m<sup>3</sup> sur l'ensemble de la période étudiée et sur la totalité du secteur délimité (Fig. 54). Sur ce secteur, le taux d'érosion par mètre carré sur l'ensemble de la période de relevé montre un dépôt moyen de 10 cm/an (Tableau 5). Il faut noter que le bord du sentier, au-dessus de cette zone, est délimité par un muret de pierres empilées dont l'effondrement partiel pourrait venir alimenter ce secteur. Ici, l'essentiel du dépôt et de l'érosion se fait par mouvement gravitationnel de bloc rocheux.

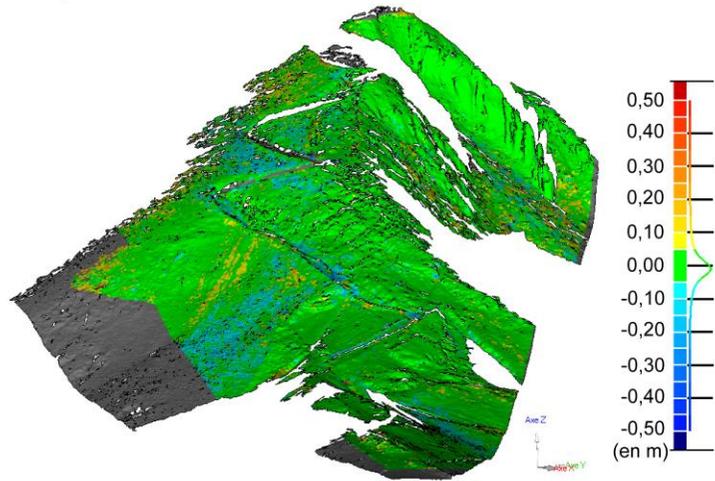
La petite ravine, dont la tête jouxte le sentier au niveau de la base de la pyramide du Sancy, a été étudiée plus en détail (Fig. 55). Les gardes nature du PNRVA ont mis en place des murets de pierres empilées (Fig. 55, visible sur la photo de droite). Ces murets sont positionnés à intervalle régulier dans le fond de cette ravine afin de limiter son incision. Les comparaisons entre les différents MNT réalisés montrent une érosion localisée sur les parois latérales de cette ravine (1,22 m<sup>3</sup> sur l'ensemble de la période de relevé). Outre l'érosion des parties proches du fond de la ravine, une rigole se dessine sur la paroi de droite et semble se prolonger au-delà du secteur délimité. Cette rigole à elle seule représente plus d'un

tiers de l'érosion de ce secteur (0,43 m<sup>3</sup> sur 14,25 m<sup>2</sup>, soit 35,25 % de l'érosion du secteur entre juin 2010 et septembre 2011). L'accumulation est concentrée dans le fond de la ravine (1,94 m<sup>3</sup> sur l'ensemble de la période de relevé). Cette accumulation est stockée entre les murets. L'érosion est nettement plus marquée entre les deux premiers relevés (le 24 juin 2010 et le 28 juin 2011). Le bilan sédimentaire de cette petite ravine, rapporté au mètre carré, est faible, surtout si on regarde les valeurs calculées en faisant abstraction de l'imprécision liée aux modèles et à leur comparaison (Tableau 5 et 6).

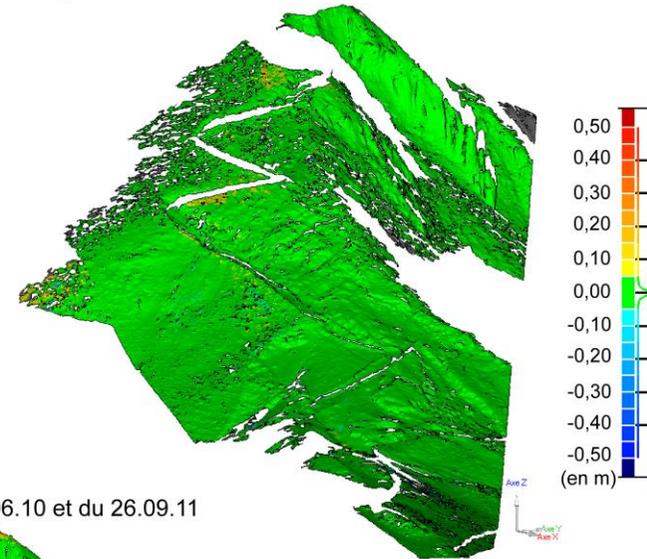
Une légère différence dans la position du scanner, lors des différents relevés du secteur situé au pied sud de la pyramide du Sancy, a provoqué une faible zone de recouvrement. La comparaison n'est donc possible que sur une partie de ce secteur (Fig. 56). Cependant, la comparaison de MNT sur cette zone ravinée, sur le versant sud au niveau de la base de la pyramide du Sancy, nous permet de noter une accumulation dans le fond de la rigole, le long du secteur végétalisé, avec quelques zones d'érosion plus en amont. Cette accumulation est, entre le premier et le dernier relevé, de l'ordre de 10 cm par mètre carré (Tableau 5), sachant qu'entre le troisième et le dernier relevé il n'y a eu que très peu de dépôt ou d'érosion.

La comparaison de la partie supérieure du sentier entre le Col de la Cabane et le sommet du Sancy (secteur 4), entre le 24 juin 2010 et le 26 septembre 2011, montre des déplacements de blocs au sein du sentier (Fig. 57). L'érosion affecte en particulier le centre du sentier et les parties rectilignes du sentier. Bien que sur les parties rectilignes du sentier il y ait des secteurs de dépôt, ces derniers sont très localisés et de faible ampleur. En revanche, l'accumulation la plus importante s'opère au niveau des virages du sentier, d'autant plus quand la partie aval est moins pentue que la partie amont. De plus, un muret en pierre a été mis en place par les gardes nature au niveau du virage que dessine le sentier entre le bas du secteur 1 et le premier virage du secteur 4, pour empêcher les randonneurs de couper les lacets du sentier et descendre dans un secteur difficile et dangereux. À la sortie de cette première courbure du sentier (Fig. 57, partie supérieure de la figure), un dépôt d'un volume de 0,9 m<sup>3</sup> sur une surface de 12 m<sup>2</sup> avec une épaisseur maximale de 29 cm est identifiable. Cette géométrie du sentier ainsi que le muret en pierre semble être propice à l'accumulation de sédiments. Le bilan érosion-accumulation effectué sur le secteur 4 du sentier sud-est du Sancy est quasi nul (Tableau 5).

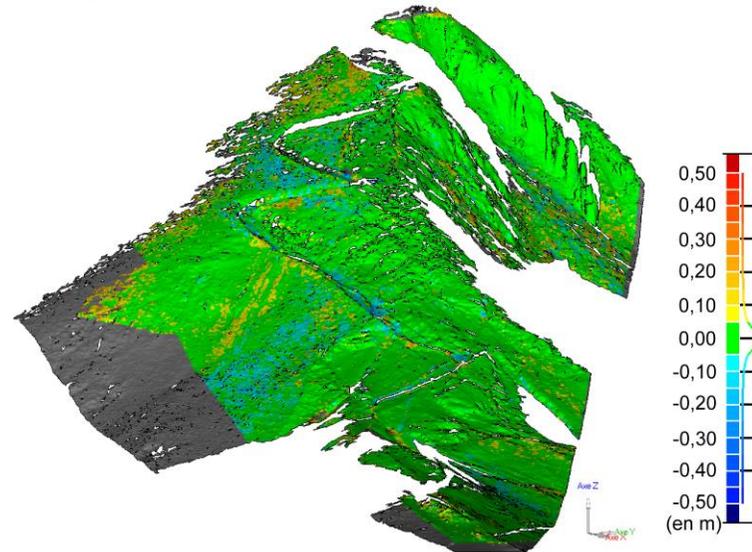
Comparaison entre les relevés du 24.06.10 et du 28.06.11



Comparaison entre les relevés du 28.06.11 et du 26.09.11



Comparaison entre les relevés du 24.06.10 et du 26.09.11



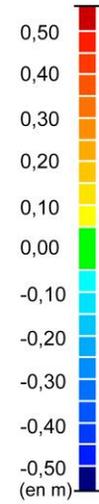
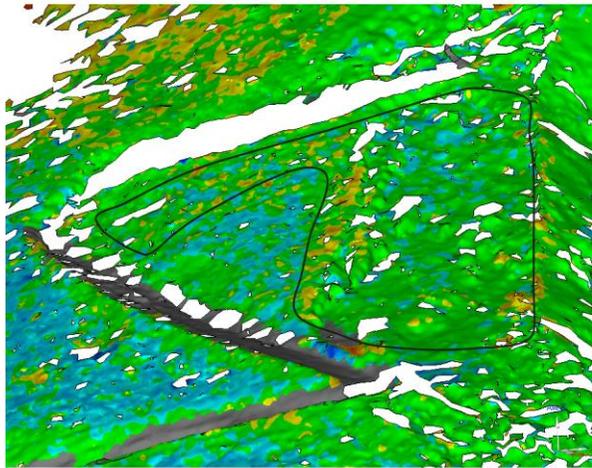
50 m



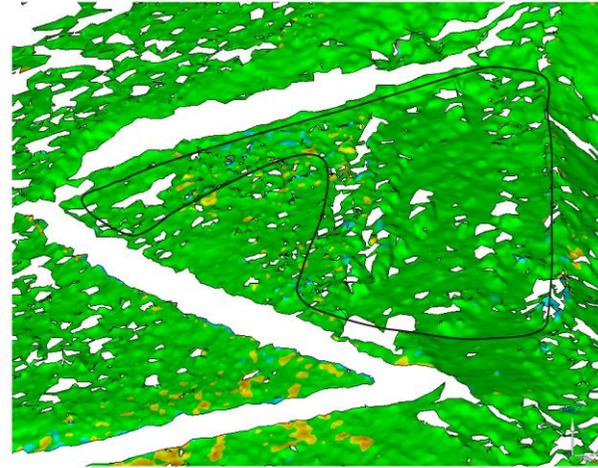
Fig. 53. Comparaisons entre les différents MNT issus des trois relevés effectués sur le terrain.

Les légendes vont de l'accumulation en rouge à l'érosion en bleu et sont associées à un histogramme des valeurs. La photo montre la fenêtre de scan.

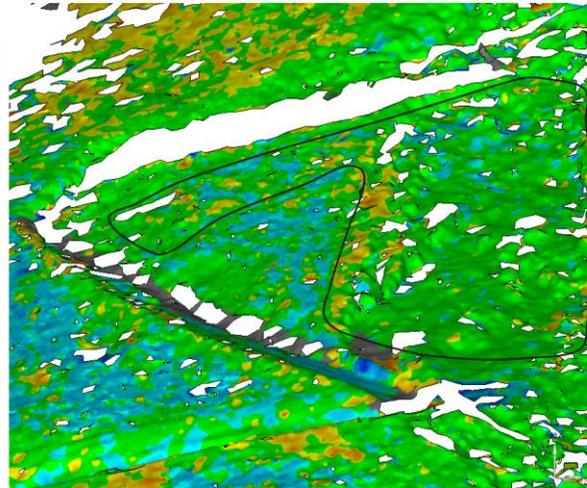
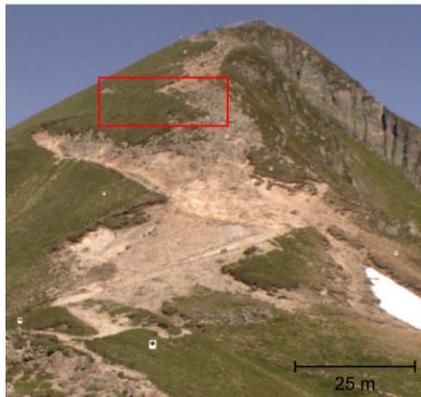
Comparaison entre les relevés du 24.06.10 et du 28.06.11



Comparaison entre les relevés du 28.06.11 et du 26.09.11



Comparaison entre les relevés du 24.06.10 et du 26.09.11



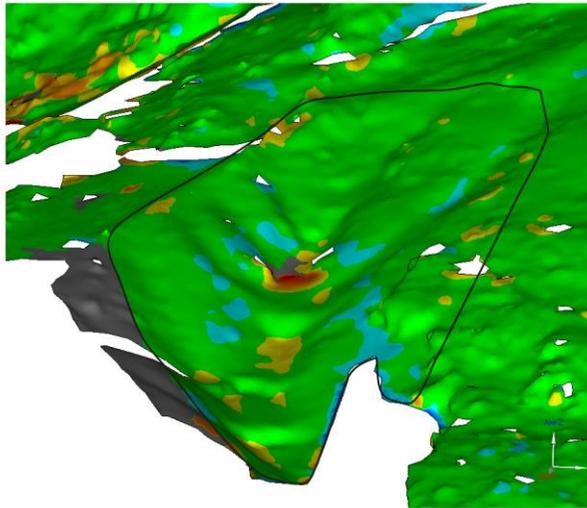
15 m



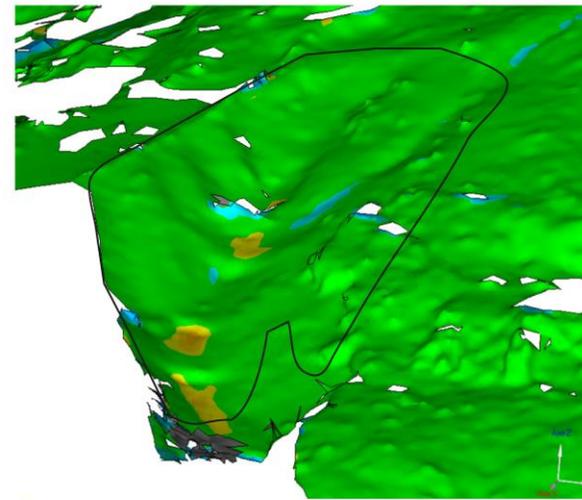
Fig. 54. Zoom sur la partie haute de la pyramide du Sancy (secteur 1).

Ces comparaisons montrent une zone étroite longitudinale, le long de l'îlot de végétation, qui rassemble la majeure partie de d'accumulation et une zone plus large ponctuée d'érosion.

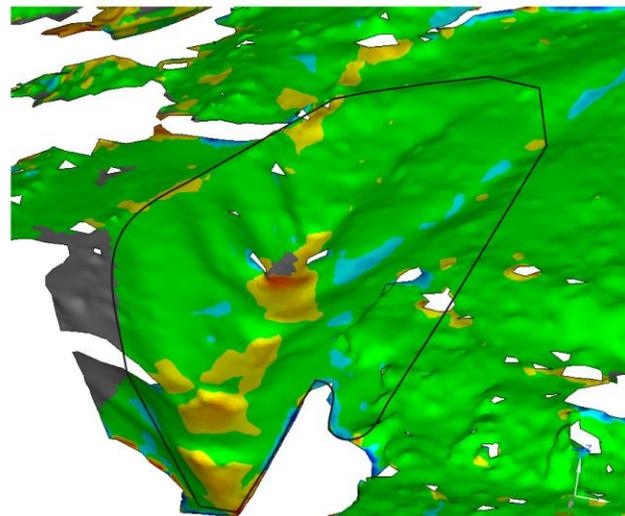
Comparaison entre les relevés du 24.06.10 et du 28.06.11



Comparaison entre les relevés du 28.06.11 et du 26.09.11



Comparaison entre les relevés du 24.06.10 et du 26.09.11



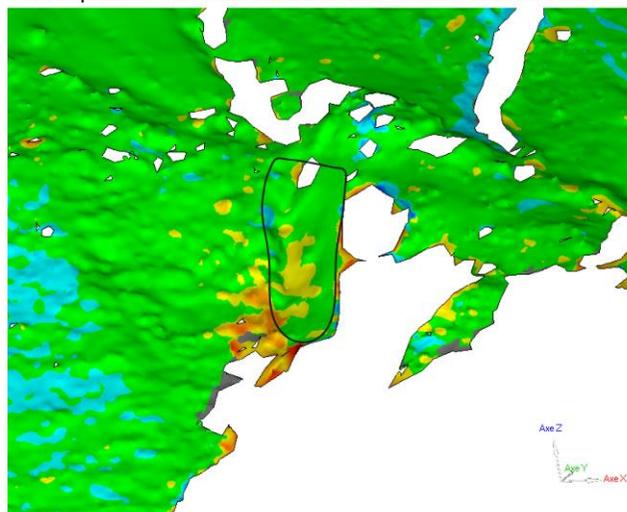
10 m



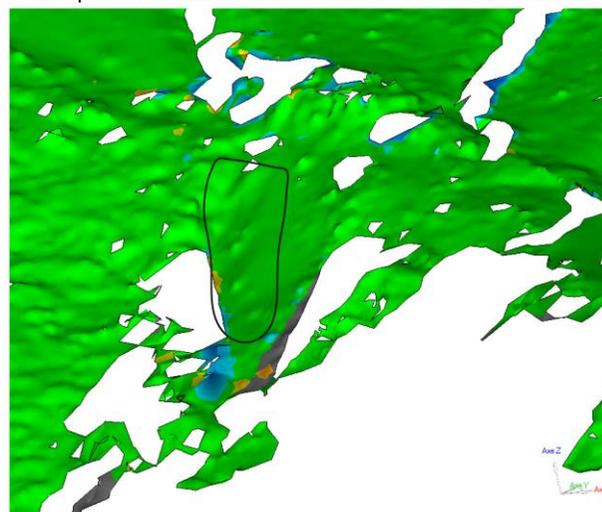
Fig. 55. Zoom sur une des ravines latérales à la base de la pyramide du Sancy (secteur 2).

Des dépôts sont enregistrés au fond de la ravine, derrière les murets en pierre. Les zones d'érosion sont situées sur les versants, notamment au niveau d'une petite rigole sur la droite de la tête de ravine.

Comparaison entre les relevés du 24.06.10 et du 28.06.11



Comparaison entre les relevés du 28.06.11 et du 26.09.11



10 m

Comparaison entre les relevés du 24.06.10 et du 26.09.11

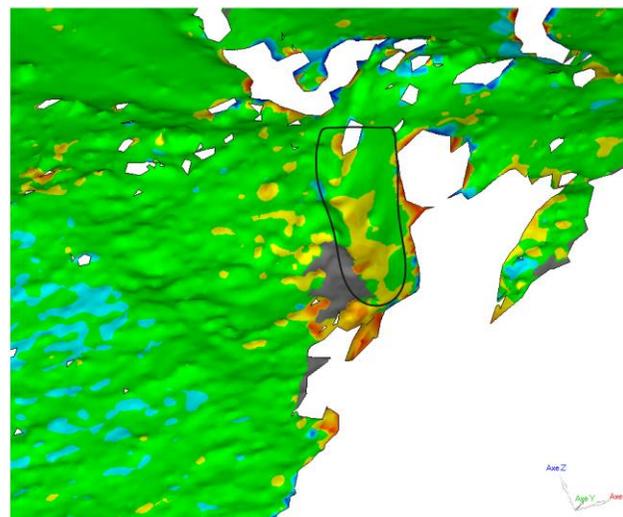


Fig. 56. Zoom sur un secteur situé en contrebas du sentier, au pied de la pyramide du Sancy, versant sud (secteur 3).

Une zone d'accumulation est présente sur la partie basse de ce secteur, près de la végétation.

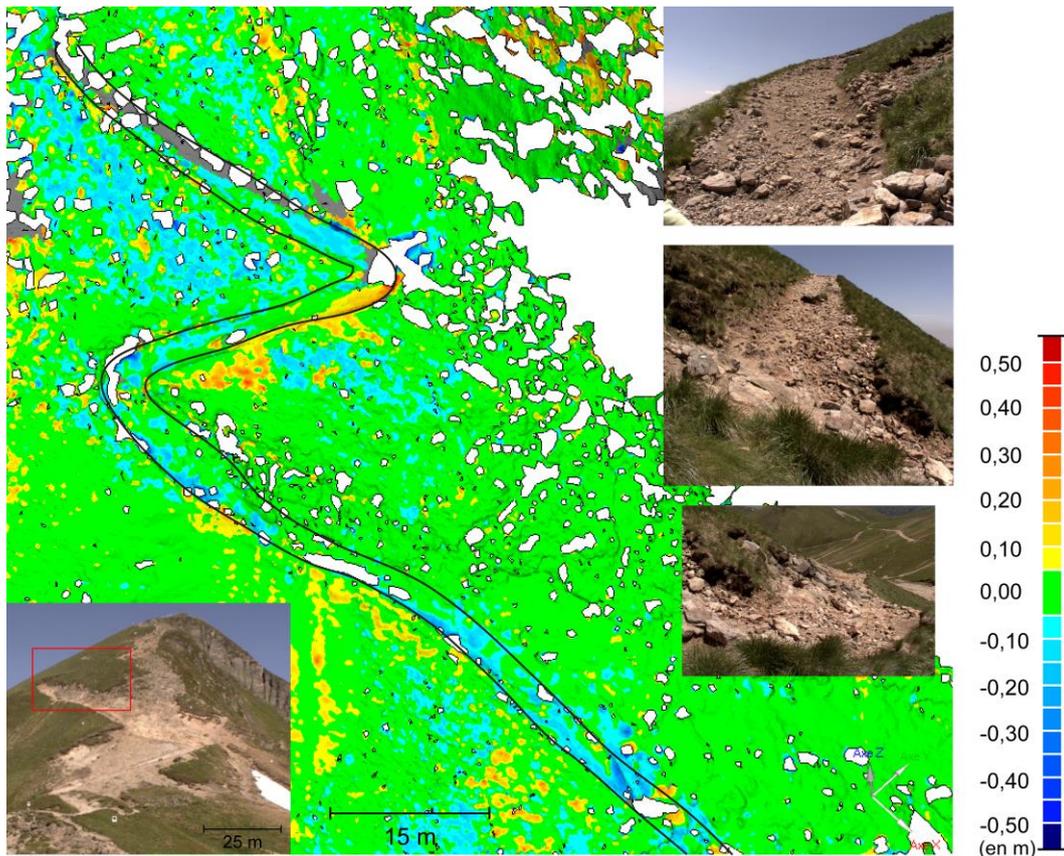


Fig. 57. Partie supérieure du sentier menant au sommet du Sancy (secteur 4).

Les lignes noires délimitent le sentier. Les zones de dépôts sont préférentiellement situées au niveau des virages du sentier et les zones d'érosion sur les parties rectilignes.

		Surface de référence = 0				Surface de référence +/- 0,05 m			
		Dépôt (m³)	Érosion (m³)	Bilan (m³)	Évolution par m² (m)	Dépôt (m³)	Érosion (m³)	Bilan (m³)	Évolution par m² (m)
<b>Secteur 1</b> (464,87 m²)	Scan3-1	24,71	1,84	22,87	0,049	10,79	0,86	9,93	0,021
	Scan4-3	6,47	14,81	-8,34	-0,018	3,01	6,65	-3,64	-0,008
	Scan4-1	19,56	5,03	14,53	0,031	8,98	3,26	5,72	0,012
<b>Secteur 2</b> (261,42 m²)	Scan3-1	2,75	8,54	-5,79	-0,022	1,22	1,72	-0,49	-0,002
	Scan4-3	6,32	1,21	5,10	0,020	0,66	0,43	0,23	0,001
	Scan4-1	4,90	5,36	-0,47	-0,002	1,94	1,22	0,72	0,003
<b>Secteur 3</b> (36,54 m²)	Scan3-1	1,00	1,12	-0,12	-0,003	0,74	0,37	0,37	0,010
	Scan4-3	1,11	0,41	0,70	0,019	0,20	0,28	-0,08	-0,002
	Scan4-1	0,99	0,44	0,55	0,015	0,52	0,13	0,39	0,011
<b>Secteur 4</b> (358,68 m²)	Scan4-1	12,48	12,48	-0,01	0,000	6,10	5,82	0,27	0,001

Tableau 5. Bilan érosion – accumulation effectué à partir des scans des différents secteurs (Fig. 54, Fig. 55, Fig. 56, Fig. 57).

Les Scan3-1, Scan4-3 et Scan4-1 correspondent respectivement aux comparaisons entre le 24 juin 2010 et le 28 juin 2011, le 28 juin et le 26 septembre 2011 et enfin le 24 juin 2010 et le 26 septembre 2011. L'imprécision de nos comparaisons a été estimée à plus ou moins 0,05 m en raison du géoréférencement effectué avec un DGPS. Les volumes sont calculés sur les secteurs délimités sur les figures 57 à 57.

		Dépôt (m <sup>3</sup> /an)	Érosion (m <sup>3</sup> /an)	Bilan (m <sup>3</sup> /an)	Évolution par m <sup>2</sup> (m/an)
<b>Secteur 1</b> (464,87 m <sup>2</sup> )	Scan3-1	10,67	0,85	9,82	0,021
	Scan4-3	12,21	26,97	-14,76	-0,032
	Scan4-1	7,14	2,59	4,55	0,010
<b>Secteur 2</b> (261,42 m <sup>2</sup> )	Scan3-1	1,21	1,70	-0,49	-0,002
	Scan4-3	2,69	1,76	0,93	0,004
	Scan4-1	1,55	0,97	0,57	0,002
<b>Secteur 3</b> (36,54 m <sup>2</sup> )	Scan3-1	0,73	0,37	0,37	0,010
	Scan4-3	0,81	1,14	-0,32	-0,009
	Scan4-1	0,41	0,10	0,31	0,008
<b>Secteur 4</b> (358,68 m <sup>2</sup> )	Scan4-1	4,85	4,63	0,22	0,001

Tableau 6. Taux d'érosion des différents secteurs étudiés et des différentes périodes inter-relevé sur le sentier sud-est du Sancy.

Ces taux d'érosion ont été calculés en prenant en compte la marge d'incertitude (Tableau 5).

## 5.1.2. Le Col d'Enfer

### 5.1.2.1. Évolution du tracé du sentier

Une étude diachronique sur l'évolution du tracé du sentier situé au niveau du col d'Enfer a été réalisée sur les photographies aériennes de 1980, 1999 et 2009 (Fig. 58). Les photos antérieures à 1980 ainsi que celle de 1999 ne sont pas d'assez bonne qualité pour identifier l'emplacement des sentiers. En 1980, Il existait deux sentiers sur le versant sud du Puy Redon. L'un, quasi perpendiculaire à l'actuel sentier, était situé plus haut sur la pente du Puy Redon. L'autre sentier, correspondant plus à l'actuel, était localisé, en partie, plus bas sur la pente du Puy Redon. La courbure du sentier a été recoupée pour laisser place à un sentier plus rectiligne. En revanche, en 1999, il se dessine tel qu'il est visible aujourd'hui, même si la photographie n'a pas la résolution suffisante pour distinguer les différentes sentes qui sont identifiables sur la photographie aérienne de 2009.

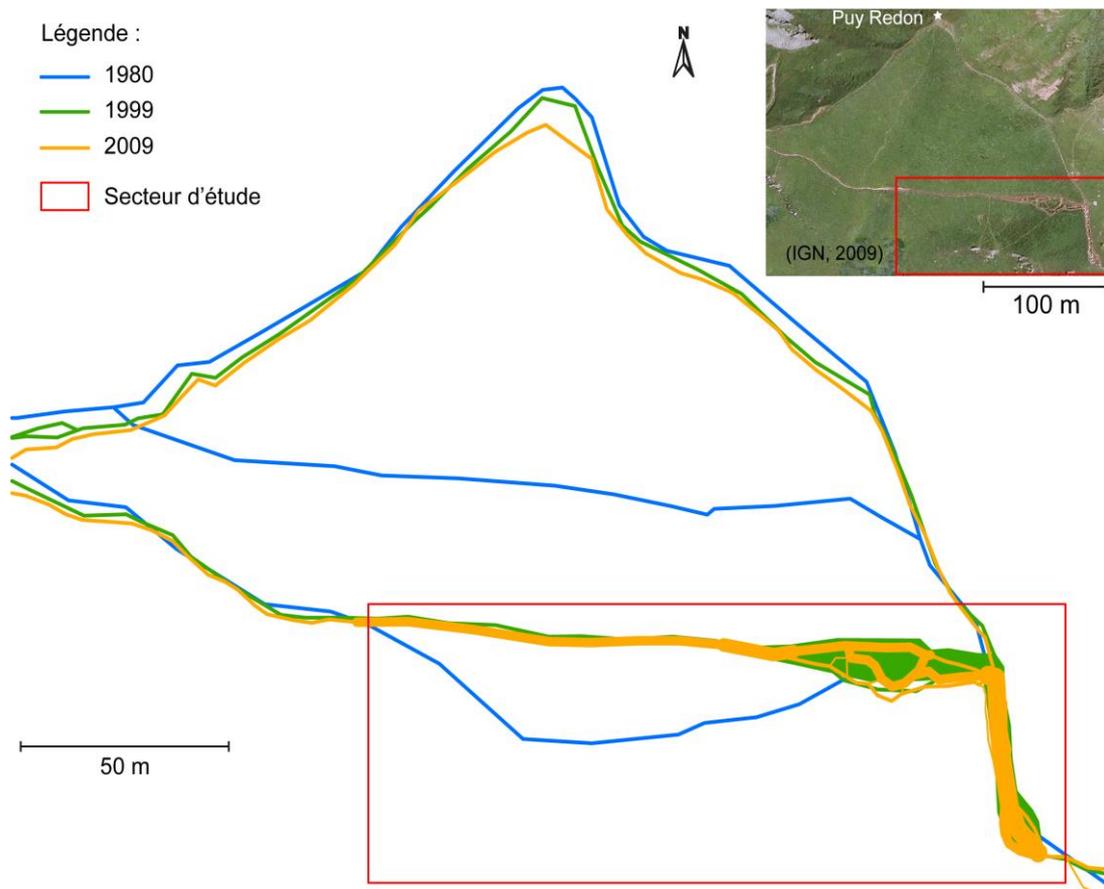


Fig. 58. Évolution du tracé du sentier du Col d'Enfer entre 1980 et 2009 (d'après les photos aériennes de l'IGN).

### 5.2.1.2. Évolution de la superficie et des bords du sentier

Entre mai 2010 et novembre 2011, la superficie du sentier a augmenté de  $44,5 \text{ m}^2$ , soit un taux de progression de la superficie du sentier de  $29,67 \text{ m}^2/\text{an}$ . Cette dernière est passée de  $491,2 \text{ m}^2$  à  $523 \text{ m}^2$  au cours de l'été 2010, soit du taux de  $76,32 \text{ m}^2/\text{an}$ , puis de  $523 \text{ m}^2$  à  $535,7 \text{ m}^2$  pendant l'été 2011, soit un taux de  $25,4 \text{ m}^2/\text{an}$ . En revanche, la superficie du sentier est restée inchangée entre les relevés du 12 octobre 2010 et du 5 mai 2011. Cette augmentation de superficie est essentiellement localisée au niveau des îlots de végétation au centre du sentier ainsi que sur sa partie sud (Fig. 59). Le plus petit îlot de végétation, l'îlot 3, s'est réduit de moitié. Le sentier n'étant pas encaissé autour de cet îlot, les randonneurs marchent dessus comme s'il s'agissait du sentier. La pointe du secteur végétalisé entre le

sentier et la petite sente secondaire s'est réduit de 3 m de longueur entre mai 2010 et novembre 2011 (Fig. 59, encadré A).

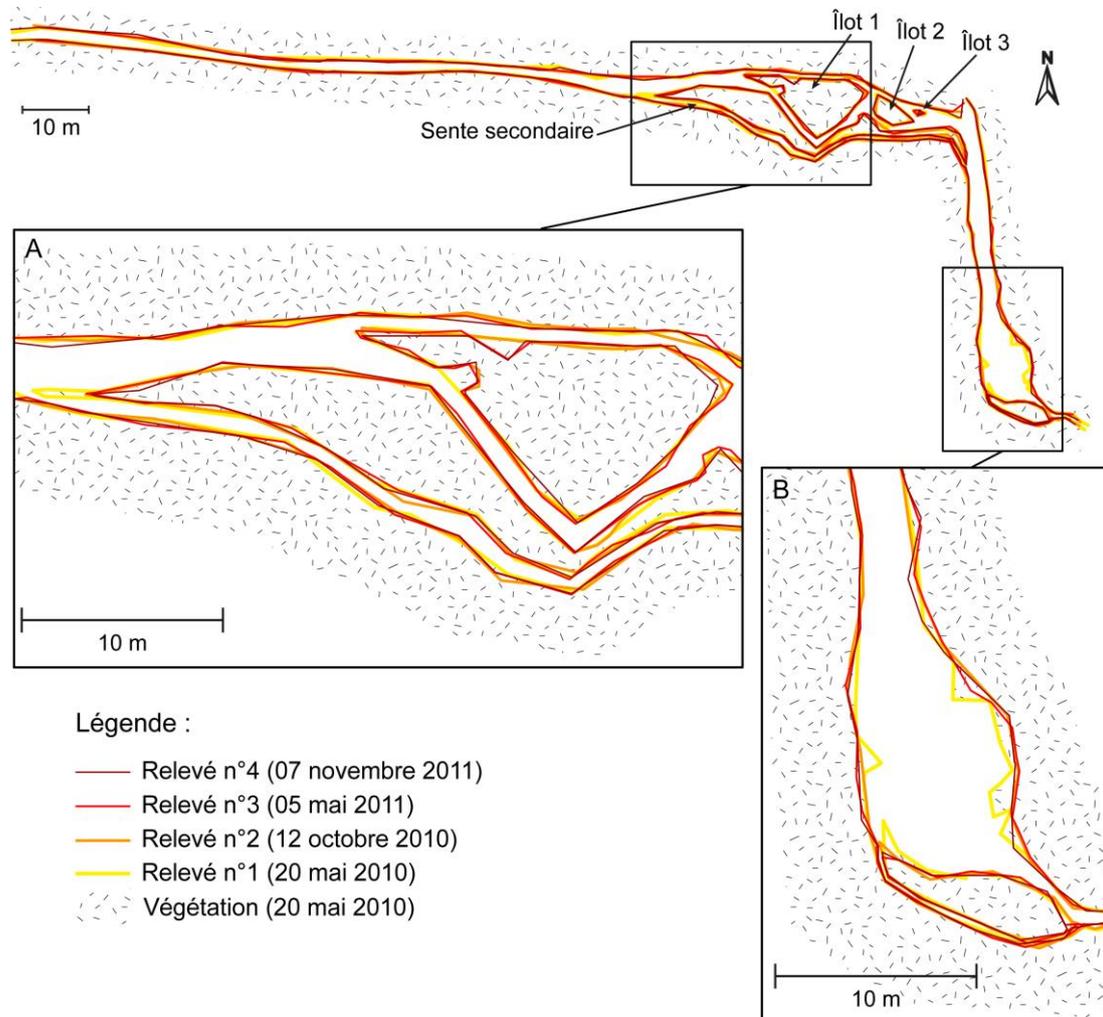


Fig. 59. Évolution des bords du sentier lors des quatre relevés effectués au DGPS.

### 5.1.2.3. Bilan érosion – accumulation

Les points GPS n'ont pas été relevés exactement aux mêmes endroits d'une campagne de terrain à l'autre. Les TIN ainsi produits reflètent mal la complexité de la topographie. Ceci induit un biais dans la comparaison et la quantification des volumes d'érosion – accumulation qui en découle (Tableau 7, Fig. 60). Cependant, le

TIN reste la meilleure façon de créer un modèle topographique avec notre méthodologie de relevé de point GPS. Une interpolation entre nos points pour créer une grille (par la méthode du krigeage par exemple) ne ferait qu'augmenter l'erreur de notre modèle et donc des calculs qui en découlent. De plus, il semblerait que le dernier relevé (celui du 3 novembre 2011) surestime légèrement l'altitude du sentier. Il est cependant difficile de quantifier cette surestimation, et de déterminer si elle est homogène ou non sur l'ensemble du relevé. En revanche, pris séparément, les relevés ne présentent pas de différences notables au niveau de la précision (altimétrique et planimétrique) des points, ainsi que dans leur post-traitement.

Le bilan érosion – accumulation semble montrer une accumulation au cours des deux étés étudiés, et une érosion au cours de l'hiver (Tableau 7). Sur l'ensemble de la période de relevés (du 20 mai 2010 au 3 novembre 2011), on note une augmentation des volumes de dépôts de l'ordre de 27,86 % d'accumulation supplémentaire lors du deuxième été. En revanche, l'érosion diminue de 7,74 % entre les deux étés. Le taux d'érosion moyen rapporté à la surface et calculé sur l'ensemble de la période de relevé montre un dépôt moyen de 3,7 cm/an (Tableau 8). Cependant ce bilan est déséquilibré puisque nos relevés enregistrent deux étés et un hiver. Sur la première année de relevé (1<sup>er</sup> été + 1<sup>er</sup> hiver), ce taux d'érosion moyen est de à 0,9 cm/an sur la surface du sentier (705 m<sup>2</sup>). Le tableau 7 montre une tendance à l'accumulation au cours des deux étés et une tendance à l'érosion pendant l'hiver. Les relevés avant et après l'hiver ont eu lieu le 12 octobre 2010 et le 20 mai 2011, soit une période inter-relevé d'environ 6,5 mois ; notons que pendant l'hiver dans le massif du Sancy, à cette altitude (au-dessus de 1700 m), la couverture neigeuse est permanente de début décembre à mi-mai, soit pendant un période 5,5 mois (Fig. 20). Par conséquent, l'érosion enregistrée entre les relevés du 12 octobre 2010 et du 20 mai 2010 n'a été réellement efficace que sur une période d'environ un mois, entre les relevés topographique et la mise en place de cette couverture neigeuse.

La figure 60 montre une cartographie des zones d'érosion et des zones de dépôt. La partie amont du sentier montre une alternance spatiale de zones d'accumulation-dépôt de faibles ampleurs et qui semblent se succéder dans le temps. Il en est de même sur la partie rectiligne sur l'aval du sentier. La comparaison entre les deux premier TIN (20 mai et 12 octobre 2010) met en évidence une zone de dépôt sur la pointe ouest de la partie végétalisée entre la sente secondaire et le sentier (Fig.

60). Nous avons noté dans le paragraphe précédemment (5.1.2.2.) qu'au cours de la même période, ce secteur avait connu une réduction de sa surface (Fig. 59). La comparaison des TIN correspondant aux relevés topographiques du 5 mai 2011 et du 3 novembre 2011 montre un dépôt important à l'amont de l'îlot de végétation 1 (Fig. 60), remarquons que cet îlot de végétation a vu sa surface se réduire, notamment sur sa partie amont, entre ces même date (Fig. 59).

	Surface de référence = 0 (m <sup>3</sup> )				Surface de référence +/- 0,05 (m <sup>3</sup> )			
	Dépôt	Érosion	Bilan	Évolution par m <sup>2</sup> (m)	Dépôt	Érosion	Bilan	Évolution par m <sup>2</sup> (m)
20/05/10-12/10/10	61,39	40,41	20,98	0,030	43,86	26,35	17,51	0,025
12/10/10-05/05/11	40,96	55,34	-14,38	-0,021	27,01	37,89	-10,88	-0,016
05/05/11-03/11/11	77,98	35,39	42,59	0,060	56,08	24,31	31,77	0,044

Tableau 7. Bilan érosion – accumulation réalisé à partir des TIN (Fig. 60).

	Dépôt (m <sup>3</sup> /an)	Érosion (m <sup>3</sup> /an)	Bilan (m <sup>3</sup> /an)	Évolution par m <sup>2</sup> (m/an)
20/05/10-12/10/10	110,41	66,33	44,08	0,063
12/10/10-20/05/11	48,09	67,46	-19,37	-0,028
20/05/11-03/11/11	112,47	48,75	63,71	0,089
<b>20/05/10-03/11/11</b>	<b>40,65</b>	<b>14,62</b>	<b>26,03</b>	<b>0,037</b>

Tableau 8. Taux d'érosion du sentier du Col d'Enfer, calculés en prenant en compte la marge d'incertitude (d'après le Tableau 7).

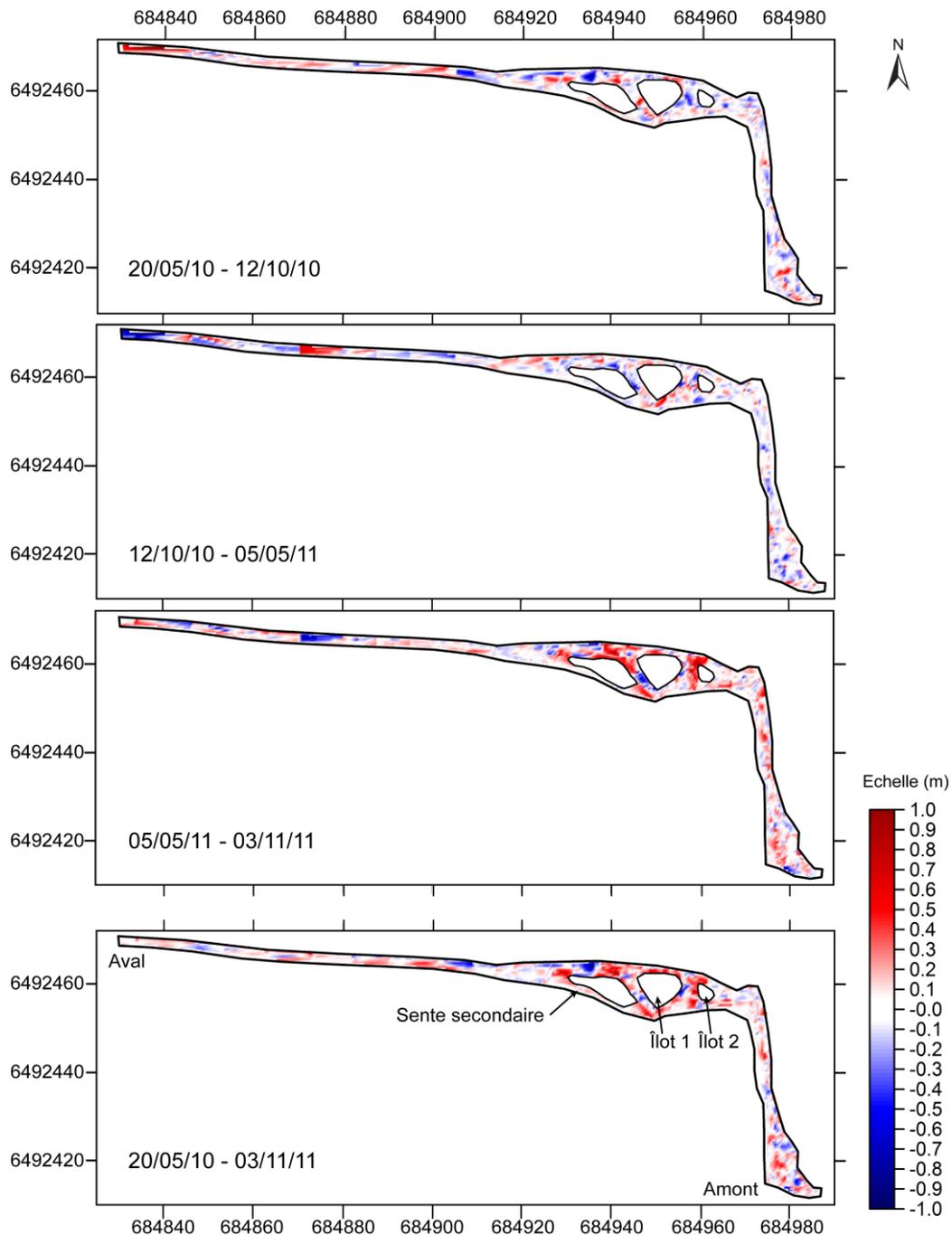


Fig. 60. Comparaisons des TIN effectués à partir des données relevées au GPS Différentiel.

## 5.2. Fréquentation touristique et pratique des sentiers

Afin d'étudier le comportement des randonneurs sur le sentier du Col d'Enfer, des vidéos ont été réalisées en juillet et août 2010. Au cours de nos enregistrements vidéo, trois types d'aménagements ont été mis en place par les gardes nature, début août 2010 (Fig. 61) : (1) un alignement de poteaux en bois a permis de consolider le

bord du sentier ; (2) des panneaux signalant un « passage fermé » ou des panneaux d'informations indiquent aux randonneurs les secteurs à ne pas emprunter ; (3) des fils guides interdisent l'accès à certaines parties de sentiers ou aux îlots de végétation centraux.

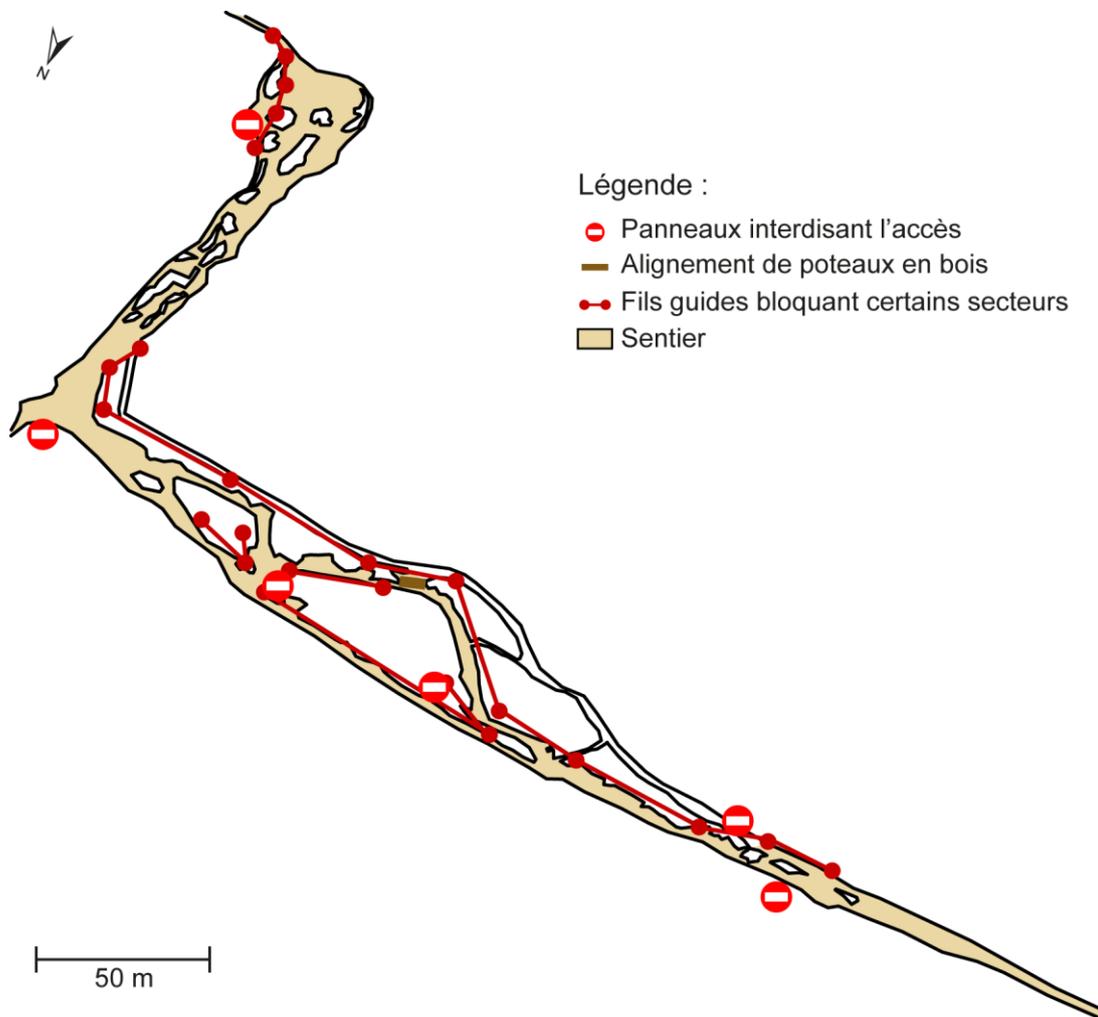


Fig. 61. Aménagements mis en place entre le mois de juillet et le mois d'août 2010.

De manière générale, lorsque plusieurs possibilités s'offrent à eux, les randonneurs ont tendance à emprunter les sentes se situant sur leur droite. Ceci est d'autant plus vrai pour les personnes se dirigeant vers le sommet du Sancy (Fig. 62). Les randonneurs descendant ont un parcours un peu plus diffus, notamment au niveau des îlots de végétation sur la partie centrale du secteur d'étude. Ils ont tendance à passer sur leur droite au niveau du premier gros îlot, puis ils se dispersent de part et d'autre du second.

Sur l'ensemble des randonneurs suivis au cours de cette étude (690 randonneurs au total), près de 14 % pratique le hors-sentier sur au moins une partie du secteur du Col d'Enfer (Tableau 9). Le hors-sentier s'effectue sur les abords extérieurs ou sur les îlots de végétation interne au sentier (Fig. 61). Les randonneurs hors-sentiers sont moitié moins nombreux après la mise en place d'aménagements. Cependant, suivant les catégories de randonneurs et les localisations de hors-sentier (Fig. 62, Tableau 9), la pratique du hors-sentier n'a pas systématiquement diminuée. Les aménagements semblent avoir fait baisser le nombre de personnes empruntant les îlots de végétation au centre du sentier, mais pas ceux marchant sur la végétation bordière du sentier, malgré la mise en place de panneaux d'interdiction (Fig. 62). De la même façon, bien que les randonneurs descendant vers le Col de Courre soient presque sept fois moins nombreux à pratiquer le hors-sentier après la mise en place, ceux montant vers le sommet du Sancy sont un peu plus nombreux qu'avant l'installation des aménagements (Tableau 9).

Catégorie	Nombre de randonneurs hors sentier	Nombre total de randonneurs	Pourcentage de randonneur hors sentier
<b>Tous</b>	<b>94</b>	<b>690</b>	<b>13,62 %</b>
Montant	48	322	14,91 %
Descendant	46	368	12,5 %
<b>Avant aménagement</b>	<b>62</b>	<b>332</b>	<b>18,67 %</b>
Montant	23	171	13,45 %
Descendant	39	161	24,22 %
<b>Après aménagement</b>	<b>32</b>	<b>358</b>	<b>8,94 %</b>
Montant	25	151	16,56 %
Descendant	7	207	3,38 %

Tableau 9. Nombre de randonneurs effectuant du hors sentier.

(Montant = randonneur se dirigeant vers le sommet du Sancy ; Descendant = randonneur marchant en direction du Col de Courre)

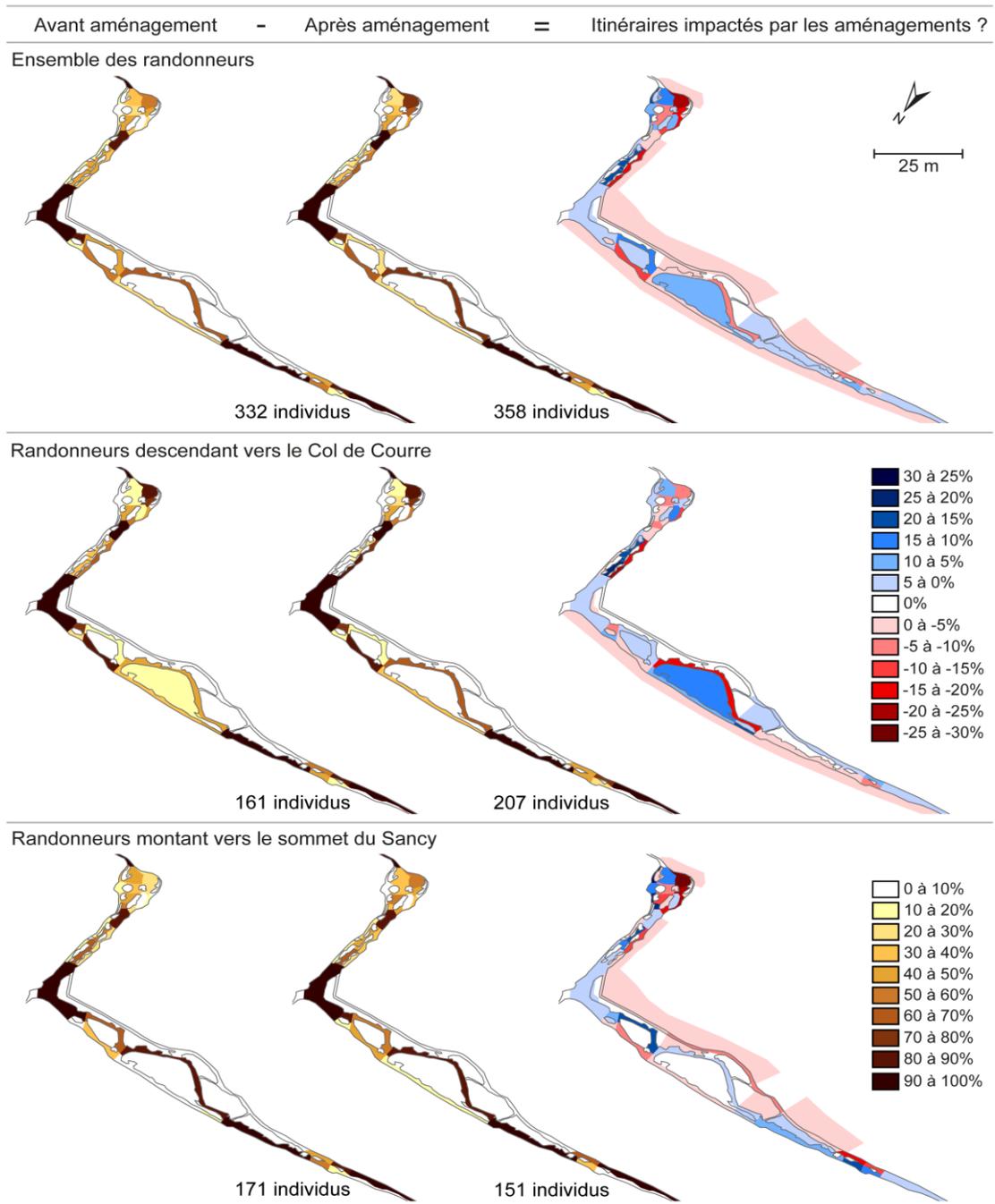


Fig. 62. Utilisation du sentier par les randonneurs en fonction de leur sens de randonnée et de l'aménagement ou non du sentier (Fig. 61).

## Conclusion

Bien que l'évolution des sentiers semble plus importante au cours des saisons estivales que des saisons hivernales, l'été n'est pas pour autant toujours synonyme d'érosion. En effet, l'étude du secteur du Col d'Enfer montre une augmentation de la superficie du sentier pendant les saisons estivales (29,67 m<sup>2</sup>/an), et les comparaisons

de TIN mettent en évidence une tendance à l'accumulation sur le fond du sentier (taux d'érosion : 3,7 cm/an). En contre partie, les relevés enregistrent une érosion du sentier entre nos relevés avant et après l'hiver même si la superficie du sentier n'évolue pas. Une nuance doit être apportée à cette information puisque le massif du Sancy est recouvert d'un manteau neigeux pendant cinq mois et demi au cours de l'hiver. Donc, lors de l'hiver 2010-2011, les relevés topographiques ont enregistré un volume d'érosion d'1,6 cm/m<sup>2</sup> sur une période d'un mois. Cette temporalité de l'érosion-dépôt se retrouve au niveau du secteur 2 du sentier entre sommet du Sancy et Col de la Cabane (Tableau 5 et 6). Les autres secteurs de ce sentier affichent des résultats opposés (érosion estivales, accumulation hivernale). Il faut cependant nuancer cette affirmation car les volumes d'érosion-accumulation mesurés sur les différents secteurs du sentier sud-est du Sancy sont relativement faibles (< 2 cm/an).

Les portions de sentier rectiligne sur une grande distance et relativement pentues, comme la partie basse du secteur du Col d'Enfer, vont favoriser l'action de l'eau et montrer des signes évident de ravinement. Au niveau des sentiers en lacet, le transit sédimentaire suit un rythme différent. Les parties rectilignes sont également affectées par l'érosion mais elles ne sont pas assez longues pour générer un ravinement lors des précipitations. Ainsi, les virages du sentier, qui vont casser le rythme de l'eau, seront des lieux de stockage sédimentaire.

Afin de limiter l'action de l'eau et le développement de ravine à la base de la « pyramide » du Sancy, les gardes nature du parc naturel régional des volcans d'auvergne ont installé, à intervalle régulier, des murets en pierre. Les comparaisons de scan effectuées sur ces secteurs montrent une accumulation en amont des murets en pierre (Fig. 55). En revanche, lorsqu'il n'y a pas de muret en pierre, l'accumulation se fait plus bas dans la ravine et de façon plus aléatoire, sur une surface plus grande (Fig. 56).

L'étude du comportement des randonneurs a révélé que plus de 18 % des randonneurs ont pratiqué le hors-sentier avant la mise en place d'aménagements visant à les canaliser sur le sentier. Suite à l'installation de fils guide et de panneaux d'interdiction, à peine 9 % de randonneurs marchent en dehors des secteurs autorisés. Bien que ce pourcentage ait nettement baissé, certains secteurs restent privilégiés par les randonneurs pratiquant le hors-sentier. Les randonneurs se dirigeant vers le sommet du Sancy ont tendance à couper les virages que dessinent les sentiers.

# **Chapitre 6 : Les sentiers de la Chaîne des Puy : présentation des résultats**

Deux secteurs ont été étudiés dans la Chaîne des Puy : la ravine du Petit Puy de Dôme et le sentier sud-est du Puy de Côme. Ces deux secteurs sont interdits à la randonnée, respectivement depuis 2004 et 2002. Les résultats du suivi topographique effectué sont donc plutôt représentatifs, actuellement, d'une érosion naturelle, même s'il ne faut pas oublier qu'avant la mise en défends de randonnée ces sentiers étaient très fréquentés.

Dans un premier temps, nous présenterons les résultats de l'étude effectuée sur la ravine du Petit Puy de Dôme, réalisée à partir de relevés topographiques en trois dimensions effectués à l'aide d'un GPS différentiel sur une période de cinq ans. Puis nous présenterons les résultats obtenus sur le sentier sud-est du Puy de Côme qui a bénéficié d'une étude en deux dimensions sur vingt transects. Le suivi topographique de ce sentier a été effectué avec une méthode de relevé manuel sur une période de six ans. Nous terminerons avec la présentation des résultats issus du traitement des données climatiques collectées sur ces secteurs.

## **6.1. Suivis topographiques**

### **6.1.1. La ravine du Petit Puy de Dôme**

Le suivi d'érosion du Petit Puy de Dôme a débuté au printemps 2007 dans le cadre des stages de master d'Alice Fournier, qui a réalisé trois relevés au DGPS avec un intervalle d'environ six mois entre chaque relevé (Fournier, 2007 ; Fournier-Teissedre, 2008). Nous avons repris le suivi de cette ravine depuis 2009 avec la même méthode et le même pas de temps. En outre, au cours de l'été 2011, plusieurs campagnes de terrain ont été effectuées dans le but d'évaluer l'impact de précipitations importantes au cours d'un évènement pluvieux-orageux majeur.

Nous avons subdivisé la ravine du Petit Puy de Dôme en quatre tronçons qui sont, d'aval en amont : le cône de déjection, la ravine principale, la ravine secondaire

et la partie haute de la ravine (Fig. 64). À partir des relevés topographiques effectués au DGPS, des modèles numériques de terrain (MNT) de type TIN ont été réalisés afin de déterminer les zones d'érosion et d'accumulation (Fig. 73 ; Fig. 74). À partir des MNT, nous avons délimité le contour de la ravine lors de chaque relevé (Fig. 64, Fig. 65). Des profils en longs et en travers ont également été extraits des MNT (Fig. 66, Fig. 67).

#### **6.1.1.1. Évolution de la superficie de la ravine**

L'évolution dans le temps du contour de la ravine permet de bien visualiser, en plan, l'élargissement et le recul des têtes de ravine, ainsi que l'évolution de la superficie du cône de déjection (Fig. 64, Fig. 65).

La tête de ravine principale a enregistré un recul de 3,50 m entre 2007 et 2012 soit un recul moyen de 70 cm/an contre 76 cm/an pour la tête de la ravine secondaire qui affiche un recul total de 3,80 m (Fig. 64). On remarque tout de même un recul plus important sur la ravine principale entre 2007 et 2009, le plus fort recul enregistré étant de 1,40 m au cours de l'hiver 2007-2008 (Fig. 64), alors que le recul de la tête de la ravine secondaire est plus rapide entre 2009 et 2012 et notamment au cours de l'été 2011 avec un recul de 1,62 m (Fig. 65). La ravine secondaire connaît un élargissement de son versant ouest allant de 0,43 m à 1,78 m sur les trois quarts de sa longueur. Le recul des têtes de ravine et leur élargissement se font principalement par affouillement dans le substrat scoriacé puis par basculement de mottes de sol et végétation (Fig. 68).

Le cône de déjection s'élargit d'une dizaine de mètres sur sa partie est entre les deux premières campagnes de terrain (25 avril 2007 et 16 octobre 2007), ceci correspond à une augmentation de la superficie d'environ 175 m<sup>2</sup> (Fig. 64). Ceci est confirmé par les photos du cône de déjection (Fig. 69) qui mettent en évidence une végétalisation du centre ouest du cône et la mise en place de dépôts sur la bordure est. L'activité du cône de déjection s'est donc déplacée vers sa partie est au profit d'une stabilisation dans sa partie centrale.

### 6.1.1.2. Sections transversales et profils en long

Les sections transversales et les profils en long donnent un aperçu en coupe des tranches de sédiments érodés ou accumulés (Fig. 66, Fig. 67). Le profil en long de l'ensemble de la ravine montre les encoches d'érosion régressive des ravines. Pour plus de lisibilité, un zoom sur les têtes de ravines principale et secondaire a été réalisé. Ces profils confirment les reculs identifiés précédemment. Ils mettent également en évidence une forte érosion verticale lors du relevé du 16 octobre 2007 (Fig. 66), cette incision du fond de la ravine précédant l'important recul de la tête de ravine principale identifié précédemment (Fig. 64). La courbe représentant le relevé du 28 octobre 2010 affiche une incision de près de 80 cm par rapport à la courbe précédente (29 avril 2010). Ce creusement est aussi visible sur les photos (Fig. 63). Sur la ravine secondaire, les fluctuations du fond de la ravine sont un peu moins marquées mais sont tout de même présents.

Outre les évolutions du fond des ravines et de leurs bordures, qui confirment ce qui a été noté précédemment, les coupes transversales montrent l'évolution des versants. Le côté ouest du transect 4 (ravine secondaire, Fig. 66) affiche un profil qui a tendance à se verticaliser sur les relevés de fin d'été, tandis que la pente est moins forte voire plus régulière sur les données de fin d'hiver. Lorsqu'on s'éloigne de la tête de ravine principale (transect 2), les versants sont plus stables, depuis novembre 2009 pour le versant ouest et depuis avril 2011 pour le versant est. Alors que les ravines principale et secondaire ont une forme générale plutôt en « V », le haut du secteur affiche un relief beaucoup plus large et plat, rappelant la morphologie d'un sentier incisé par des rigoles près de la bordure est.

En regardant les profils en long et en travers de la ravine principale en parallèle de ceux de la ravine secondaire, nous remarquons que même si globalement les deux ravines suivent le même rythme (accumulation l'hiver, incision l'été), des différences sont tout de même visibles au cours de l'année 2010 (Fig. 66 : transect 2, 3 et 4). En effet, alors que le transect 3 montre une forte incision (jusqu'à 80 cm) du fond de la ravine principale sur le relevé de fin d'été (28 octobre 2010), le transect 4 (ravine secondaire) met en évidence une légère accumulation (jusqu'à 35 cm). De même, entre le 28 octobre 2010 et le 26 avril 2011, la ravine principale enregistre une

accumulation maximale de 70 cm quand la ravine secondaire enregistre une érosion maximale de 34 cm (Fig. 66 : transect 3 et 4).

Le cône de déjection de la ravine du Petit Puy de Dôme s'est élargi sur sa partie est entre avril et octobre 2007 (Fig. 66 : transect 1). Cette extension s'est opérée sur une surface d'environ 175 m<sup>2</sup> pour une épaisseur allant jusqu'à 30 cm. De légères variations sont observables sur le transect, malgré l'échelle de représentation.

Globalement, ces profils et transects traduisent un engorgement du fond de la ravine après les périodes hivernales et une incision à la fin des périodes estivales (Fig. 63, Fig. 66, Fig. 67), bien que les étés 2007 et 2010 aient été apparemment plus propices à l'incision que les autres.



Fig. 63. Évolution de la tête de ravine principale durant l'été 2010.

Ces photos illustrent une forte incision, après l'été 2010, dans les dépôts meubles en aval de la tête de ravine.

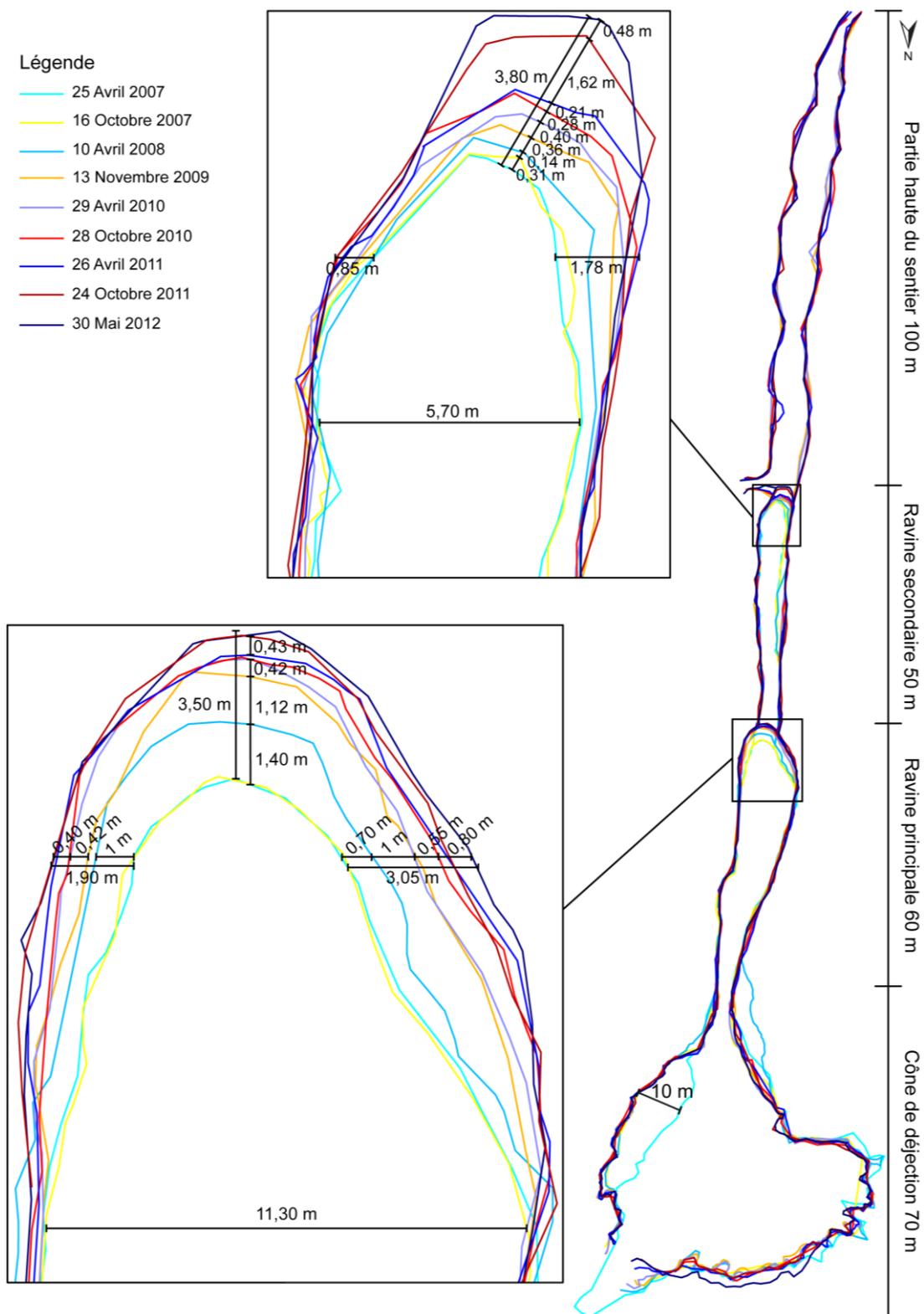


Fig. 64. Évolution saisonnière du contour de la ravine du Petit Puy de Dôme entre 2007 et 2012.

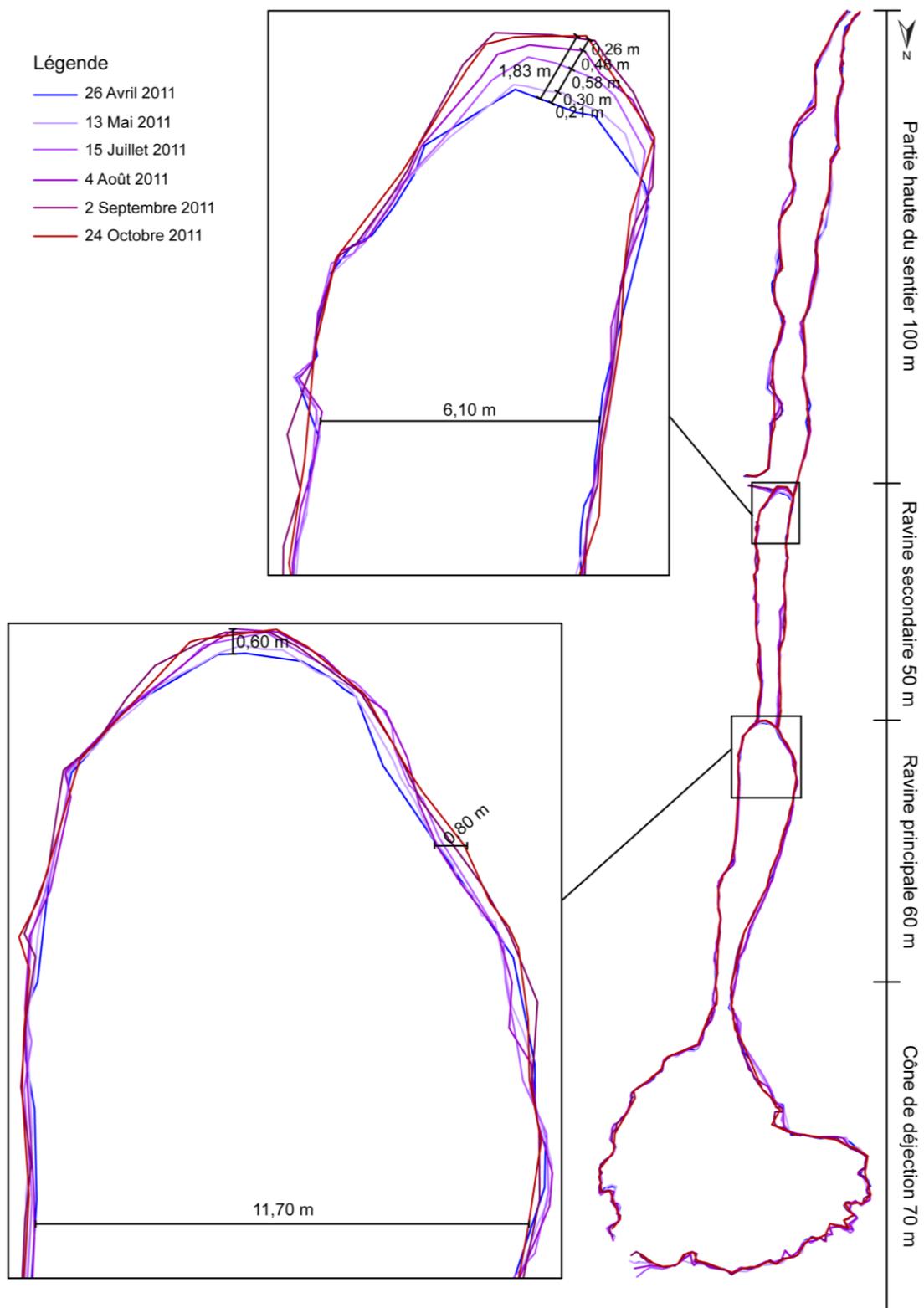


Fig. 65. Évolution du contour de la ravine du Petit Puy Dôme au cours de l'été 2011.

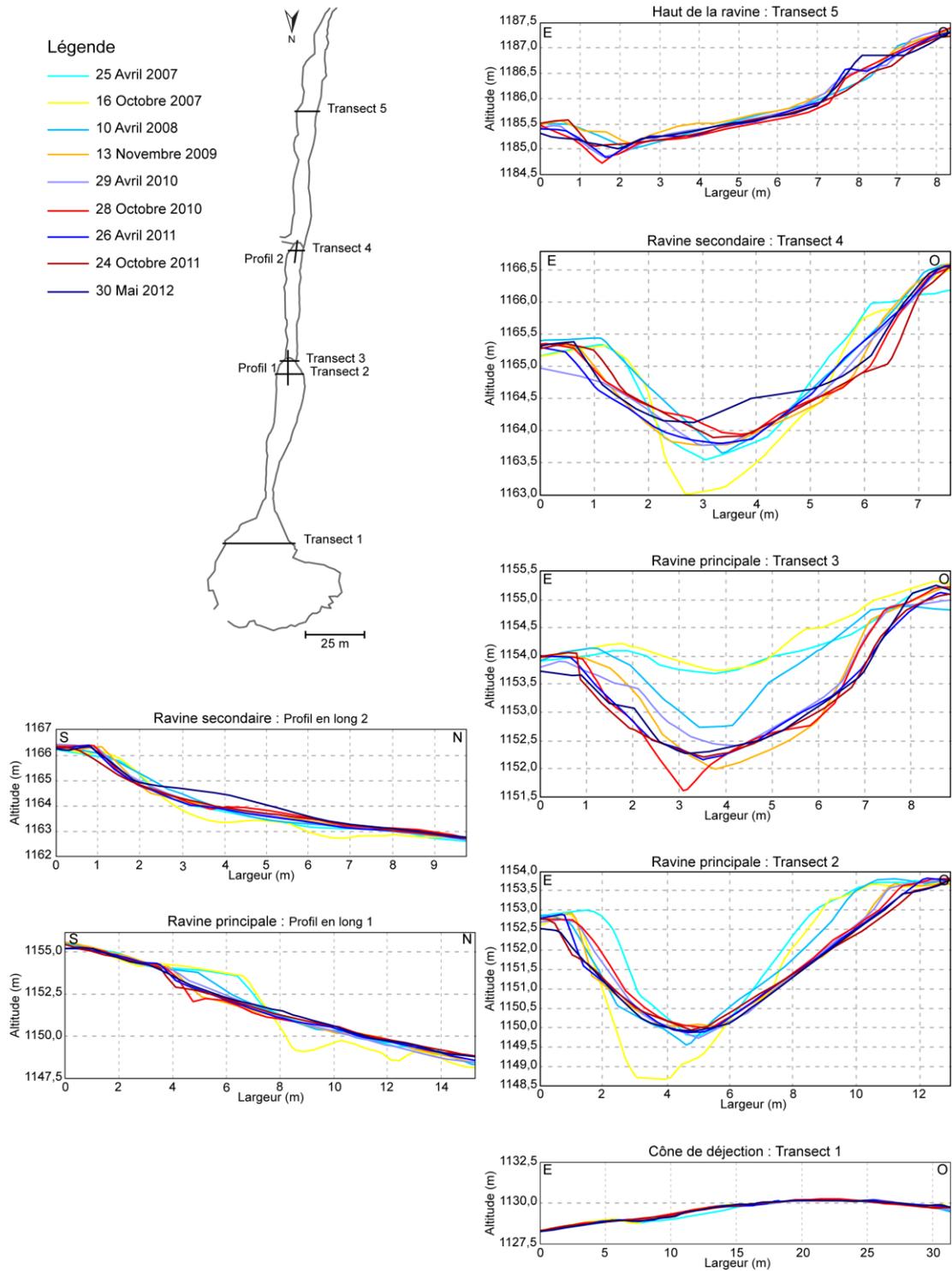


Fig. 66. Profils en long et en travers de relevés DGPS effectués entre 2007 et 2012 sur la ravine du Petit Puy de Dôme.

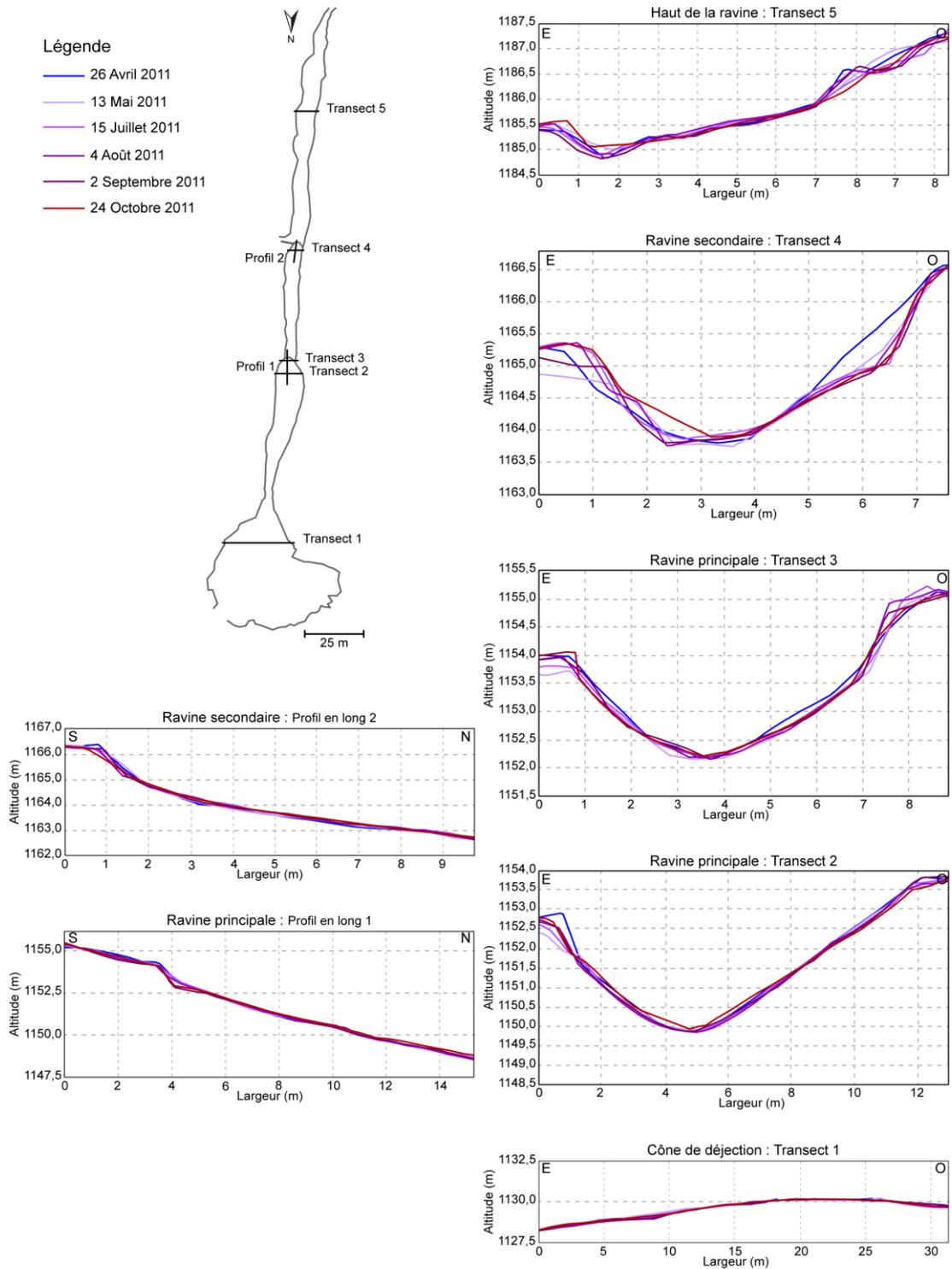


Fig. 67. Profils en long et en travers de relevés DGPS effectués au cours de l'été 2011 sur la ravine du Petit Puy de Dôme.

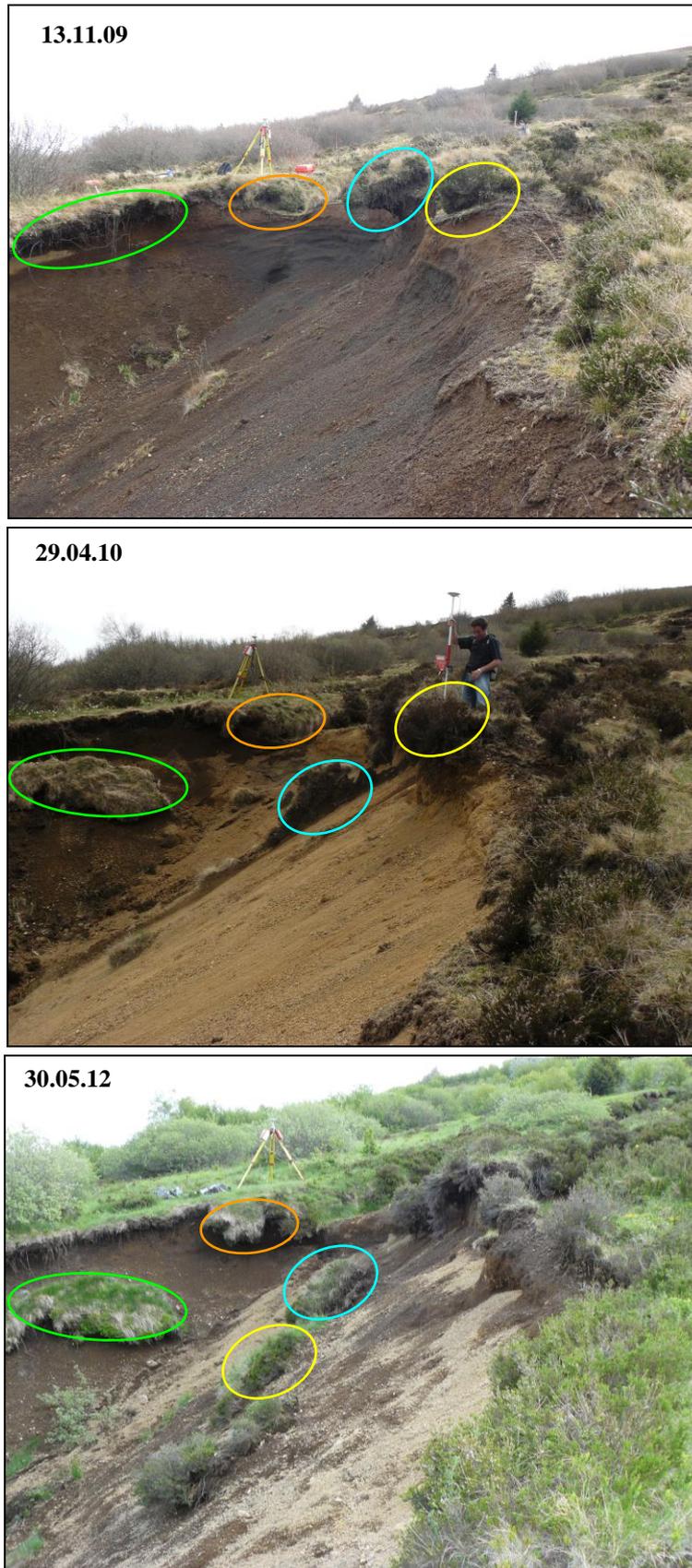


Fig. 68. Évolution de l'amont de la ravine principale. Les zones encerclées mettent en évidence des mottes en cours de migration vers le talweg.

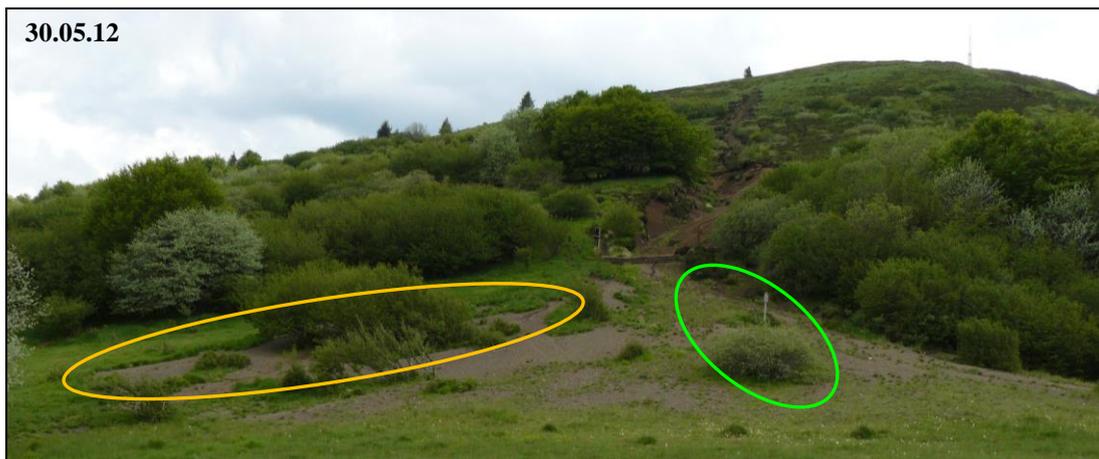


Fig. 69. Photos de la Ravine du Petit Puy de Dôme, avec le cône de déjection en premier plan.

La zone encadrée de vert montre une végétalisation de la partie centre ouest du cône de déjection, tandis que le secteur encadré en orange indique une diminution de la couverture végétale et un agrandissement du cône de déjection sur sa bordure est.

Un relevé LiDAR (Light Detection And Ranging), effectué sur la partie centrale de la Chaîne des Puys et couvrant nos deux secteurs d'étude, a permis d'obtenir une MNT très précis (maillage de 50 cm, précision altimétrique et planimétrique de 10 cm). Bien que précis, ce MNT n'a pas été utilisé dans la comparaison des relevés de nos secteurs. Les LiDAR aéroportés ont en effet tendance à surestimer le fond des ravines (Perroy *et al.*, 2010) ; ceci est d'autant plus vrai sur les objets de la taille de ceux que nous avons étudiés (Fig. 70).

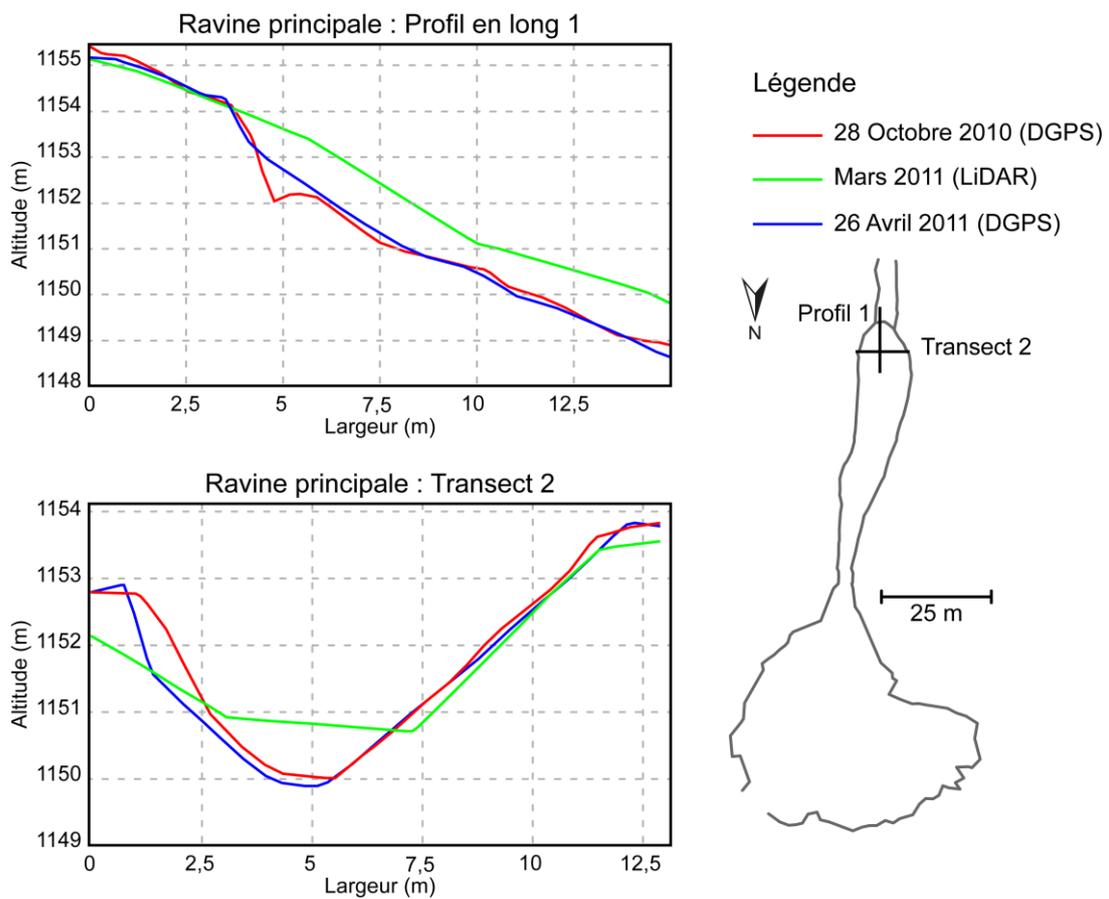


Fig. 70. Comparaison de nos relevés DGPS avec le relevé LiDAR aéroporté de la Chaîne des Puys.

### 6.1.1.3. Bilan érosion – accumulation de 2007 à 2012

Les comparaisons des TIN mettent en relief une évolution volumétrique de la ravine du Petit Puy de Dôme (Fig. 73 ; Fig. 74). Les points enregistrés ne sont pas rigoureusement relevés aux mêmes emplacements pour chacun des relevés. De plus, la ravine possède quelques îlots de végétation plus ou moins importants, notamment

sur sa partie haute ; les plus petits îlots ne sont pas toujours enregistrés s'ils ne se situent pas au niveau des transects relevés. Il faut donc manipuler avec prudence ces comparaisons de TIN et ne pas sur-interpréter des éléments de détail où il y aurait des artefacts dus à la méthode ou au traitement des données. Ce biais méthodologique risque également d'engendrer une légère surestimation des volumes d'érosion et d'accumulation calculés à partir de ces TIN (Tableau 10).

Afin de limiter les erreurs sur les MNT, un tri a été effectué dans les points relevés. Les quelques points possédant une erreur globale supérieure à 10 cm n'ont pas été pris en compte. Cette erreur globale a été calculée en combinant les erreurs planimétriques et altimétriques fournies par le GPS différentiel :

$$\textit{Erreur globale} = \sqrt{(\textit{Erreur planimétrique}^2 + \textit{Erreur altimétrique}^2)}$$

L'erreur globale traduit donc l'erreur maximale envisageable pour chaque point relevé. Les points de l'ensemble des relevés ont une incertitude moyenne de plus ou moins 2,8 cm (Fig. 71). Les fichiers des données brutes des trois premiers relevés ne contiennent ni les erreurs planimétriques ni les erreurs altimétriques.

En théorie, puisque le système est étudié dans sa globalité (ravine + cône de déjection), on devrait obtenir un bilan proche de zéro. Cependant, en observant plus en détail les bilans des différentes périodes inter-relevées, ces bilans ne sont pas toujours proches de zéro (Tableau 10). Une partie de l'écoulement en provenance de la partie haute de la ravine n'atteint pas la ravine secondaire (Fig. 72). Des matériaux sont ainsi déposés sur les versants du Petit Puy de Dôme, à côté de la ravine. De plus, les parties fines peuvent se déposer au-delà du cône de déjection mais, aucun indice sur le terrain n'appuie cette hypothèse. Cependant les volumes de ces dépôts ne semblent pas aussi importants que les taux d'érosion calculés sur la ravine. Sur l'ensemble de nos relevés topographiques, entre 2009 et 2012, le taux d'évolution surfacique moyen est quasi nul (0,05 mm/an ; Tableau 11). Il semble donc qu'il n'y ait pas (ou peu) de perte de matériaux. Ceci est d'autant plus vrai lorsqu'on observe les bilans calculés en prenant en compte les erreurs imputables aux relevés. Le bilan n'a pas été fait depuis 2007 (premier relevé), étant donné que les premiers relevés n'ont pas été réalisés sur l'ensemble de la ravine et qu'il manque les données concernant les erreurs altimétriques et planimétriques.

Pour une visualisation plus juste, l'erreur globale a été prise en compte lors de la comparaison de TIN. Pour les trois premiers TIN, nous avons utilisé la moyenne de toutes les autres erreurs globales. La comparaison des TIN du 10 avril 2008 et du 25 avril 2007, et celle des TIN du 13 novembre 2009 et du 10 avril 2008, mettent en évidence une exagération de l'érosion pour la première comparaison (10/04/08 – 25/04/07) et de dépôt pour la seconde comparaison (Fig. 73). Cette exagération se répercute sur les volumes d'érosion-dépôt calculés à partir des comparaisons de TIN (Tableau 10). Ceci traduit probablement une erreur sur les données du 10 avril 2008, peut-être une erreur constante sur l'altitude. Étant donné le manque d'informations à disposition concernant les relevés d'Alice Fournier (hauteur d'antenne, précisions des points relevés...), nous n'avons pas pu effectuer une correction sur ses données sans risquer d'engendrer d'autres erreurs.

Les comparaisons de TIN permettent d'identifier les secteurs les plus actifs en termes d'érosion et de dépôt. Les premières comparaisons indiquent un remplissage du fond de la ravine pendant l'hiver. Ce remplissage est ensuite purgé au cours de l'été suivant. C'est également ce qu'Alice Fournier a montré dans son mémoire (Fournier-Teissedre, 2008). Cependant ce modèle semble être plus complexe. Par exemple, au cours de l'été 2010, on note bien une érosion au niveau des têtes de ravines, mais juste derrière il y a une accumulation importante qui remplit le fond des ravines. De même, l'hiver suivant (2010-2011) présente certes du dépôt sur le fond, mais ce dépôt est juxtaposé à de nombreuses zones d'érosion. La comparaison entre le premier et le dernier relevé confirme un recul des têtes de ravine, bien visible sur la ravine principale (Fig. 73). Cependant, sur nos trois ans et demi de relevés, il semble que la ravine secondaire soit plus propice à l'érosion quand la ravine principale tend à se stabiliser, voire à afficher un léger exhaussement de son fond : cette dernière est surtout affectée par du matériel en transit vers le cône de déjection. Les comparaisons des relevés effectués au cours de l'été 2011 montrent une érosion plus forte en fin de printemps/début d'été au niveau de la ravine principale (Fig. 74), alors que sur le même secteur en fin d'été/début d'automne un fort dépôt est enregistré. Bien que sur la comparaison avant-après été n'apparaisse qu'un dépôt relativement conséquent dans la ravine principale, on note que ce dépôt ne se met en place qu'à la fin de la dite période après que le secteur ait subi une érosion.

	Surface de référence = 0 (m³)				Surface de référence +/- erreur (m³)			
	Dépôt	Érosion	Bilan	Évolution par m² (m)	Dépôt	Érosion	Bilan	Évolution par m² (m)
25/04/07 - 16/10/07	129,3	231,9	-102,6	-0,037	74,3	168	-93,7	-0,034
16/10/07 - 10/04/08	98,7	481,1	-382,4	-0,139	82,6	352,4	-269,8	-0,098
10/04/08 - 13/11/09	692,3	94,5	597,8	0,162	517,5	73	444,5	0,121
13/11/09 - 29/04/10	133,6	164,3	-30,7	-0,008	70	86,7	-16,7	-0,005
29/04/10 - 28/10/10	255	88,8	166,1	0,046	136,3	50,5	85,8	0,024
28/10/10 - 26/04/11	54,5	290,8	-236,3	-0,065	27,1	145,4	-118,3	-0,032
26/04/11 - 13/05/11	108	139,7	-31,7	-0,009	55,3	66,2	-10,9	-0,003
13/05/11 - 15/07/11	89,7	154,3	-64,6	-0,018	41,5	66,9	-25,4	-0,007
15/07/11 - 04/08/11	82,7	113,3	-30,6	-0,008	32,5	42,1	-9,6	-0,003
04/08/11 - 02/09/11	69,5	163,9	-94,4	-0,026	23,7	63,6	-39,9	-0,011
02/09/11 - 24/10/11	205,1	85,1	120	0,033	100,6	33,1	67,5	0,019
26/04/11 - 24/10/11	166,8	138,4	28,4	0,008	85,3	66,7	18,6	0,005
24/10/11 - 30/05/12	191,8	131	60,8	0,017	107,9	64,6	43,3	0,012
<b>13/11/09 - 30/05/12</b>	<b>147,1</b>	<b>159,5</b>	<b>-12,4</b>	<b>-0,003</b>	<b>83,2</b>	<b>82,7</b>	<b>0,5</b>	<b>0,00014</b>

Tableau 10. Bilan érosion – accumulation réalisé à partir des TIN (Fig. 73, Fig. 74).

La ligne en gras présente le bilan sur l'ensemble des relevés effectués au cours de cette étude (2009 à 2012). Les lignes grisées correspondent aux relevés intermédiaires effectués lors de l'été 2011. Les premières colonnes montrent les bilans sédimentaires réalisés avec une surface de référence nulle, tandis que les dernières colonnes sont calculées en fonction de l'erreur des relevés. Pour une comparaison entre deux relevés, R et R+1, l'erreur est :

Erreur = Erreur globale moyenne du relevé R + Erreur moyenne du relevé R+1 (Fig. 71)

Par exemple, pour la comparaison entre le 13 novembre 2009 et le 29 avril 2010, les dépôts (ou érosion) sont calculés en fonction d'un plan de référence de +/- 0,052 m, qui correspond à la somme de l'erreur globale moyenne du relevé du 13/11/09 (0,024) et de l'erreur du 29/04/10 (0,028). Étant données que nous n'avions pas accès aux erreurs liées aux relevés d'Alice Fournier, nous avons utilisés une moyenne des erreurs des autres relevés.

	Dépôt (m³/an)	Érosion (m³/an)	Bilan (m³/an)	Évolution par m² (m/an)
25/04/07 - 16/10/07	155,859	352,414	-196,555	-0,072
16/10/07 - 10/04/08	170,333	726,701	-556,367	-0,202
10/04/08 - 13/11/09	324,549	45,782	278,767	0,076
13/11/09 - 29/04/10	152,994	189,494	-36,500	-0,010
29/04/10 - 28/10/10	273,349	101,277	172,071	0,047
28/10/10 - 26/04/11	54,953	294,839	-239,886	-0,066
26/04/11 - 13/05/11	1187,324	1421,353	-234,029	-0,064
13/05/11 - 15/07/11	240,437	387,595	-147,159	-0,041
15/07/11 - 04/08/11	593,125	768,325	-175,200	-0,048
04/08/11 - 02/09/11	298,293	800,483	-502,190	-0,138
02/09/11 - 24/10/11	706,135	232,337	473,798	0,131
26/04/11 - 24/10/11	172,014	134,506	37,508	0,010
24/10/11 - 30/05/12	179,833	107,667	72,167	0,020
<b>13/11/09 - 30/05/12</b>	<b>32,689</b>	<b>32,492</b>	<b>0,196</b>	<b>0,00005</b>

Tableau 11. Taux d'érosion annuels de la ravine du Petit Puy de Dôme en fonction des différentes périodes inter-relevé (prise en compte de la marge d'incertitude, Tableau 10).

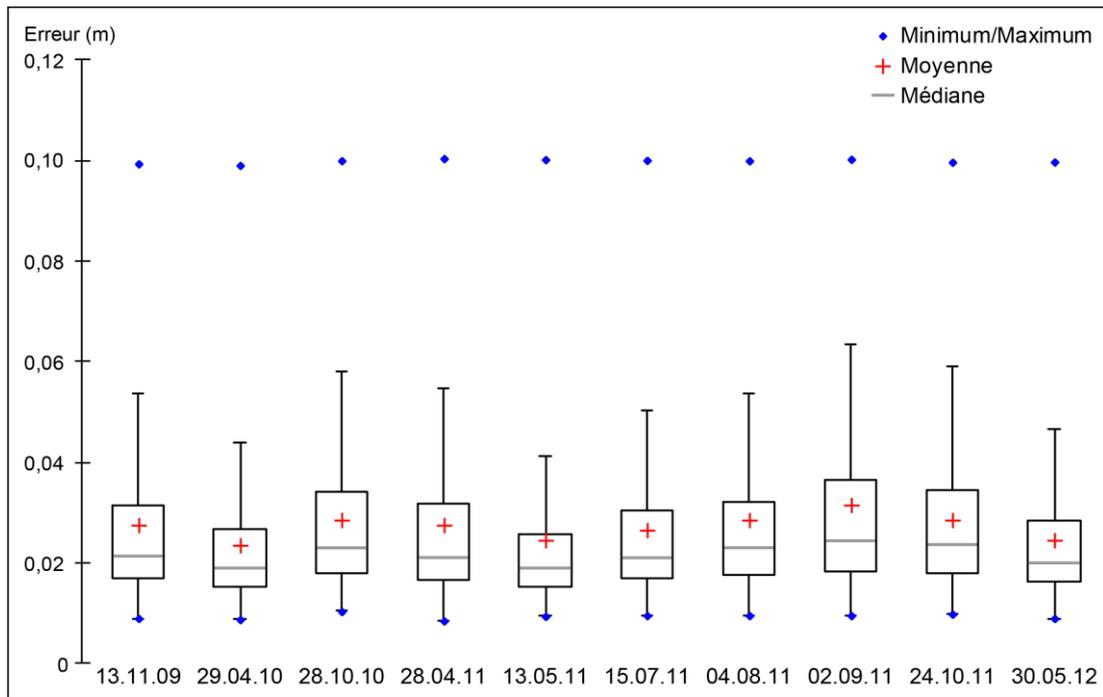


Fig. 71. Box plots représentant l'erreur de l'ensemble des points de chaque relevé.



Fig. 72. Trajectoire du ruissellement concentré entre la partie haute de la ravine et la ravine secondaire.

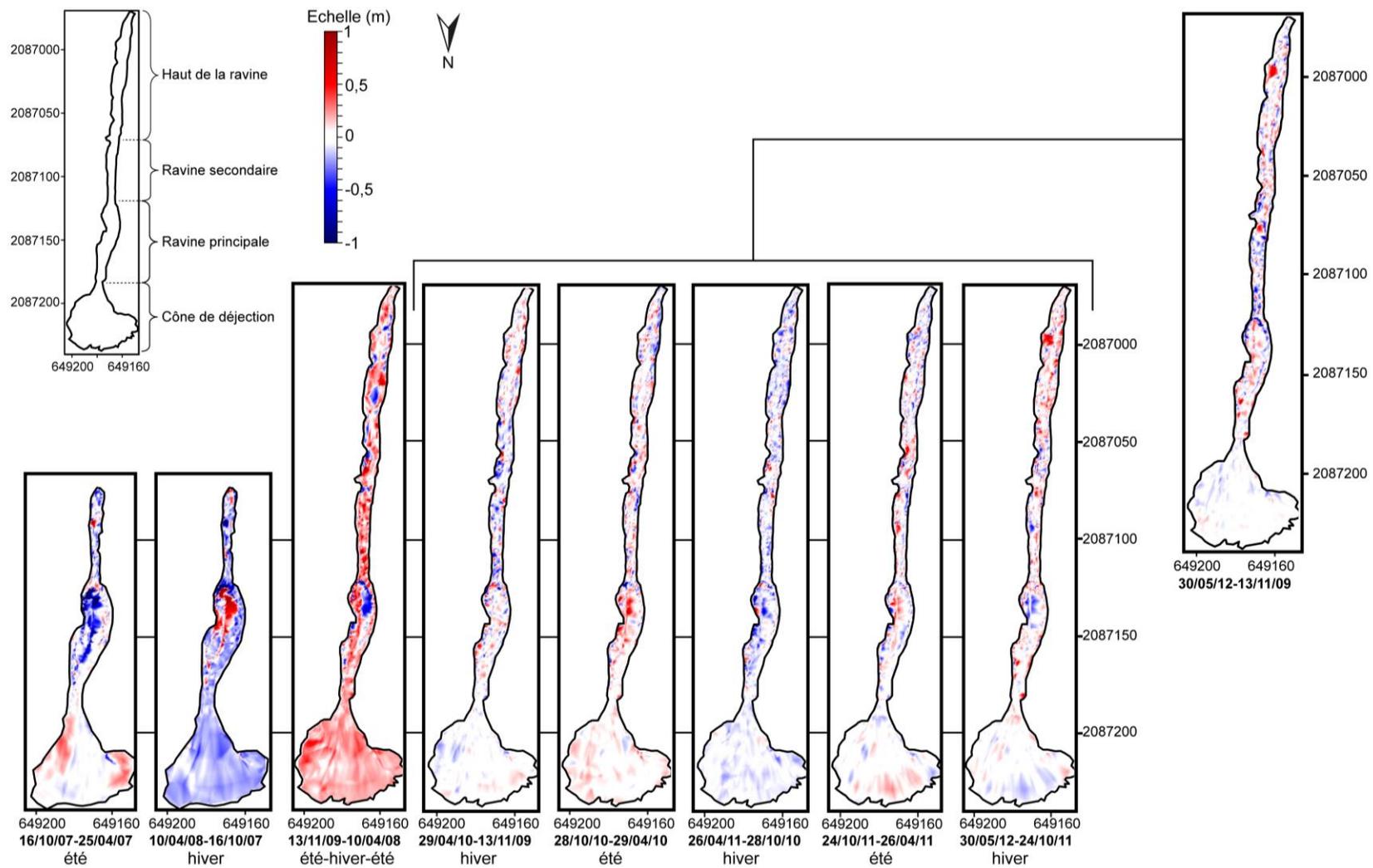


Fig. 73. Cartographie de l'évolution saisonnière de la ravine du Petit Puy de Dôme.

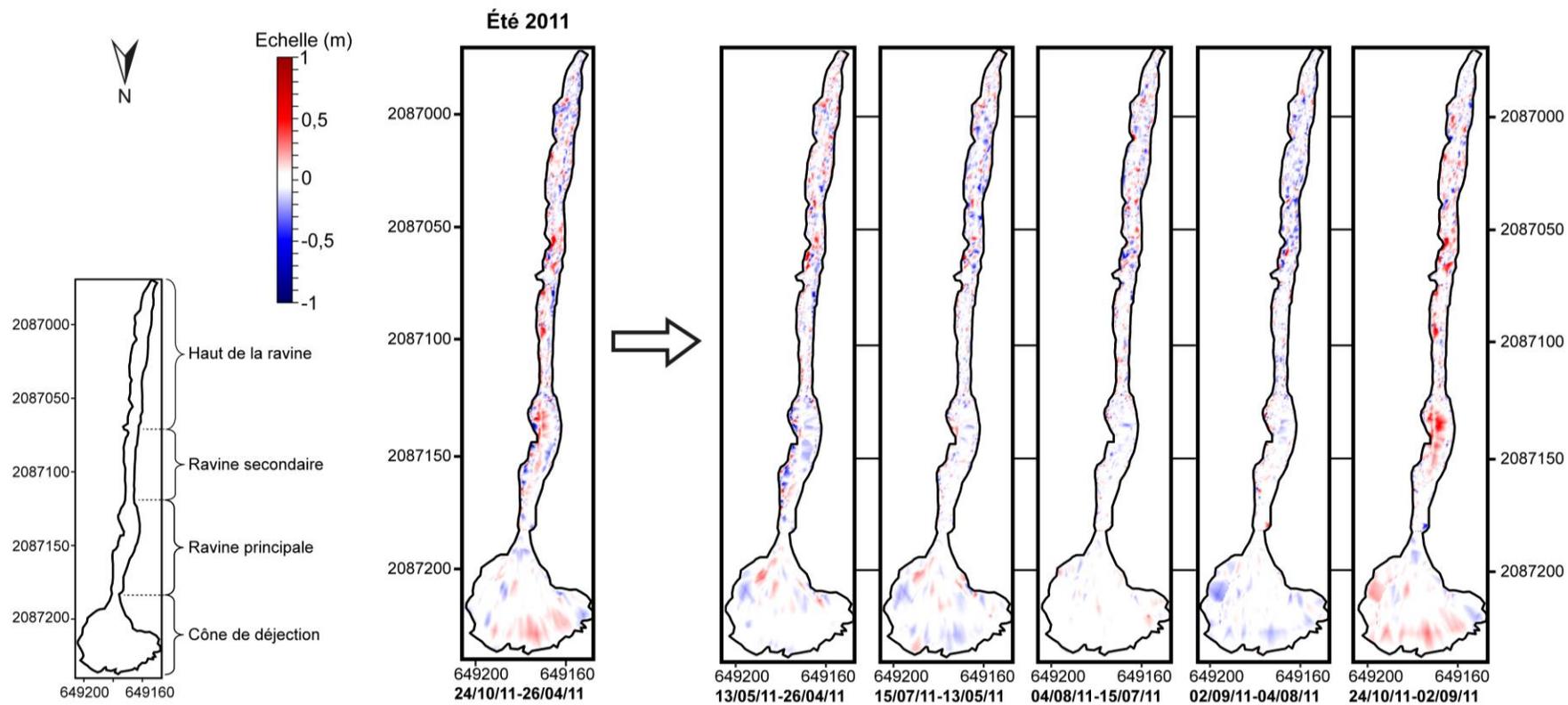


Fig. 74. Cartographie de l'évolution de la ravine du Petit Puy de Dôme : zoom sur l'été 2011.

### **6.1.2. Le sentier sud-est du Puy de Côme**

Lors des deux premières campagnes de terrain d'avril 2006 et d'octobre 2007, vingt-et-une sections transversales ont été effectuées par Laurent Vaïsse sur le sentier sud-est du Puy de Côme (Vaïsse, 2006). Nous avons poursuivi les relevés de terrain sur vingt de ces transects. Le vingt-et-unième transect, situé le plus en aval sur ce sentier, était en effet déjà recouvert par les dépôts du cône de déjection lors de notre campagne de novembre 2009, et les piquets délimitant ce dernier transect n'ont pas été retrouvés. Nous avons donc effectué 4 relevés supplémentaires entre novembre 2009 et avril 2011.

L'ensemble de ces relevés fournissent une évolution des sections transversales, correspondant à l'évolution du fond de chaque transect, sur une période de six ans. Ils permettent également d'étudier l'évolution des tranches d'érosion, c'est à dire l'aire entre le niveau zéro du sentier (avant érosion) et le fond du sentier au moment du relevé. Tous les relevés ont été effectués après l'interdiction d'accès au sentier.

#### **6.1.2.1. Évolution des sections transversales**

Les données topographiques relevées en octobre 2007 montrent une incision importante sur une majorité des transects (Fig. 76). Cette incision s'est effectuée entre avril 2006 et octobre 2007 et affecte la quasi-totalité des transects. Elle est visible sur les transects 1 à 11 et 17 - 18. L'incision maximale est enregistrée sur le transect 6 avec une incision supérieure à 1,20 m. Seul le transect 20, le plus en aval sur le sentier (Fig. 76), présente une accumulation.

Le relevé suivant, datant du 6 novembre 2009, est caractérisé par un élargissement du sentier. Sur la partie amont, l'élargissement est couplé avec un comblement du fond du sentier (Fig. 76). La partie aval fait toujours état de cet élargissement, mais ce dernier s'accompagne également d'une incision, comme le montrent les transects 15, 19 et 20.

Dans l'ensemble, la campagne d'avril 2010, effectuée à la sortie d'une période hivernale, enregistre une phase d'accumulation qui est suivie par une phase d'érosion, constatée sur les données d'octobre 2010. S'ensuit à nouveau une phase de dépôt, identifiée par la courbe d'avril 2011 réalisée avec les données obtenues à la fin

de l'hiver 2010-2011 (Fig. 76). Cependant, les modifications topographiques observées entre ces derniers relevés sont de moindre ampleur en comparaison des premières données obtenues. Bien que l'intervalle de temps entre ces quatre dernières campagnes soit beaucoup plus court que ceux entre les trois premiers relevés de terrain (de l'ordre de 6 mois, contre 18 et 25 mois pour les premiers), cette observation terrain est confirmée par les calculs de taux d'érosion entre chaque relevé (Tableau 12).

Transect	Taux d'érosion entre 2 relevés (m <sup>2</sup> /an)					Taux moyen d'érosion (m <sup>2</sup> /an)
	avr-06 oct-07	oct-07 nov-09	nov-09 avr-10	avr-10 oct-10	oct-10 avr-11	avr-06 avr-11
T1	0,28	0,69	-1,28	-0,58	0,15	0,20
T2	1,21	-0,20	-1,53	0,64	-0,83	0,11
T3	0,46	-0,03	0,12	-0,48	0,02	0,09
T4	0,72	-0,08	0,07	-0,29	0,37	0,20
T5	0,48	0,02	-0,37	0,38	-0,01	0,15
T6	1,01	0,02	-1,22	1,25	0,70	0,38
T7	0,74	-0,05	-0,20	-0,08	-0,11	0,16
T8	0,39	0,19	-0,95	0,30	-0,21	0,11
T9	0,61	0,22	-0,41	-0,36	-0,02	0,20
T10	0,44	-0,22	-0,55	0,34	-0,16	0,07
T11	0,22	-0,04	-0,23	0,52	-0,09	0,07
T12	0,96	-0,54	2,19	1,12	-1,01	0,29
T13	0,01	0,04	-0,05	-0,37	0,06	-0,01
T14	-0,02	0,08	0,23	-0,41	-0,12	0,00
T15	0,03	0,79	-0,70	0,47	-0,16	0,30
T16	0,22	-0,20	0,64	-3,88	3,05	0,06
T17	1,39	-0,28	-1,68	-0,45	3,38	0,43
T18	0,16	0,27	-0,67	0,41	0,66	0,20
T19	0,14	0,34	0,08	0,19	1,16	0,22
T20	-0,07	0,44	0,10	-0,94	0,52	0,13
<b>Moyenne</b>	<b>0,47</b>	<b>0,07</b>	<b>-0,32</b>	<b>-0,11</b>	<b>0,37</b>	<b>0,17</b>

Tableau 12. Taux d'érosion par tranche au niveau des différents transects du sentier sud-est du Puy de Côme.

Sur l'ensemble du secteur d'étude, seuls les transects 13 et 14 n'ont pas connu d'élargissement significatif. On observe tout de même une légère accumulation ou une légère érosion en fonction des dates de relevés topographiques ; mais ces variations (accumulation ou érosion) sont de bien plus faible importance que ce qui est observé sur les autres transects (Fig. 76). Par ailleurs, cette faible variation

topographique est confirmée par les taux d'érosion moyen calculé sur l'ensemble de la période de relevés (Tableau 12).

Notons que cette méthode de relevés ne montre pas les affouillements latéraux des berges du sentier sur les bords de certains transects (Fig. 75 ; Tableau 13).

	Rive droite	Rive gauche
Transect 6	23 cm	75 cm
Transect 7	30 cm	–
Transect 10	24 cm	44 cm
Transect 15	–	45 cm
Transect 16	–	52 cm
Transect 17	–	70 cm
Transect 18	–	55 cm
Transect 19	45 cm	–

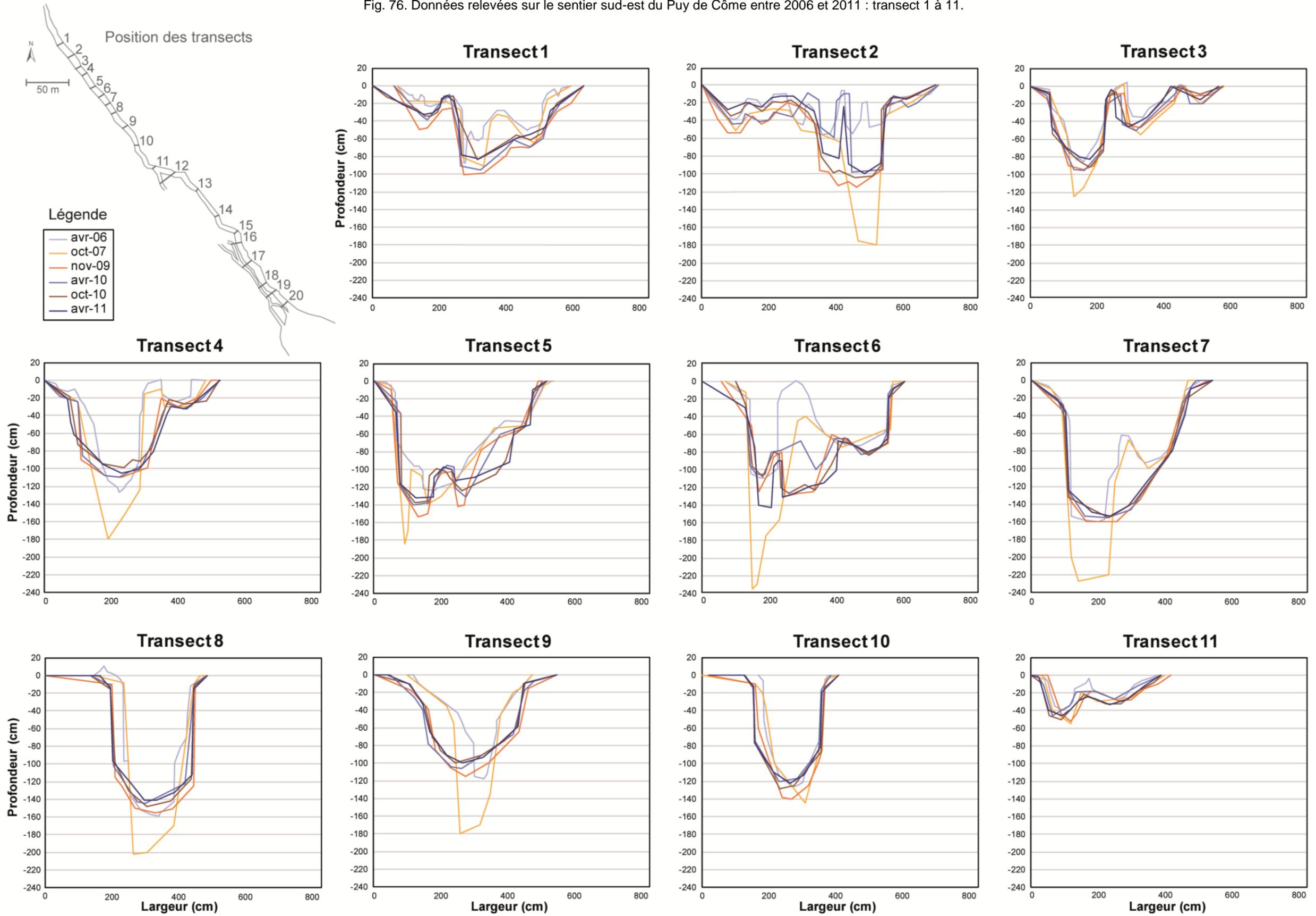
Tableau 13. Profondeur des affouillements latéraux des berges du sentier. Mesures effectuées lors de la campagne du 27 octobre 2010.



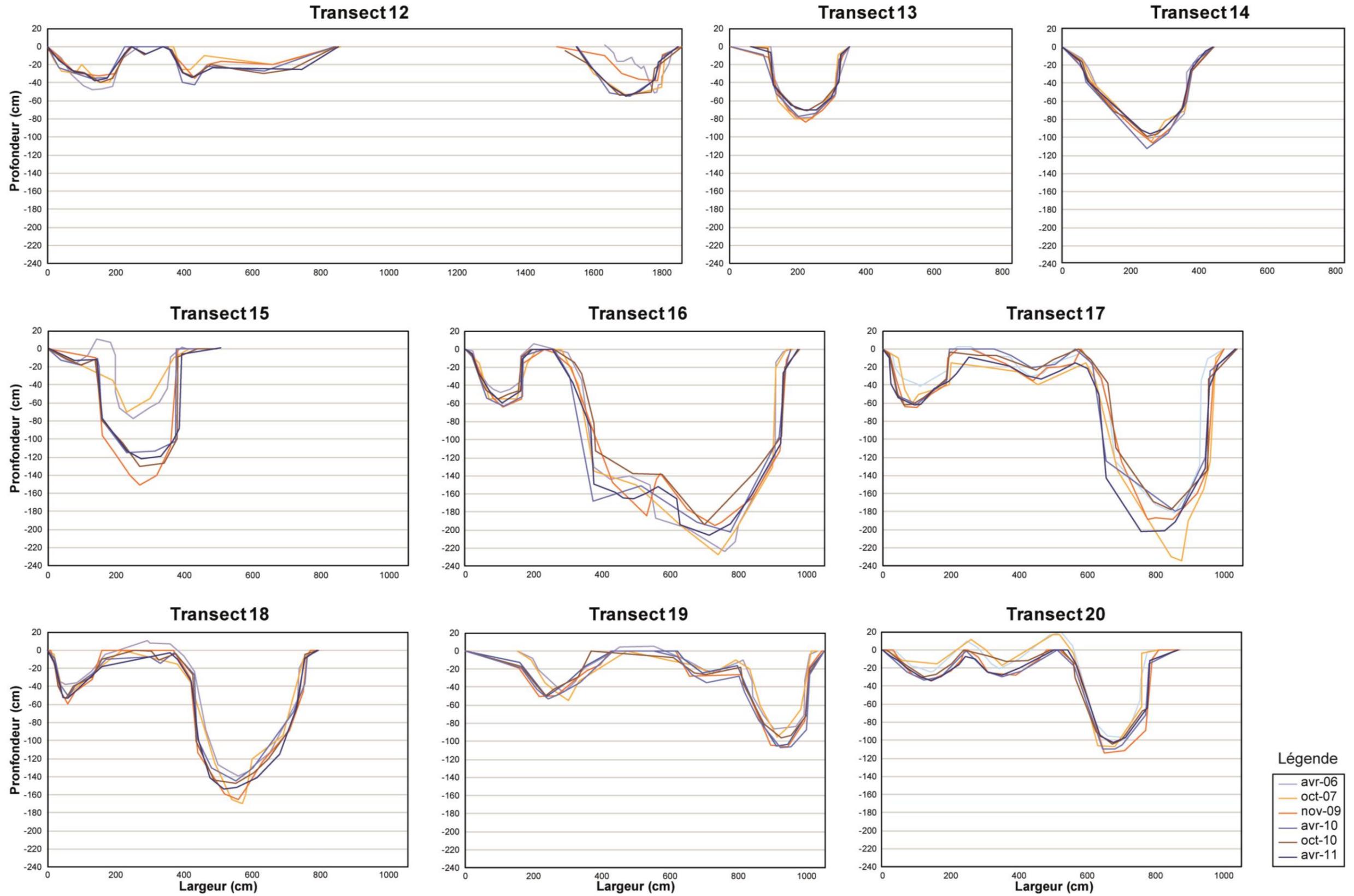
Fig. 75. Affouillement latéral de près de 90 cm en rive gauche entre le transect 16 et le transect 17.



Fig. 76. Données relevées sur le sentier sud-est du Puy de Côme entre 2006 et 2011 : transect 1 à 11.



Données relevées sur le sentier sud-est du Puy de Côme entre 2006 et 2011 : transect 12 à 20.





### 6.1.2.2. Évolution des tranches d'érosion

Des tranches d'érosion ont été calculées à partir des données topographiques. Ces tranches d'érosion (l'aire comprise entre le tracé du sentier à l'état original, soit avant érosion, et le tracé au moment du relevé) ont été calculées à partir des données topographiques issues de notre méthode de relevé manuel. Pour chaque transect, une droite de régression a été réalisée à partir des différentes tranches d'érosion calculées en fonction du temps (date de la campagne de terrain). Les pentes de ces régressions linéaires sont extraites avec un intervalle de confiance de plus ou moins un écart-type (Fig. 79, Tendances 2006-2011). Ceci montre la tendance à l'érosion ou au dépôt de chaque transect. La p-valeur est la probabilité d'obtenir des valeurs de tranche d'érosion qui ne suivraient pas la droite de régression calculée. Plus la p-valeur est forte, plus le risque que nos valeurs de tranche d'érosion ne suivent pas la régression linéaire est important. On définit un seuil  $\alpha$  de significativité à 10 %. Si la p-valeur est inférieure à  $\alpha$ , la tendance à l'érosion, à la stabilisation, ou au dépôt est significative. Afin de compléter cette étude sur la tendance des transects, des courbes montrant l'évolution des tranches d'érosion ont été réalisées pour chaque transect (Fig. 79, tranches d'érosion standardisées). Pour limiter les effets d'échelle, nous avons standardisé les tranches d'érosion en divisant les tranches d'un même transect par sa plus grande tranche d'érosion. Plus les tranches sont proches de 1, et plus elles sont proches de leur maximum observé jusqu'au dernier relevé.

Les transects 1, 5, 6, 9, 10, 12, 15, 18, 19 et 20 montrent une érosion significative sur la période 2006-2011, ce qui est validé par une p-valeur inférieure à 10 % ( $\alpha$ ). Bien que leurs p-valeurs ne permettent pas de considérer l'érosion comme significative, les transects 3, 4, 7, 8, 11 et 17 indiquent également une tendance à l'érosion sur l'ensemble de la période d'étude. Même si la tendance à l'érosion de ces transects s'opère plutôt sur la période 2006-2009 et que la fin de période est plus chaotique avec des alternances érosion-dépôt plus importantes, cette tendance reste visible sur les courbes des tranches d'érosion standardisées (Fig. 79).

La tendance des transects 13 et 14 n'est pas associée à un risque  $\alpha$  inférieur à 10 % (Fig. 79). Cependant le modèle proposé traduit bien la réalité. Le graphique montre une tendance à la stabilisation de ces deux transects. Ceci est en concordance avec nos observations faites à partir des relevés topographiques (Fig. 76) et avec ce

que l'on observe sur les courbes des tranches d'érosion standardisées qui montrent une faible évolution des transects au cours du temps. Entre les transects 14 et 15, une encoche d'érosion située sur un niveau plus induré est visible (Fig. 77), ce qui laisse penser que les transects 13 et 14 évoluent peu parce qu'ils se situent sur ce niveau plus résistant de scories indurées, localisé entre 1105 et 1090 m d'altitude. Sur le graphique des tendances (Fig. 79), le transect 16 semble indiquer une accumulation. Cependant les tranches d'érosion évoquent plutôt une tendance à la stabilisation entre 2006 et 2009 avant de retrouver une alternance entre dépôt et érosion.

Le cas du transect 2 est un peu particulier. Il se situe au niveau d'une division du sentier en deux sentes. Ces deux sentes n'existent plus au niveau des transects amont et aval, mais il en reste un résidu entre le transect 1 et le transect 2. Ce reliquat se termine juste au niveau du transect 2 (Fig. 78) ; il a été relevé lors des campagnes d'avril 2006, avril 2010, et avril 2011 mais pas lors des autres campagnes (Fig. 76). Les tranches standardisées sont donc affectées par ce biais méthodologique.



Fig. 77. Photo représentant une couche de scories indurées, juste en aval du transects 14.



Fig. 78. Erreur méthodologique concernant le relevé topographique du transect 2.

Lors de la campagne de novembre 2009, le transect ne passait pas par la bande végétalisée au centre du sentier (encadré de rouge), contrairement à la campagne d'avril 2010.

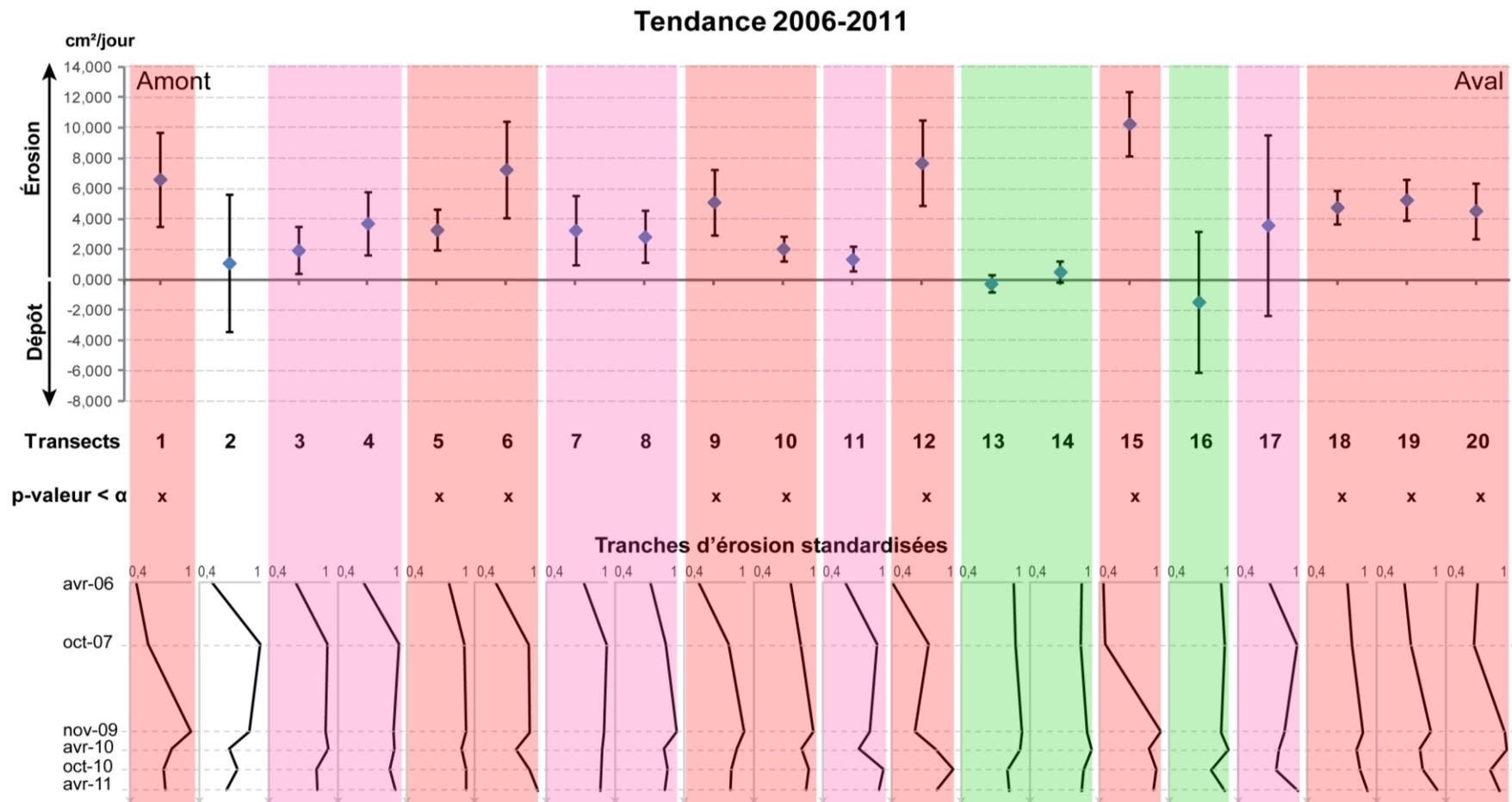


Fig. 79. Évolution des tranches d'érosion de chaque transect du sentier sud-est du Puy de Côme entre avril 2006 et avril 2011. La couleur saumon correspond au transect montrant une érosion significative ( $p$ -value <  $\alpha$ ), la couleur rose représente une érosion statistiquement non significative, et les bandes de couleurs vertes mettent en avant les transects ayant une tendance à la stabilisation.

## **6.2. Traitement des données climatiques**

Deux types de données climatiques ont été utilisés, les données journalières de la station fixe du Puy de Dôme appartenant à Météo-France et des données journalières et horaires issues de la station météo que nous avons installée à proximité de la ravine du Petit Puy de Dôme. Ces dernières données ne sont disponibles qu'à partir du 15 avril 2011 (date de mise en route de la station).

### **6.2.1. Les précipitations**

#### **6.2.1.1 Données pluviométriques : comparaison de la station météo France du Puy de Dôme et de la station du Petit Puy de Dôme**

Afin de valider l'utilisation des données climatiques de la station météo France pour l'étude de nos sentiers de la Chaîne des Puys, nous avons comparé ces données avec celles relevées sur la ravine du Petit Puy de Dôme à partir de la station météo temporaire que nous avons mise en place (Fig. 83). Entre le 15 avril et le 31 décembre 2011, les cumuls de précipitations présentent une différence de 169 mm entre les deux stations. Celle de météo France enregistre 19,6 % de précipitations en moins que la station temporaire après 8,5 mois de relevés. Ce chiffre paraît élevé, mais il s'agit d'une comparaison des cumuls sur 8,5 mois. Sur la même période, la moyenne des différences journalières n'est que de 0,65 mm. Les courbes de cumul des précipitations des deux stations ont sensiblement la même allure, bien qu'une divergence apparaisse vers mi-juillet (Fig. 83, graphique de gauche). La régression linéaire entre les données de précipitations du Petit Puy de Dôme et du Puy de Dôme (Fig. 83, graphique de droite) montre une corrélation positive significative, avec une probabilité associée au F de Fisher inférieur à 0,0001. Bien que les paramètres de cette régression linéaire (ordonnée à l'origine = 0,882 ; coefficient directeur = 0,910) montrent que la station du Petit Puy de Dôme enregistre des précipitations parfois un peu plus forte que celle du Puy de Dôme, nous pouvons utiliser les données du Puy de Dôme pour élargir l'étude à l'ensemble de nos relevés topographiques.

#### **6.2.1.2. Les précipitations inter-relevés**

Les précipitations journalières entre mi-octobre et mi-avril dépassent rarement 20 mm par jour alors que durant les périodes estivales, de nombreux épisodes

pluvieux dépassent 30 mm (Fig. 80). Cependant, l'hiver 2011 – 2012 enregistré par la station météo installée sur le Petit Puy de Dôme montre plusieurs pics journaliers dépassant 20 mm, avec un maximum atteignant 45,8 mm le 22 décembre.

Le cumul des précipitations hivernales entre nos relevés topographiques, soit sur une durée d'environ 6 mois, est en moyenne de 280 mm, contre 580 mm en moyenne pour les périodes estivales. Cependant la dernière saison hivernale étudiée (entre le 24 octobre 2011 et le 30 mai 2012) affiche un cumul nettement au-dessus de cette moyenne (856,2 mm) (Fig. 81, Fig. 82). Les courbes des précipitations cumulées des saisons estivales ont plutôt une forme en escalier, tandis que celles des saisons hivernales sont plus linéaires (Fig. 81, Fig. 82).

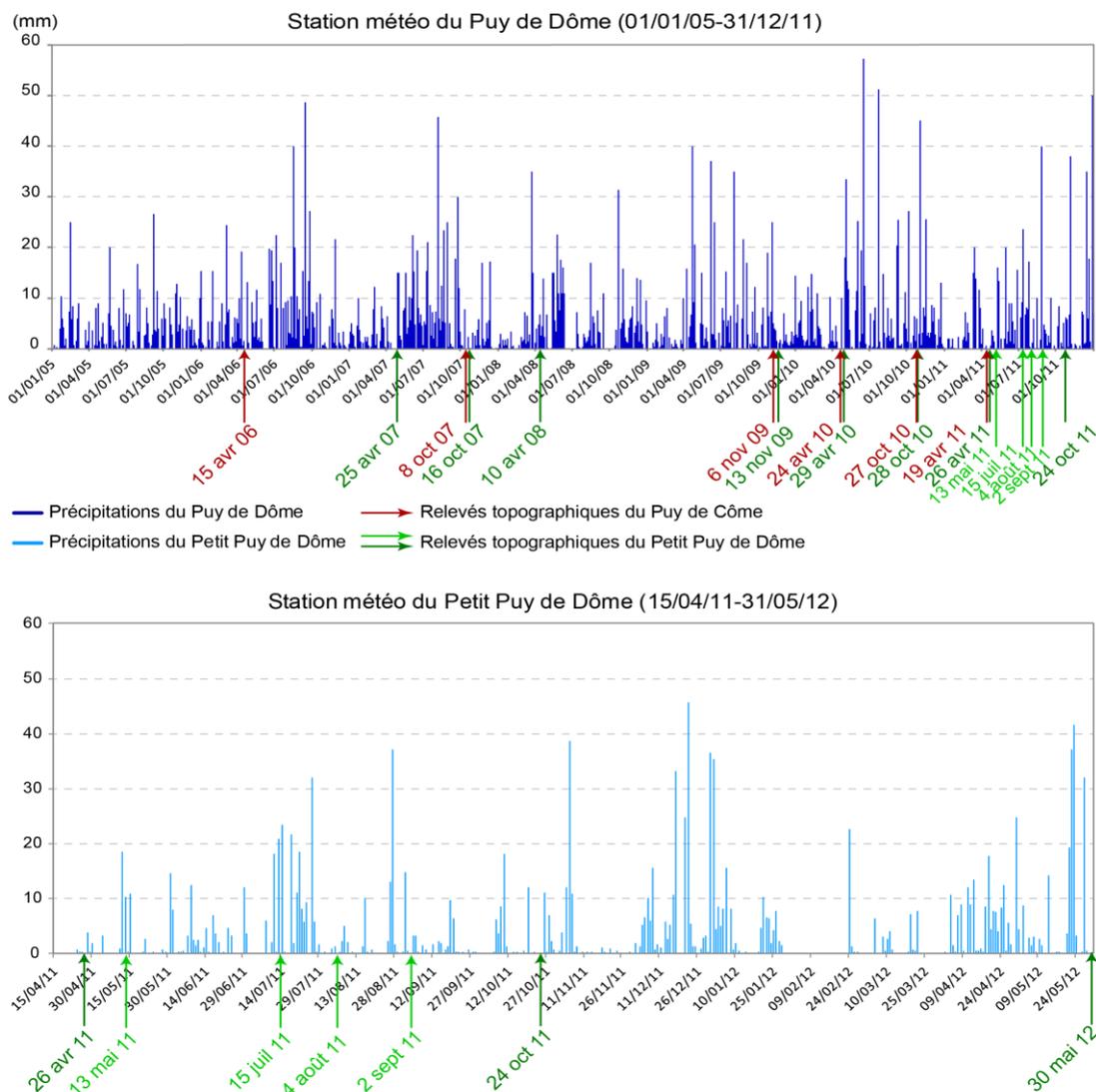


Fig. 80. Précipitations journalières des stations météo du Puy de Dôme et du Petit Puy de Dôme.

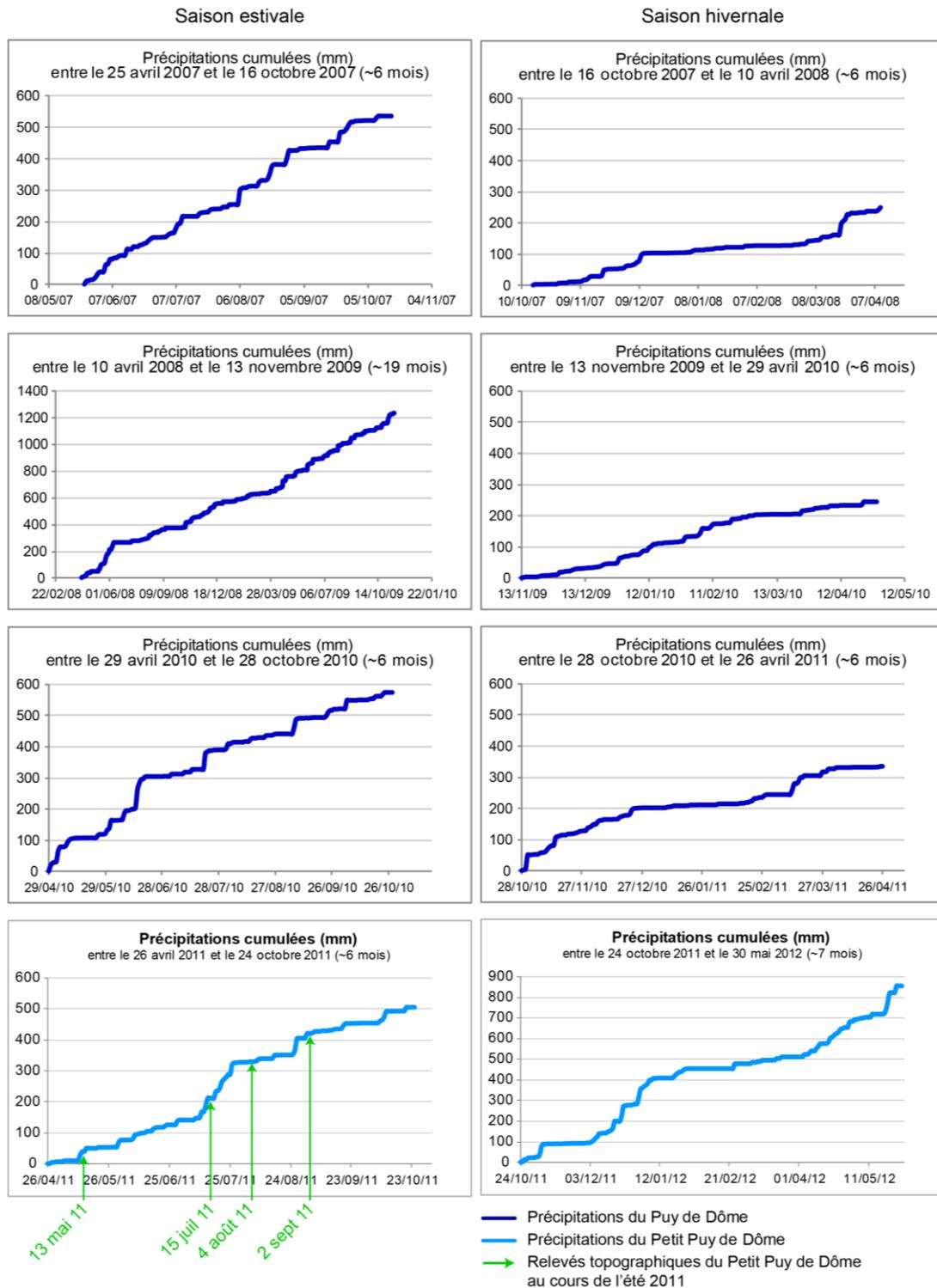


Fig. 81. Courbes des précipitations cumulées entre chaque relevé topographique inter-saisonnier sur la ravine du Petit Puy de Dôme.

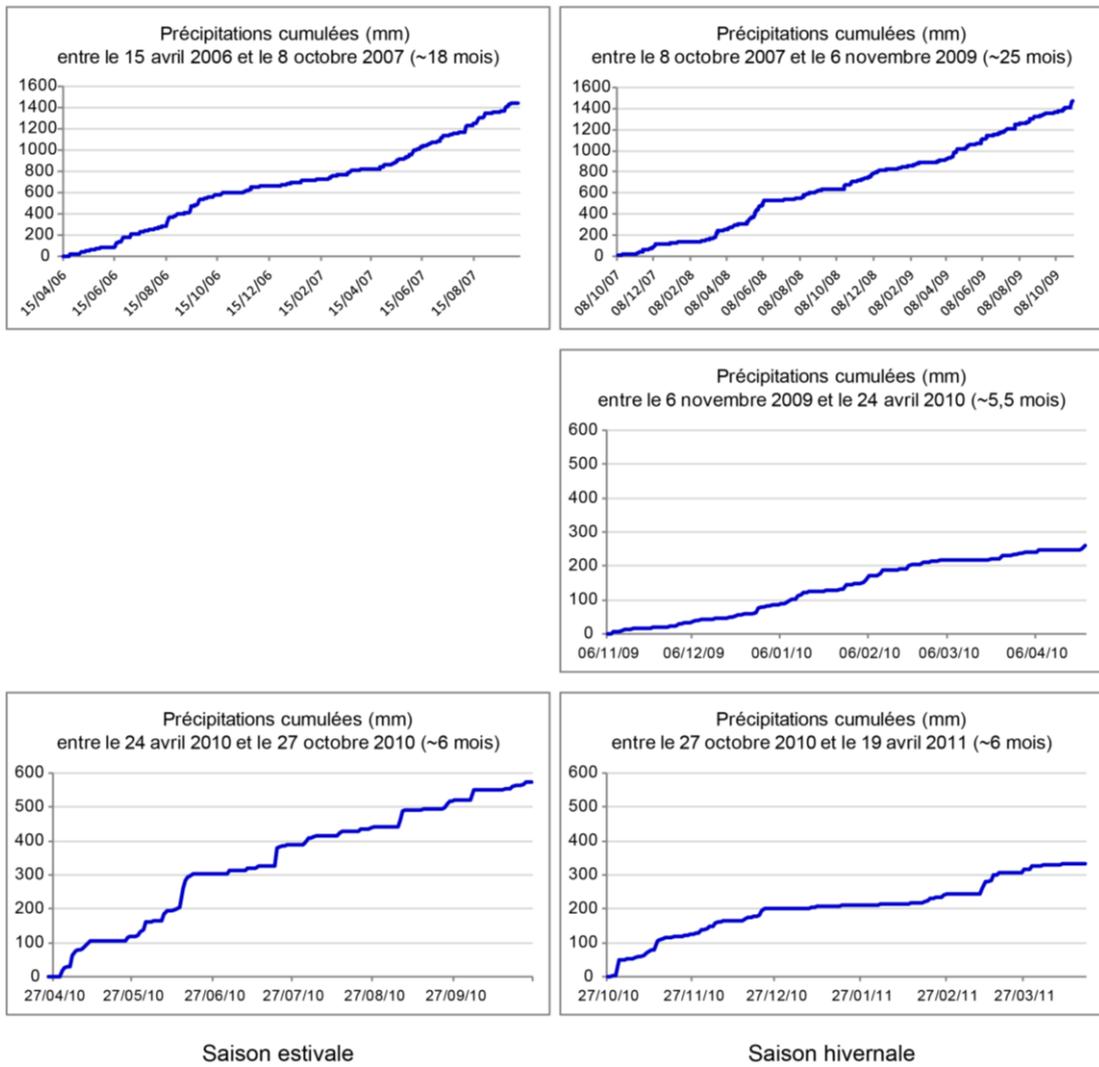


Fig. 82. Courbes des précipitations cumulées entre chaque relevé topographique inter-saisonnier sur le sentier sud-est du Puy de Côme.

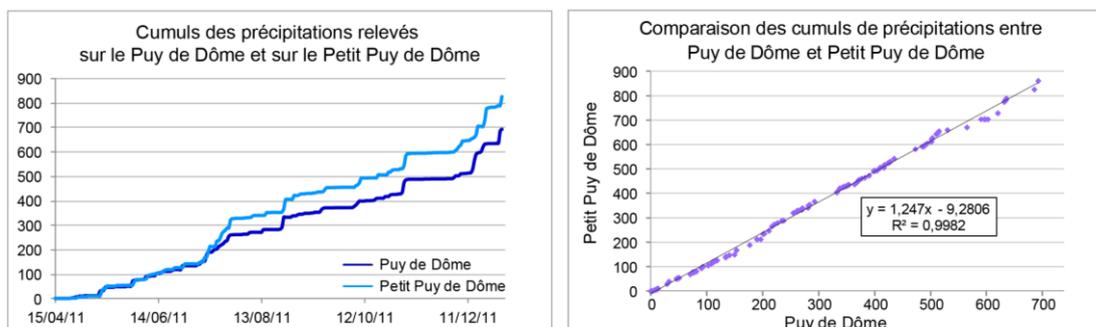


Fig. 83. Comparaison des données de précipitations entre la station météo France situé au sommet du Puy de Dôme et la station météo temporaire installée sur le haut de la ravine du Petit Puy de Dôme.

### 6.2.1.3. Détermination des valeurs extrêmes et de leur période de retour

Afin de déterminer les épisodes pluvieux extrêmes, nous avons utilisé la loi de Gumbel pour réaliser une analyse fréquentielle avec un ajustement par la méthode des moments (Tableau 14). Cette dernière a été appliquée sur les données de précipitations journalières de la station météo France du Puy de Dôme entre 1948 à 2011. Il faut noter une lacune dans les données sur les années comprises entre 1982 et 1993. Ainsi, sur la période qui concerne l'ensemble des relevés topographiques effectués sur les sentiers de la Chaîne des Puys (15 avril 2006 – 30 mai 2012), les 54,3 mm de précipitations correspondant à une période de retour de 5 ans ont été dépassés une fois, le 15 juin 2010 avec 57,2 mm (Fig. 80). En revanche les épisodes pluvieux ayant une période de retour entre 2 et 5 ans sont plus nombreux (Fig. 80) :

- 48,6 mm le 14 septembre 2006
- 45,8 mm le 6 août 2007
- 51,2 mm le 21 juillet 2010
- 45 mm le 31 octobre 2010
- 45,8 mm le 22 décembre 2011, relevé avec la station du Petit Puy de Dôme
- 50 mm le 31 décembre 2011 relevé avec la station météo France contre 36,6 mm sur la station temporaire du Petit Puy de Dôme.

Période de retour (ans)	1000	100	50	20	10	5	2
Probabilité de non dépassement des précipitations	1,00	0,99	0,98	0,95	0,90	0,80	0,50
Variable réduite de Gumbel	6,9	4,6	3,9	3,0	2,3	1,5	0,4
Précipitation (mm)	111,6	87,2	79,8	69,9	62,3	54,3	42,3

Tableau 14. Analyse fréquentielle des précipitations avec un ajustement par la méthode des moments (Loi de Gumbel). Analyse effectuée d'après les données de Météo France sur la période 1948 – 2011.

### 6.2.1.4. Zoom sur les précipitations de la ravine du Petit puy de Dôme au cours de l'été 2011

Le but de ces relevés inter-saisonniers était d'enregistrer un changement topographique lié à un évènement climatique important pour déterminer des seuils érosifs en fonction de l'intensité des épisodes pluvieux. Cette étude n'a pas donné les résultats escomptés pour plusieurs raisons. Tout d'abord, n'ayant pas accès à la

pluviométrie du Petit Puy de Dôme en temps réel, et les orages d'été étant généralement très localisés, il est difficile de savoir exactement à quel moment effectuer un relevé topographique en se basant sur les conditions climatiques de Clermont Ferrand. Ainsi des épisodes de moyenne ou faible intensité passent inaperçus. De plus, au cours de cet été 2011, des problèmes de batteries du GPS différentiel Leica ne permettaient pas de faire un relevé de 8h sur une seule et même journée ; or pour cette étude, il était important de ne pas avoir de précipitations entre deux parties d'un relevé. Par exemple, lors de la campagne du 12 juillet, nous n'avons pas pu terminer le relevé topographique pour cause de batteries défectueuses. Les 13 et 14 juillet, il y a respectivement eu 20,8 et 23,4 mm de précipitations, ce qui ne nous a pas permis de finir le relevé du 12. Nous n'avons donc pas pu procéder à une comparaison avant/après pour cet épisode pluvieux. Enfin, l'été 2011 n'a pas été affecté par des épisodes pluvieux extrêmes. En effet, les précipitations journalières les plus fortes enregistrées sur cette période ont été de 37 mm, valeur bien inférieure aux 42,3 mm d'un épisode pluvieux ayant une période de retour de 2 ans (Tableau 14).

Le relevé s'approchant le plus du but de cette étude, c'est-à-dire de déterminer des seuils d'érosion en fonction d'évènements pluvieux d'intensités importantes, est le relevé effectué le 2 septembre 2011. Entre le 4 août et le 2 septembre, seuls 4 jours affichent des précipitations supérieures à 5 mm (Tableau 15, Fig. 84) : le 16 août avec 10 mm, le 13 août avec 13 mm, le 27 août avec la valeur maximale de 37 mm, et le 1<sup>er</sup> septembre avec 14,8 mm.

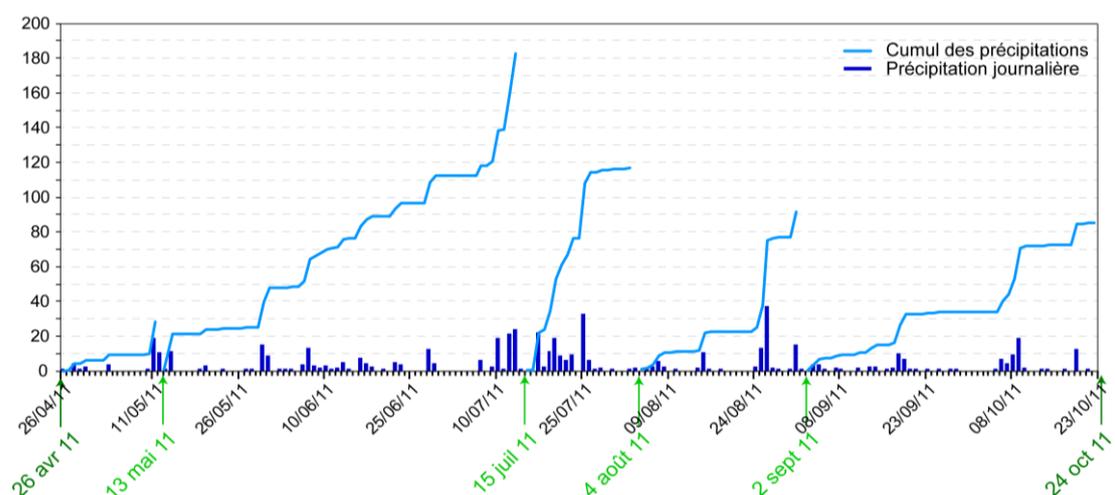


Fig. 84. Précipitations journalières et cumuls enregistré sur la station météo temporaire du Petit Puy de Dôme entre chaque relevé topographique effectué au cours de l'été 2011.

Période entre les relevés topographiques	Cumul des précipitations (mm)	Nombre de jour de pluie			Précipitations maximales (mm)
		> 0 mm	> 1 mm	> 5 mm	
26/04/11-13/05/11	28,4	7	4	1	18,4 (12/05/11)
13/05/11-15/07/11	183	36	23	11	23,4 (14/07/11)
15/07/11-04/08/11	116,8	14	10	8	32 (26/07/11)
04/08/11-02/09/11	91,8	17	11	4	37 (27/08/11)
02/09/11-24/10/11	85	30	15	6	18,2 (10/10/11)

Tableau 15. Synthèse des données de précipitations liées aux relevés intra-saisonniers de la période estivale 2011 (Fig. 84).

## 6.2.2. Les températures

En moyenne, les mois les plus chauds sont juillet et août avec des valeurs moyennes journalières de 16,78 °C et 16,90 °C sur la période de 1951 à 2011 (avec une lacune entre 1982 et 1993). Sur la même période, les mois les plus froids sont janvier et février avec des moyennes journalières de 1,47 °C et 1,92 °C (données Météo France). Cependant, il n'est pas rare d'avoir des gelées à partir du mois d'octobre et ce jusqu'au mois d'avril, voire plus rarement jusqu'au mois de juin (Fig. 85). En moyenne, sur l'ensemble des périodes entre nos relevés topographique, les saisons hivernales ont 63 cycles gel-dégel, avec un maximum de 80 cycles gel-dégel pour l'hiver allant du 8 octobre 2007 au 15 avril 2008 (Tableau 16, Fig. 85).

Ravine du Petit Puy de Dôme			Sentier sud-est du Puy de Côme		
Périodes inter-relevées	Type de période	Cycles gel-dégel	Périodes inter-relevées	Type de période	Cycles gel-dégel
			15/04/06 - 08/10/07		68
			15/04/06 - 15/10/06	Estivale	12
			15/10/06 - 15/04/07	Hivernale	54
25/04/07 - 16/10/07	Estivale	2	15/04/07 - 08/10/07	Estivale	2
16/10/07 - 10/04/08	Hivernale	77	08/10/07 - 06/11/09		166
10/04/08 - 13/11/09		92	08/10/07 - 15/04/08	Hivernale	80
*10/04/08 - 15/10/08	Estivale	13	*15/04/08 - 15/10/08	Estivale	10
15/10/08 - 15/04/09	Hivernale	66	15/10/08 - 15/04/09	Hivernale	66
15/04/09 - 13/11/09	Estivale	13	15/04/09 - 06/11/09	Estivale	10
13/11/09 - 29/04/10	Hivernale	44	06/11/09 - 24/04/10	Hivernale	48
29/04/10 - 28/10/10	Estivale	16	24/04/10 - 27/10/10	Estivale	16
28/10/10 - 26/04/11	Hivernale	59	27/10/10 - 19/04/11	Hivernale	60
26/04/11/ - 24/10/11	Estivale	3			
24/10/11 - 30/05/12	Hivernale	68			

Tableau 16. Nombre de cycles gel-dégel en fonction des périodes entre chaque relevé. Tableau réalisé à partir des données météo France du Puy de Dôme et de la station temporaire du Petit Puy de Dôme (Fig. 85). \* 52 jours de données manquants.

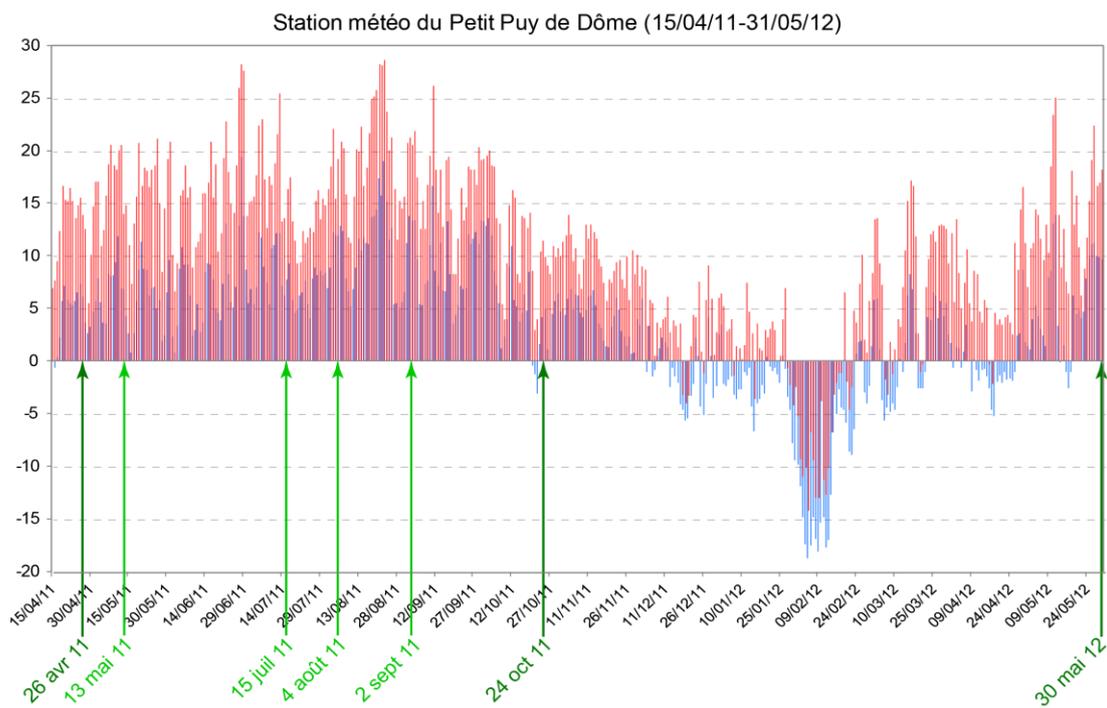
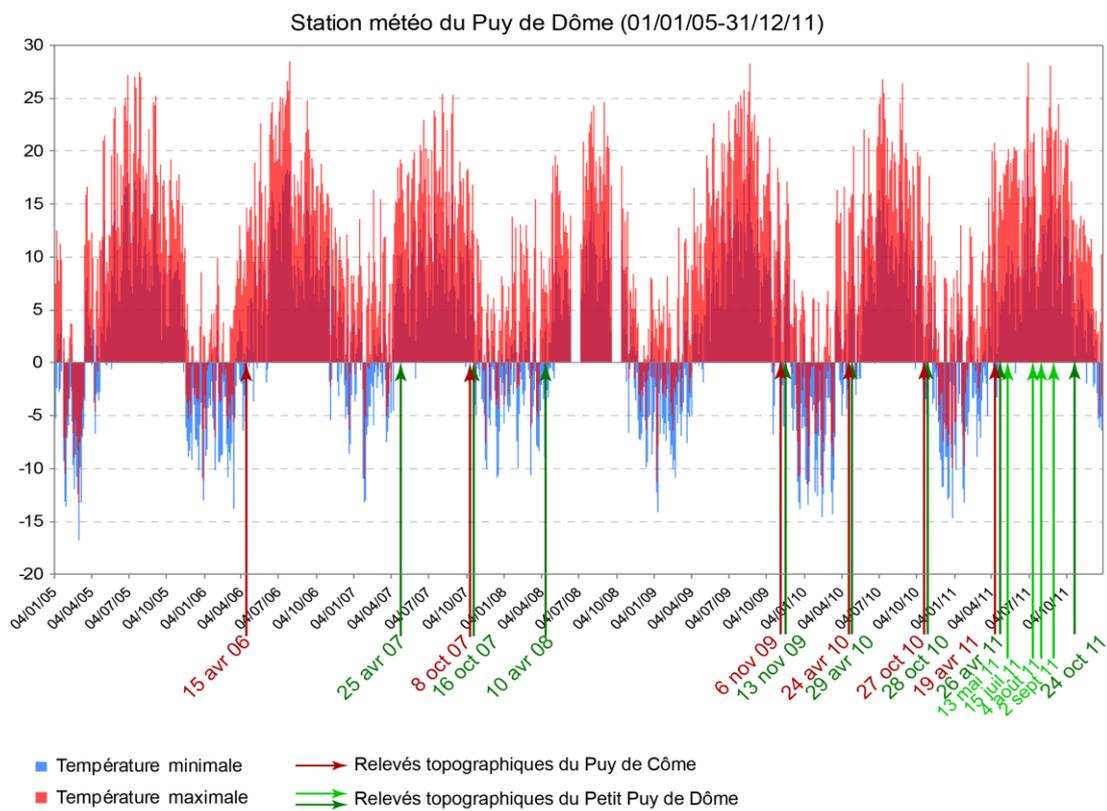


Fig. 85. Températures journalières relevées sur les stations météo du Puy de Dôme et Petit Puy de Dôme.

## Conclusion

Les secteurs étudiés dans la Chaîne des Puys sont soumis à une érosion importante. Cependant cette érosion n'agit pas de façon uniforme sur l'année. Les relevés de fin d'été ont tendance à montrer une érosion verticale, ainsi qu'un recul des têtes de ravine. L'été 2007 semble avoir été particulièrement propice à ce type d'érosion. Les relevés de fin d'été 2007 attestent en effet d'une forte incision sur les sentiers de la Chaîne des Puys (Fig. 64, Fig. 66, Fig. 73 et Fig. 76). Notons que le cumul des précipitations durant cette période a été le plus fort enregistré au cours de l'ensemble des relevés effectués (Tableau 17), avec notamment un épisode de forte intensité (période de retour de 2 ans selon la loi de Gumbel ; cf. Tableau 14).

L'hiver, des dépôts sont observés dans le fond des sentiers/ravines. De plus, l'enregistrement de l'élargissement des berges est plus important sur les relevés de fin d'hiver que sur les relevés de fin d'été. L'hiver 2007-2008 en est l'exemple le plus probant (Fig. 73, Fig. 64, Fig. 76). Remarquons que l'hiver 2007-2008 est celui qui a compté le plus de cycles gel-dégel (Tableau 17).

Ainsi, on observe une sorte de « respiration » des sentiers/ravines scoriacés de la Chaîne des Puys avec un comblement du fond des ravines l'hiver et une incision l'été. De plus, les calculs du bilan érosion-accumulation pour la ravine du Petit Puy de Dôme et des taux d'érosion sur les transects du sentier sud-est du Puy de Côme ont tendance à faire ressortir une alternance entre des phases de dépôt et des phases d'érosion (Tableau 10, 11 et 12).

Période	Cycles gel-dégel	Précipitations (mm)		Épisodes > 42,3 mm (période de retour de 2 ans)	Petit Puy de Dôme Bilan sédimentaire par m <sup>2</sup> (m)	Puy de Côme Taux d'érosion moyen des transects (m <sup>2</sup> )
		Cumuls	Valeurs maximales			
Été 2006	12	575,4	48,6	1		0,7
Hiver 2006-2007	54	244,6	21,6	0		
Été 2007	2	632,8	45,8	1	-0,034	
Hiver 2007-2008	80	248,8	35	0	-0,098	0,15
Été 2008	10	378,4	22,6	0	0,121	
Hiver 2008-2009	66	300,2	31,4	0		
Été 2009	13	554	40	0		
Hiver 2009-2010	48	246,6	14,8	0	-0,005	-0,16
Été 2010	16	574,4	57,2	2 dont 1 > 54,3 mm (période de retour de 5 ans)	0,024	-0,06
Hiver 2010-2011	60	335	45	1	-0,032	0,18
Été 2011	3	505	37	0	0,005	
Hiver 2011-2012	68	575,4	45,8	1	0,012	

Tableau 17. Tableau synthétique des principaux résultats obtenus sur les sites d'étude de la Chaîne des Puys.

Les données affichées pour le Petit Puy de Dôme sont des bilans sédimentaires les valeurs négatives (positives) correspondent à des pertes (apports) de matière. Concernant les données du sentier du Puy de Côme, ce tableau répertorie les taux d'érosion moyen de l'ensemble des transects pour chaque période inter-relevée. Les valeurs positives représentent une tendance générale à l'érosion, et les valeurs négatives indiquent une tendance à l'accumulation.



## Conclusion

Le suivi topographique ainsi que l'étude climatique réalisés sur les sentiers de la Chaîne des Puys mettent en évidence une saisonnalité de l'érosion. Les secteurs de la ravine du Petit Puy de Dôme et du sentier sud-est du Puy de Côme étant interdits à la randonnée, le facteur principal de l'érosion est d'ordre climatique avec des précipitations orageuses l'été et de nombreux cycles gel-dégel l'hiver. Donc, l'évolution topographique de ces sentiers fluctue au rythme des saisons. Ainsi, de manière générale, on observe une « respiration » du fond des sentiers/ravines avec une incision l'été et un remplissage l'hiver, qui est accompagné d'un recul des têtes de ravines.

Dans le massif du Sancy, bien que le paramètre climatique soit toujours présent, la fréquentation touristique s'ajoute à l'équation complexe de l'érosion des sentiers. L'évolution topographique des secteurs étudiés est un peu différente de ce qui est observé et mesuré dans la Chaîne des Puys. Les relevés effectués identifient des phases d'érosion pendant les périodes « hivernales ». Ces périodes hivernales comprennent 5,5 mois d'enneigement permanent. Sur la période inter-relevé hivernale, l'érosion est effective pendant environ un mois. Des phases d'accumulation, accompagnées de l'élargissement des sentiers sont identifiées pendant la saison estivale. L'étude de l'occupation du sentier et de ses abords indique que près de 14 % des randonneurs, toutes catégories confondues, pratiquent le hors-sentier (96 randonneurs sur 690 au total). Cependant, ils étaient 18 % à se livrer à cette pratique avant la mise en place d'aménagements visant à canaliser et informer les randonneurs (62 sur 332 randonneurs suivis avant aménagement), et sont moitié moins nombreux après l'installation des aménagements.

Les murets en pierre, installés avant les premiers relevés par les gardes nature du PNRVA sur le sentier sud-est du Sancy, que ce soit pour canaliser les randonneurs sur le sentier ou pour limiter l'évacuation de matière vers le bas des ravines, engendrent une accumulation de sédiments sur l'arrière de ces « barrières ». Même si la rétention de sédiments s'est faite plus tardivement, il en est de même pour la fascine en bois, mise en place au cours de l'été 2010 au bas de la ravine du Petit Puy de Dôme.



# Partie 4 : Interprétation – discussion



# Introduction

Si nos quatre secteurs d'étude ont des caractéristiques quelque peu différentes, que ce soit en termes de substrat, de contexte microclimatique, de végétation, ou encore de fréquentation touristique, ils correspondent également à différents stades d'érosion. Selon les méthodes qualitatives de classification des sentiers (Partie 1.1), le secteur entre le sommet du Sancy et le Col de la Cabane fait partie de la classe 3, celle des sentiers modérément endommagés (Bratton *et al.*, 1979 ; Marion *et al.*, 2006). La portion du sentier du Pas de l'Âne étudiée, située au niveau du Col d'Enfer, est modérément endommagée à fortement endommagée, certains secteurs ayant une tendance au ravinement. Quant aux deux sentiers de la Chaîne des Puys, ils sont classés dans la dernière catégorie, celle des sentiers sévèrement endommagés (Bratton *et al.*, 1979 ; Marion *et al.*, 2006). La ravine du Petit Puy de Dôme pourrait même être hors classement : comme son nom l'indique, elle s'assimile davantage à une véritable ravine de part sa forme et son fonctionnement. Il est en de même pour le sentier sud-est du Puy de Côme, qui n'est plus officiellement un sentier, et qui progressivement se transforme en ravine.

Dans un premier temps, nous discuterons des apports et limites des méthodes utilisées dans cette étude sur l'évolution des sentiers. Puis, dans un second temps, l'interprétation et la discussion des études réalisées sur chaque terrain laisseront entrevoir une tendance générale quant à l'évolution saisonnière et le devenir des différents secteurs. Enfin, de cette discussion sectorisée découlera une réflexion plus générale permettant de faire émerger des grandes tendances concernant l'érosion des sentiers de moyenne montagne auvergnate, afin de proposer des éléments de gestion et de lutte contre l'érosion.



## **Chapitre 7 : Apports et limites des méthodes utilisées**

Une part importante du travail effectué dans le cadre de cette thèse consistait à suivre l'évolution morphologique de nos sites d'étude pour de comprendre les dynamiques érosives des sentiers de randonnée en moyenne montagne auvergnate et proposer des aménagements potentiels qui limiteraient la dégradation de ces sentiers. Dans le but de réaliser le suivi topographique de nos quatre secteurs d'étude, nous avons adopté trois méthodes différentes : une méthode de lasergrammétrie, une méthode de suivi par GPS différentiel et une méthode de relevé manuel. Chaque méthode présente des avantages et des inconvénients que nous analyserons ci-dessous sur la base de l'expérience acquise au cours de cette thèse.

Une étude de la fréquentation touristique avait déjà été réalisée dans le Sancy. Nous l'avons complétée par une étude sur le comportement des randonneurs sur le sentier du Col d'Enfer. Nous avons ainsi pu estimer la part de randonneurs pratiquant du hors-sentier, définir des cheminements préférentiels, ou encore évaluer l'impact d'aménagements légers sur le comportement des randonneurs. Mais si le secteur retenu se prêtait bien à ce type d'étude, nous verrons que des améliorations pourraient être apportées au protocole de recherche.

### **7.1. La lasergrammétrie**

Le LiDAR terrestre est un outil de mesure topographique non invasif. Sa grande précision et sa résolution permettent d'effectuer un suivi topographique très fin (Jacome Pereira, 2009). La précision infra-centimétrique du scanner laser longue portée n'est contrainte que par le géoréférencement du nuage de points, effectué à l'aide d'un DGPS dans notre cas. En tenant compte de l'incertitude liée au scanner et à celle liée au DGPS pour le relevé des coordonnées des cibles, la précision de nos nuages de points est estimée à plus ou moins 2,5 cm. La grande précision des relevés permet des calculs précis de volumes d'érosion – accumulation, mais également la

localisation précise des zones où l'érosion est la plus active. Ainsi nous pouvons définir plus précisément l'emplacement de potentiels aménagements ou actions de lutte contre l'érosion (Dąbek *et al.*, 2013).

Bien que le scanner permette d'effectuer des relevés topographiques avec une résolution très fine, il faut prendre en compte le fait qu'il ne relève que la partie du terrain visible depuis sa position de relevé. Ceci implique que chaque objet en relief engendre un masque derrière lui. Pour réaliser un scan de l'ensemble de notre secteur d'étude, nous n'avons eu d'autre choix que de nous positionner en contrebas du sentier. La partie haute de notre sentier étant encaissée, elle n'était pas toujours visible sur notre scan global. Pour pallier à ces effets de masque, nous avons dû faire d'autres relevés à l'intérieur de notre secteur d'étude. Malgré cela, tous les masques n'ont pu être comblés (environ 5 % de masque sur nos secteurs). Le relief étant très accidenté, il aurait fallu faire beaucoup d'autres scans pour en éliminer un maximum. Mais le but de cette étude étant de mesurer les variations de la topographie dans le temps, il était important de faire ces relevés en une journée.

Comme l'évoquent Hancock *et al.* (2008), malgré une très haute résolution, l'ensemble des points relevés ne constitue qu'un échantillonnage de la surface réelle. Nous avons donc réalisé des MNT et comparaisons de MNT à partir de ces échantillonnages effectués à différentes périodes en faisant abstraction de ces masques. Puisque lors de nos campagnes terrain le scanner laser a toujours été positionné aux mêmes endroits, les masques induits par ces relevés sont, à peu de variations près, les mêmes d'un relevé à un autre. Pour ne pas introduire de surestimation dans nos calculs d'érosion - dépôt, nous avons choisi de ne pas interpoler notre modèle numérique de terrain au niveau des masques.

La lasergrammétrie terrestre est une méthode de grande précision permettant une résolution très fine, mais elle n'est pas adaptable à tous types de terrain. Les sites d'étude idéaux pour l'utilisation de cette méthode seraient des terrains (1) peu ou pas végétalisés pour limiter les effets liés à la croissance végétale, (2) pentus pour limiter les erreurs liées aux angles fuyants ou visées rasantes (Astrade *et al.*, 2011) et (3) permettant plusieurs positionnements de scans pour limiter les masques.

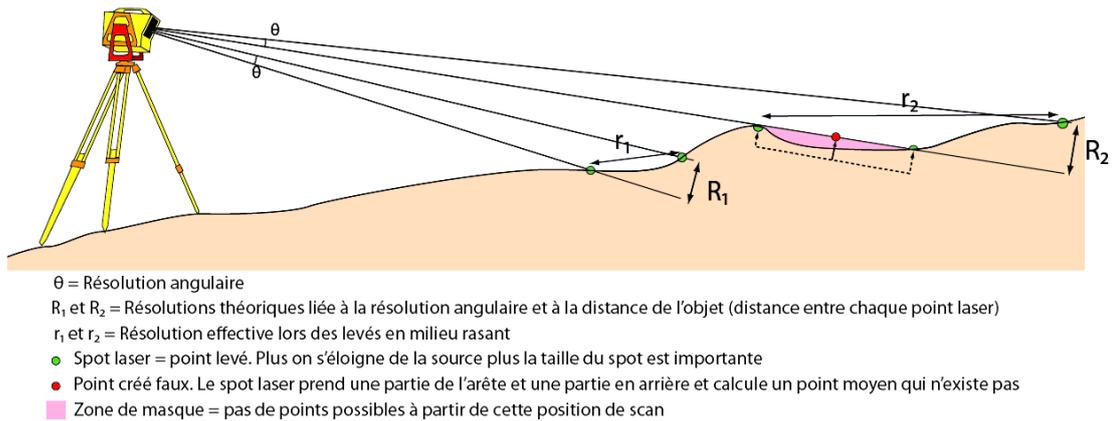


Fig. 86. Problèmes posés par l'utilisation d'un scanner laser longue portée (Astrade *et al.*, 2011).

## 7.2. Les méthodes utilisant un GPS différentiel

Nous avons utilisé le GPS différentiel sur deux secteurs d'étude : la Ravine du Petit Puy de Dôme et le Col d'Enfer. Sur le Petit Puy de Dôme, un point de référence avait été mis en place par Alice Fournier lors de son premier relevé en avril 2007 (Fournier, 2007). Nous avons fait tous nos relevés à partir de ce point de référence, ce qui nous a permis d'éviter l'étape du post-traitement. En revanche, sur le site du Col d'Enfer, nous n'avons pas de point de référence déjà en place. Le GPS utilisé sur ce secteur permettant de s'appuyer sur un plus grand nombre de satellites lors des relevés (notamment sur les satellites de la constellation Glonass), et donc d'obtenir une meilleure précision des coordonnées de la base, nous avons décidé de ne pas mettre en place de point de référence. Ceci a induit un post-traitement des points de chaque relevé.

La méthodologie que nous avons utilisée pour faire nos suivis d'érosion avec des GPS différentiels permet d'obtenir de bons résultats concernant les volumes d'érosion (Hu *et al.*, 2007). Cependant, en raison de la résolution induite par le maillage de points relevés sur le terrain, elle n'est pas idéale pour enregistrer les changements micro-topographiques. Bien qu'une rigole se dessine et s'incise sur la partie haute de la ravine, elle n'apparaît pas sur les comparaisons des MNT. Cette façon de relever nos points GPS a également induit quelques erreurs sur le sentier du Col d'Enfer. En effet, nos relevés ont parfois lissé la microtopographie très accidentée au niveau du sentier. Pour remédier à ces problèmes, il aurait fallu

effectuer un relevé plus fin, avec une résolution plus grande, ce que nous n'aurions pu faire sur une seule journée. Il était également envisageable de reprendre les points exactement au même endroit pour chaque relevé, mais alors, toujours pour des questions de temps de relevé, il aurait fallu prendre moins de points pour effectuer chacune des campagnes sur une même journée.

Afin de limiter ces contraintes (temps de relevé, effets de lissage liés à l'interpolation de nos données, introduction d'erreur dans les comparaisons), nous avons effectué des relevés de type « transect » tous les 5 à 8 m sur l'ensemble de nos sites. Pour gagner en précision, un relevé plus fin a été réalisé, localement, au niveau des secteurs les plus susceptibles d'évoluer au cours de notre suivi (Wu et Cheng, 2005 ; Cheng *et al.*, 2006 ; Cheng *et al.*, 2007 ; Wu *et al.*, 2008). Dans le but d'enregistrer l'évolution des têtes de ravine, des relevés à plus fine résolution ont été appliqués aux contours et en aval de celles-ci.

Sur la ravine du Petit Puy de Dôme, les tests effectués en photogrammétrie terrestre donnent des résultats prometteurs (Genet *et al.*, 2011). Bien que la méthode de photogrammétrie terrestre permet l'obtention d'un nuage de points dense avec un niveau de détail intéressant (Fig. 87), Genet *et al.* (2001) soulignent les problèmes liés à la végétation, la photogrammétrie enregistre la surface de végétation (Fig. 88) et non la surface réelle du sol contrairement au GPS différentiel, ce qui dans notre cas pose des problèmes de surestimation des bord de la ravine. De plus, en raison de la longueur de la ravine, cette méthode serait difficilement applicable sur l'ensemble du secteur. De la même façon, la superficie et le faible relief du cône de déjection ne permet pas d'obtenir de bon résultat avec la photogrammétrie terrestre. La photogrammétrie par drone permettrait à la fois d'être suffisamment près de l'objet pour obtenir une bonne résolution et à la fois d'avoir le recul suffisant pour couvrir l'ensemble de la ravine et du cône de déjection. Cependant, l'utilisation d'un drone ne réglerait pas le problème lié à la végétation. Cette méthode permettrait d'obtenir des MNT peu coûteux (en temps et en matériel) avec une très haute résolution spatiale (Jacome *et al.*, 2008).

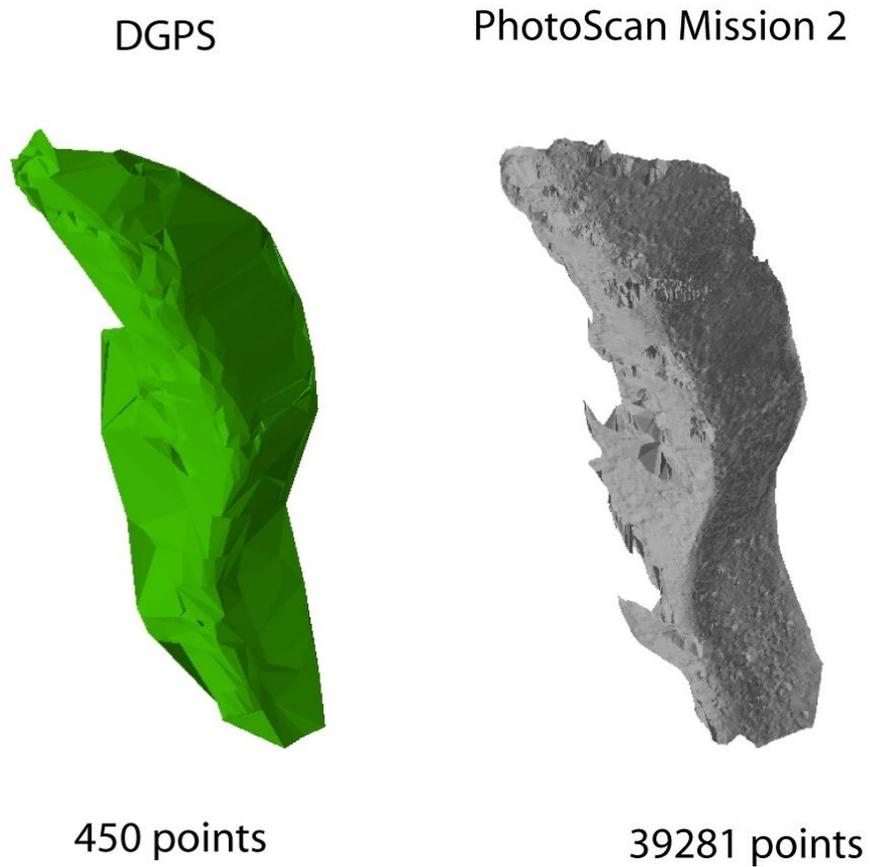


Fig. 87. Comparaison des relevés au GPS différentiel et par photogrammétrie terrestre (Genet *et al.*, 2011).



Fig. 88. Photo représentant les bords de la ravine du Petit Puy de Dôme lors du test de photogrammétrie (Genet *et al.*, 2011).

### 7.3. La méthode de relevé manuel

De nombreuses études sur l'érosion des sentiers ont été réalisées avec une méthode de relevé manuel par transect. Dans de nombreuses études, les auteurs ont effectué des relevés de profondeur le long de transects à intervalle fixe, la mesure de profondeur se faisant généralement tous les 10 à 15 cm (Helgath, 1975 ; Leonard et Whitney, 1977 ; Cole, 1983 ; Tinsley et Fish, 1985 ; Cole, 1989 ; Yoda et Watanabe, 2000). Étant donné la longueur de certains de nos transects (plus de 10 m), l'application de cette méthode sur le sentier sud-est du Puy de Côme aurait été trop chronophage. Pour réduire le temps de relevé, sans perdre l'exactitude de la donnée, nous avons choisi, comme d'autres auteurs, de faire nos relevés de profondeur au niveau des ruptures de pente sur le transect (Marion et Olive, 2006 ; Olive et Marion, 2009). Ce mode de relevé au niveau des variations de pente permet également de mieux prendre en compte la microtopographie du sentier au niveau du transect. Il s'agit d'une méthode experte puisque la personne qui réalise les relevés définit les ruptures de pente.

C'est une méthode très simple à mettre en place, demandant peu de logistique et peu coûteuse. Elle est applicable à tout type de terrain ce qui est un avantage important lorsque l'on travaille sous couvert forestier : la portée de la vision est trop courte pour utiliser des appareils de type scanner laser ou tachéomètre, et la canopée est trop dense pour permettre l'utilisation d'un GPS différentiel (la canopée masque la réception satellite). Bien que cette méthode soit à relevés manuels, la précision n'en est pas pour autant mauvaise : nous l'estimons à plus ou moins 2 cm pour chaque point relevé. Cette méthode permet de mesurer efficacement les pertes de sol (Olive et Marion, 2009) en utilisant des données représentatives de la morphologie réelle du sentier au niveau du transect.

En revanche, cette méthode ne restitue qu'une vision en deux dimensions. L'interpolation entre les transects n'est pas envisageable ; en tout cas, l'interpolation entre nos transects, distants de 10 à 30 m, est impossible. La distance inter-transect est très variable car l'objectif de l'étude est de mettre rapidement en évidence des évolutions géomorphologiques et non de caractériser l'ensemble du sentier en vue d'une analyse spatiale exhaustive. Les transects ont été positionnés, après une

expertise de terrain, sur les secteurs dynamiques ou problématiques en terme d'érosion (Vaisse, 2006). Ce choix paraissant plus judicieux que d'effectuer un échantillonnage systématique, nous avons donc repris les mêmes transects que ceux mis en place en 2006 par Laurent Vaisse.

#### **7.4. Les relevés climatiques**

La station météorologique que nous avons mise en place en haut du Petit Puy de Dôme, à l'est de la ravine, nous a permis d'obtenir des données horaires et journalières de précipitation, température, humidité, radiation solaire, puissance et direction du vent, et hauteur de neige. Les données sont relevées toutes les 10 minutes puis moyennées (ou cumulées pour les précipitations) sur 1 heure pour les données horaires, ou moyennées/cumulées sur 24 heures pour les données journalières. Nous avons essentiellement travaillé avec les données de précipitations et températures journalières. Les données de température horaire nous ont permis de déterminer le nombre de cycles gel-dégel.

Il nous semblait intéressant de pouvoir mesurer les précipitations solides en mesurant les hauteurs de neige horaire, ce qui nous aurait également permis de calculer des vitesses de fonte pour estimer le ruissellement lié à la fonte. Cependant, le capteur de hauteur de neige n'a pas fonctionné correctement. Nous avons installé une plaque en PVC sous le capteur pour limiter les perturbations liées à la croissance de la végétation et nous allions régulièrement nettoyer autour de la plaque pour nous assurer qu'aucune plante ne poussait sous le capteur. Mais dès le début de l'enregistrement des données, le capteur a montré des incohérences avec l'enregistrement des hauteurs de neige qui étaient positives ou négatives en plein été 2011 (Fig. 89). En regardant le détail des enregistrements horaires, on note une fluctuation très grande entre les enregistrements, allant jusqu'à plus de 103 cm de différence d'une heure à la suivante. De même, pendant l'hiver, le niveau de hauteur de neige est enregistré à son maximum durant plusieurs jours d'affilé. Ceci peut s'expliquer par la présence d'une pellicule de glace se formant sous le capteur.

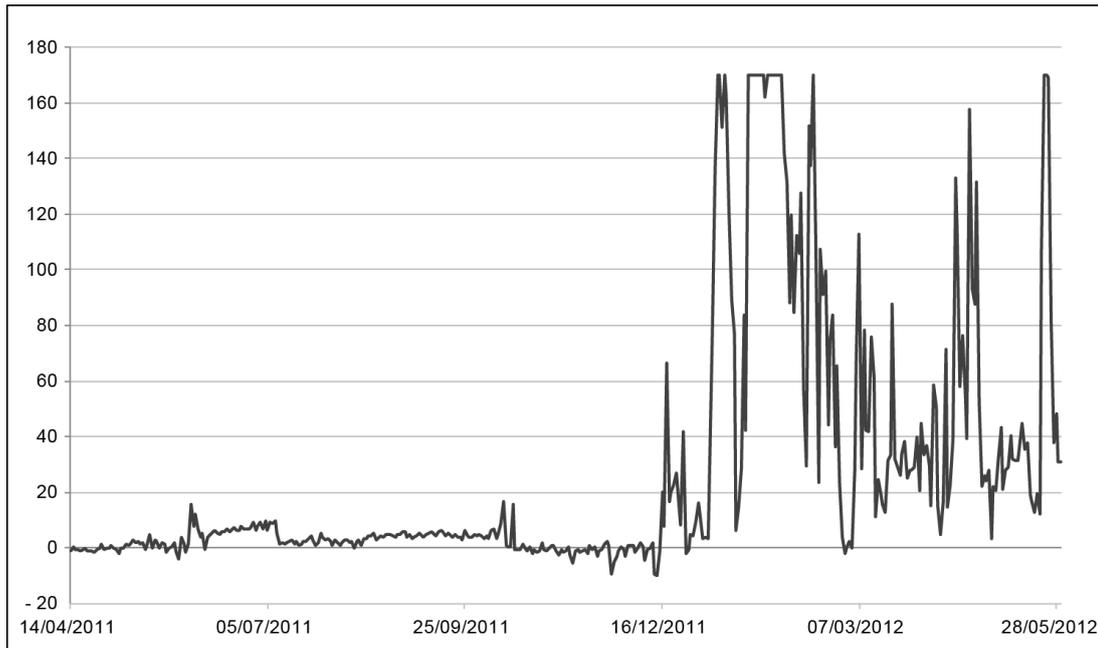


Fig. 89. Moyennes journalières des hauteurs de neige enregistrées sur la ravine du Petit Puy de Dôme entre le 14 avril 2011 et le 7 novembre 2012.

Les données de hauteur de neige (en centimètre), récoltées par la station météo temporaire mise en place à proximité de la ravine du Petit Puy de Dôme, ne sont pas utilisables, elles ne correspondent pas avec les observations *in situ*.

## 7.5. L'étude sur le comportement des randonneurs

Afin de suivre le trajet emprunté par les randonneurs sur la portion de sentier située au niveau du Col d'Enfer, nous avons réalisé des campagnes d'enregistrement vidéo afin de filmer l'ensemble du secteur depuis un point haut (sur le Puy Redon). Cette position haute a permis d'avoir une visibilité de l'ensemble du site sans influencer le comportement des randonneurs. Les enregistrements vidéo nous ont permis de définir les trajets préférentiels des randonneurs mais surtout de définir la pratique du hors-sentier sur ce secteur. De plus, l'installation de fils guide et de panneaux d'informations pendant cette étude montre un changement dans le comportement des randonneurs vis-à-vis de la pratique du hors-sentier. Ces informations sont essentielles à la compréhension de l'utilisation du site afin de pouvoir envisager l'évolution du sentier en lien avec la fréquentation du site, notamment avec l'apparition possible de nouvelles sentes. Cette étude permettra d'identifier les secteurs sur lesquels mettre l'accent pour d'éventuels aménagements futurs afin de limiter l'érosion anthropique.

Dans un souci de discrétion, nous avons filmé avec un appareil photo. La qualité des vidéos ne permettant pas une détection automatique des randonneurs, nous avons dû traiter manuellement les 8 heures de vidéo réalisées. Pour réduire le temps de traitement, il aurait probablement fallu réaliser des vidéos de meilleure qualité avec un caméscope de grande précision fixé sur un trépied, puis appliquer sur les vidéos une méthode de détection automatique par reconnaissance de pixel. Il aurait également pu être intéressant de réaliser d'autres campagnes d'enregistrement vidéo, en prenant notamment en compte les conditions météorologiques, très changeantes dans le Sancy et susceptibles de modifier le comportement des randonneurs.

## **Conclusion**

Comme nous l'avons souligné dans ce chapitre, les caractéristiques du terrain et les objectifs de l'étude, notamment en termes de précision et de résolution, vont déterminer le choix de la méthode (Fig. 90). La méthode de lasergrammétrie terrestre est adaptée à un terrain dégagé donnant la possibilité d'effectuer des scans depuis plusieurs points de vue afin de limiter les masques. Bien que contraignante et demandant un lourd traitement avec de nombreuses étapes (recalages et assembles des différents des nuages obtenus au cours d'un même relevé, post-traitement de l'ensemble, création d'une surface comparable aux relevés effectués à différentes dates) avant de pouvoir analyser les résultats (Fig. 91). Cette méthode, bien que restant un échantillonnage de la surface réelle, est celle qui permet la restitution la plus fidèle du terrain (possibilité de résolution centimétrique à infra-centimétrique). Les méthodes utilisant un GPS différentiel sont applicables à beaucoup de terrains du moment que la connexion satellitaire n'est pas perturbée (par la végétation ou le relief) et permet une résolution décimétrique (Fig. 90). Les données issues du GPS différentiel de mande un post-traitement peu chronophage, voire inexistant si un point de référence a été créé avant les relevés (Fig. 91). À partir des TIN créés, de nombreuses analyses sont possibles (calculs de surface et de volumes, extraction de profils et de transects). La méthode par relevé manuel, décimétrique à pluri-décimétrique, ne permet pas une analyse spatiale exhaustive du transfert de matière dans le sentier. En revanche, cette méthode est simple à mettre en place et ne

demande que peu de traitement avant de pouvoir exploiter les données sous forme de transect et de taux de tranches d'érosion (Fig. 91).

Les études climatologiques et les études sur le comportement des randonneurs apportent un complément d'informations utile à la compréhension de l'érosion des sentiers de randonnée au sein du Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne. Ainsi, l'étude climatique a apporté des arguments en faveur de la notion de saisonnalité du fonctionnement des sentiers de la Chaîne des Puys. Ces derniers suivent également une évolution saisonnière dans le Massif du Sancy, mais fonctionnent différemment de ceux de la Chaîne des Puys. L'étude sur le comportement des randonneurs a apporté des éléments permettant d'expliquer cette différence de rythmicité dans l'évolution des sentiers, ainsi que des éléments permettant de mieux comprendre la localisation de certaines formes d'érosion directement liées à la fréquentation touristique.

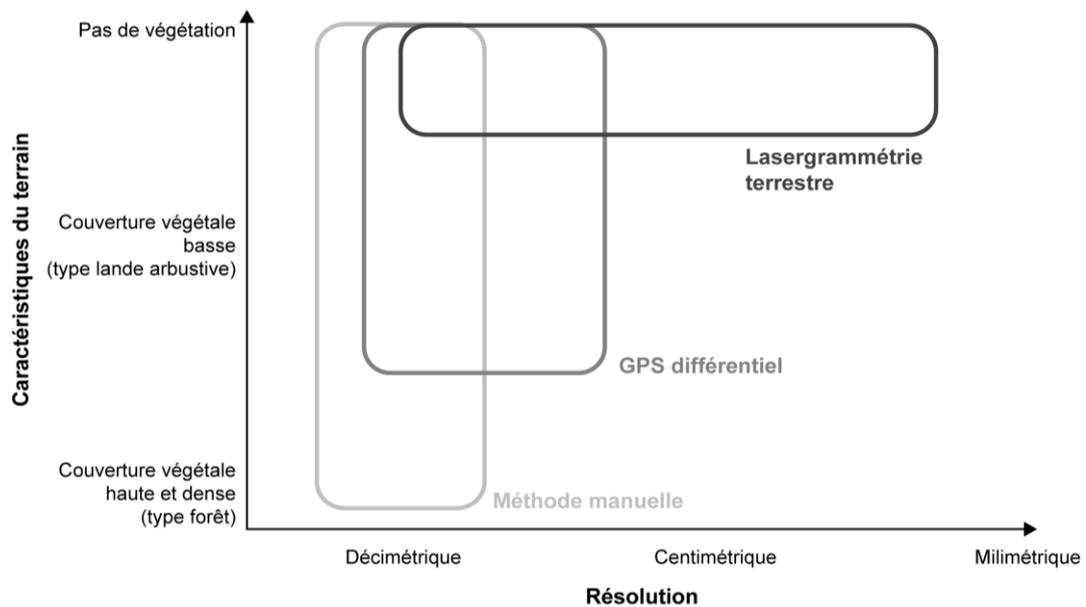


Fig. 90. Champs d'application des différentes méthodes de suivi topographique utilisées.

Ce graphique montre les résolutions que nous avons obtenues en fonction du type de végétation présent sur les terrains sur lesquels nous les avons appliquées. Le type de milieu (ouvert à fermé) a été le principal frein à l'utilisation de certaine méthode.

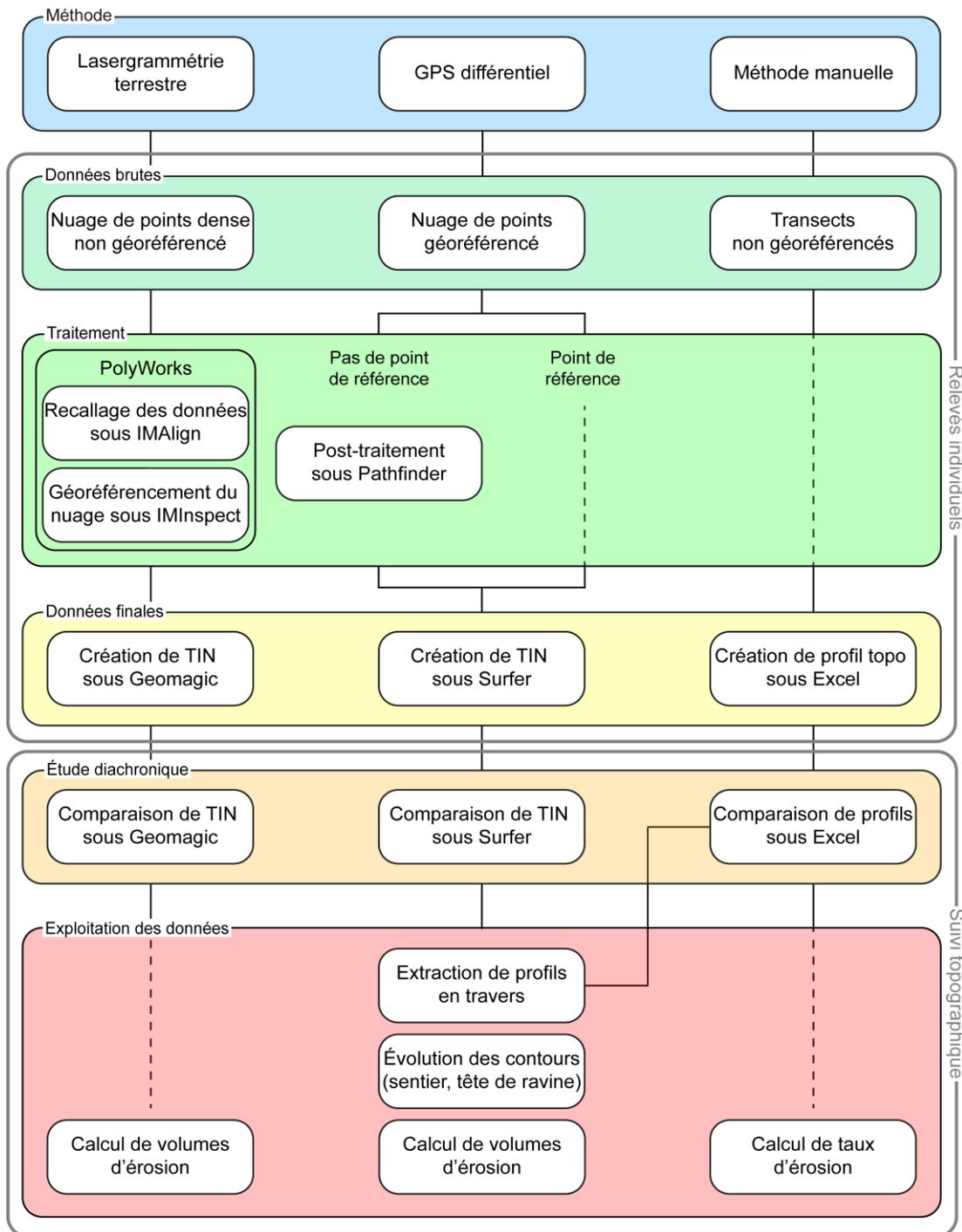


Fig. 91. Comparaison des types de données obtenues à partir des différentes méthodes utilisées pour le suivi topographique.

La lasergrammétrie demande un traitement relativement lourd. En utilisant un point de référence, la méthode utilisant un GPS différentiel se voit à léger de tout le volet post-traitement.



## **Chapitre 8 : Analyse des résultats par secteur d'étude**

Le suivi topographique réalisé dans le Massif du Sancy (secteur du Col d'Enfer et sentier sud-est du Sancy) a été effectué sur un an et demi, du printemps 2010 à l'automne 2011. Ces secteurs avaient déjà bénéficié d'une étude de la fréquentation touristique au cours de l'été 2009 (Bussière, 2009), que nous avons complétée avec une analyse du comportement des randonneurs sur le site du Col d'Enfer. L'objectif était de déterminer la part de randonneurs faisant du hors-sentier, et leur comportement vis-à-vis des aménagements de type fil guide et panneau signalétique.

Les secteurs d'étude situés dans la Chaîne des Puys sont ceux qui ont bénéficié d'une étude à plus long terme, 5 ans pour chacun des deux secteurs : d'avril 2006 à avril 2011 pour le sentier sud-est du Puy de Côme et d'avril 2007 à mai 2012 pour la ravine du Petit Puy de Dôme. Une étude climatique a également été réalisée sur ces secteurs et plus particulièrement sur la ravine du Petit Puy de Dôme avec l'installation d'une station météo temporaire qui a enregistré des données sur plus d'un an. Cette étude climatique a été couplée à une étude topographique du site afin de définir des variations topographiques en fonction des précipitations.

L'ensemble de ces études ainsi que les observations de terrain permettent d'envisager l'évolution de chacun des sites étudiés. Par la suite, en fonction des modèles d'évolution proposés, nous suggérerons quelques aménagements pour limiter l'érosion à venir.

### **8.1. Sites du Massif du Sancy**

#### **8.1.1. Sentier sud-est du Puy de Sancy**

Les comparaisons des MNT issus de la lasergrammétrie terrestre appliquée au sentier sud-est du Puy de Sancy montrent une érosion sur les parties rectilignes et une tendance à l'accumulation dans les virages du sentier. De plus, les bilans sédimentaires calculés sur ce secteur sont proches de zéro parce que les volumes de dépôt et d'érosion impliqués s'équilibrent. En effet, sur ce secteur, les taux de dépôt

sont de 4,85 m<sup>3</sup>/an contre 4,63 m<sup>3</sup>/an pour l'érosion (Tableau 5), soit respectivement des taux surfaciques moyen de 1,4 cm/an et 1,3 cm/an. Les lacets d'un sentier semblent donc avoir une influence pour limiter l'érosion. Alors que les parties rectilignes s'érodent classiquement par le biais du transit sédimentaire engendré par le ruissellement concentré et par la pression anthropique (déplacements de blocs par les randonneurs), les virages de ce sentier en lacet forment des seuils de stockage sédimentaire qui ralentissent la migration de la matière vers l'aval.

Les ravines, présentes de part et d'autre de la base de la pyramide du Sancy, sont affectées par des mouvements gravitaires. Leurs fortes pentes et leurs matériaux instables favorisent la formation et la migration de blocs depuis leurs flancs vers leur fond. C'est notamment le cas pour la petite ravine orientée nord que nous avons étudiée. Les murets en pierre, mis en place au fond de cette ravine par les gardes nature du PNRVA, maintiennent cet apport de sédiments et empêchent sa progression en contrebas. Sur ce secteur, les murets en pierre forment un dispositif anti-érosif efficace. Cependant, l'étude n'a pas été réalisée sur une échelle de temps suffisamment longue pour juger de l'efficacité à long terme du dispositif. Il est possible que les murets, régulièrement entretenus (rehaussement et consolidation), permettent à terme le comblement de cette petite ravine. Une re-végétalisation du fond de cette ravine, après un remplissage naturel conséquent formant une surface plane importante, pourrait permettre une stabilisation des sols.

Depuis les années 1980, le secteur est du Puy de Sancy a connu beaucoup de modifications (Fig. 92). Entre 1980 et 2009, une grande surface s'est végétalisée alors que de nombreuses sentes secondaires sont apparues. Ces dernières sont dues à l'importante fréquentation touristique et au fait que le sentier partant du Col de la Cabane et rejoignant l'arrivée du téléphérique du Mont Dore fait un large détour : 1,6 km par le sentier officiel et la piste de ski. En passant par le sommet du Sancy pour atteindre le téléphérique, les randonneurs doivent marcher sur une distance d'environ 1 km pour un dénivelé de 100 m en positif. Donc, pour éviter de revenir sur leurs pas ou pour réduire la distance et la difficulté de marche, certains randonneurs coupent à travers, favorisant ainsi l'apparition de nouvelles sentes (0,7 km de distance entre le Col de la Cabane et l'arrivée du téléphérique par certaines sentes secondaires qui ont tendance à suivre les courbes de niveau). Au vu du fort caractère anthropique de l'érosion de ces dernières années, il est difficile de prédire l'évolution de ce secteur.

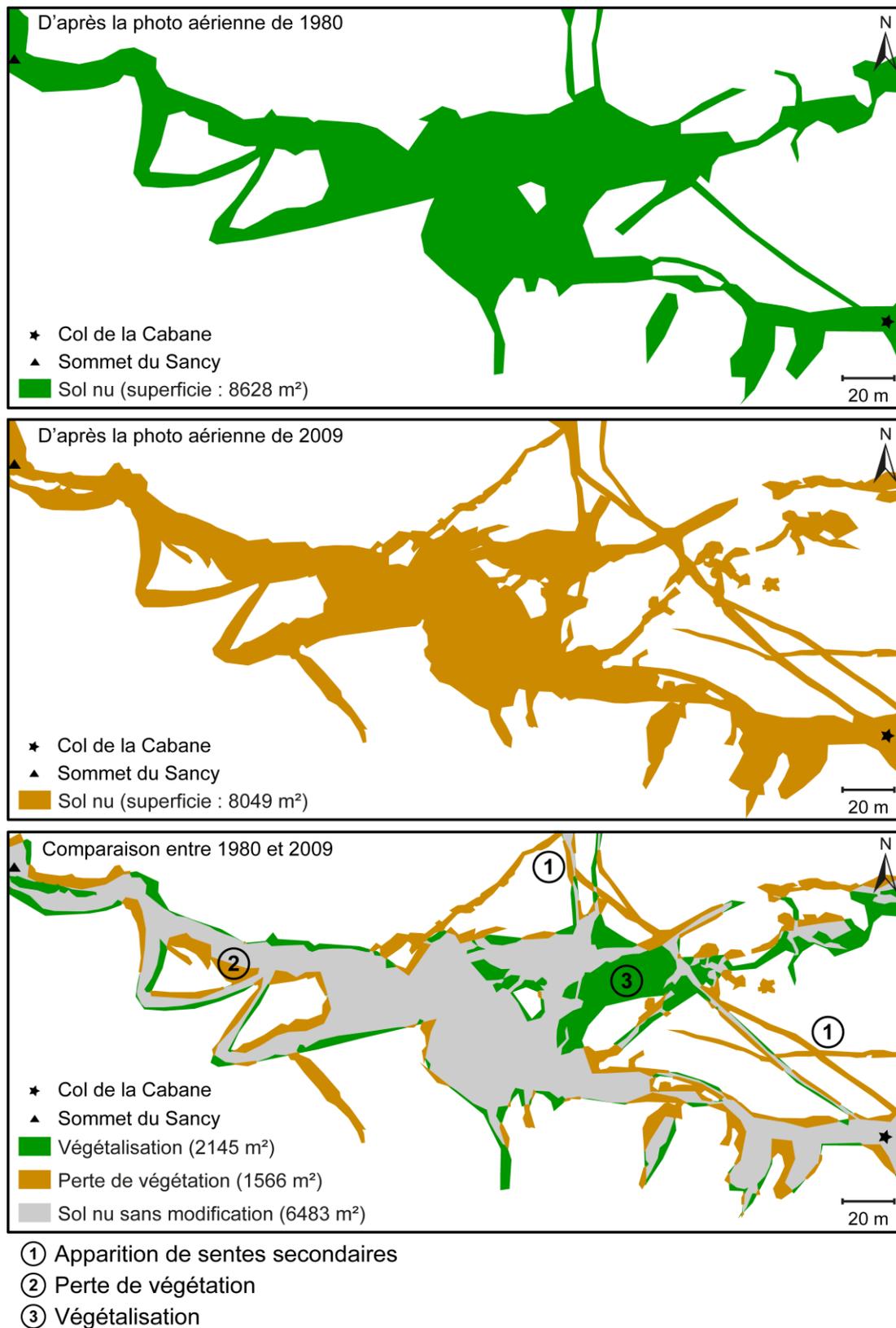


Fig. 92. Évolution des surfaces de sol nu entre 1980 et 2009 du secteur situé entre le sommet du Sancy et le Col de la Cabane.

## 8.1.2. Sentier du Col d'Enfer

### 8.1.2.1. Évolution du sentier

Au cours de notre étude, la superficie du sentier du Col d'Enfer a augmenté de 29,67 m<sup>2</sup>/an en moyenne (soit 9 %). Cette augmentation ne s'est pas faite de manière continue puisque, sur les deux étés et l'hiver étudiés, seuls les étés ont été affectés par cette augmentation (+ 31,8 m<sup>2</sup> pour le premier été et + 12,7 m<sup>2</sup> pour le second). L'hiver, une couverture neigeuse permanente recouvre le sentier sur une période d'environ 5,5 mois en moyenne. Le sentier est donc en quelque sorte protégé contre l'érosion pendant plusieurs mois. En revanche, l'été, non seulement l'érosion liée aux précipitations est à l'œuvre, mais le piétinement des randonneurs amplifie également le phénomène d'érosion. Par exemple, les randonneurs marchants sur la végétation bordière vont faciliter les basculements des mottes sur le sentier. Ils vont également avoir tendance à élargir les sentes secondaires nouvellement formées, qui ne sont pas encore ravinées, en piétinant de façon répétée la végétation qui va finir par dépérir.

Le bilan sédimentaire réalisé à partir des TIN du secteur du Col d'Enfer montre une tendance à l'accumulation pendant l'été (taux d'évolution surfacique : + 6,3 cm/an le premier été et + 8,9 cm/an le second, Tableau 8) et une tendance à l'érosion l'hiver (- 2,8 cm/an). Il y a un lien direct entre l'augmentation de la superficie du sentier l'été et l'accumulation observée : la matière érodée au niveau des berges du sentier et des îlots de végétation s'accumule sur le fond du sentier. Il est possible que les précipitations estivales au cours du suivi topographique n'aient pas été suffisamment fortes pour évacuer la totalité de cet apport de matière qui est en grande partie d'origine anthropique au sein du sentier. Cependant, il serait intéressant d'effectuer une étude à plus long terme pour valider cette hypothèse. De plus, les diagrammes ombrothermiques de Super-Besse et du Mont Dore affichent des précipitations beaucoup plus abondantes en hiver. Il est possible que ces précipitations hivernales soient suffisamment érosives pour affecter la topographie du sentier, comme le montrent les comparaisons de TIN que nous avons réalisés

(Fig. 60, Partie 3). Nos relevés de terrain sur le secteur du Col d'Enfer ont été réalisés fin octobre et fin mai. À 1700 m d'altitude, la couverture neigeuse est constante de début décembre à début mai (Fig. 20, Partie 2). Ces relevés, effectués avant et après l'hiver, couvrent donc une période d'environ un mois pendant laquelle il n'y a plus de manteau neigeux. Bien qu'elle soit courte, cette période enregistre une érosion sur le sentier du Col d'Enfer.

À partir de l'analyse de l'évolution de la bordure du sentier, il semble tout à fait raisonnable d'imaginer que les îlots de végétation centrale vont continuer à se réduire jusqu'à la disparition des plus petits, notamment celui situé le plus au nord (Fig. 93). Celui qui est situé le plus au sud montre un point de faiblesse sur la partie basse de sa structure, il est probable qu'une partie de cet îlot finisse par être séparée du reste. Dans tous les cas, la réduction de surface de ces îlots sera plus rapide sur leurs parties amont qui se situent quasiment au même niveau topographique que le sentier. Ils risquent donc d'être davantage piétinés par les randonneurs que les secteurs en aval qui montrent un dénivelé important avec le sentier.

Par temps humide, le sentier du Col d'Enfer est très glissant et donc difficilement praticable pour les randonneurs. Lors des enregistrements vidéo de l'étude du comportement des randonneurs, nous avons constaté que ces derniers ont tendance à faire le choix de marcher sur la végétation lorsque le sentier est difficilement praticable. Il est donc probable que de nouvelles sentes se forment, notamment pour rejoindre plus rapidement le haut du sentier et ainsi supprimer l'angle droit dessiné par le sentier actuel (Fig. 93).

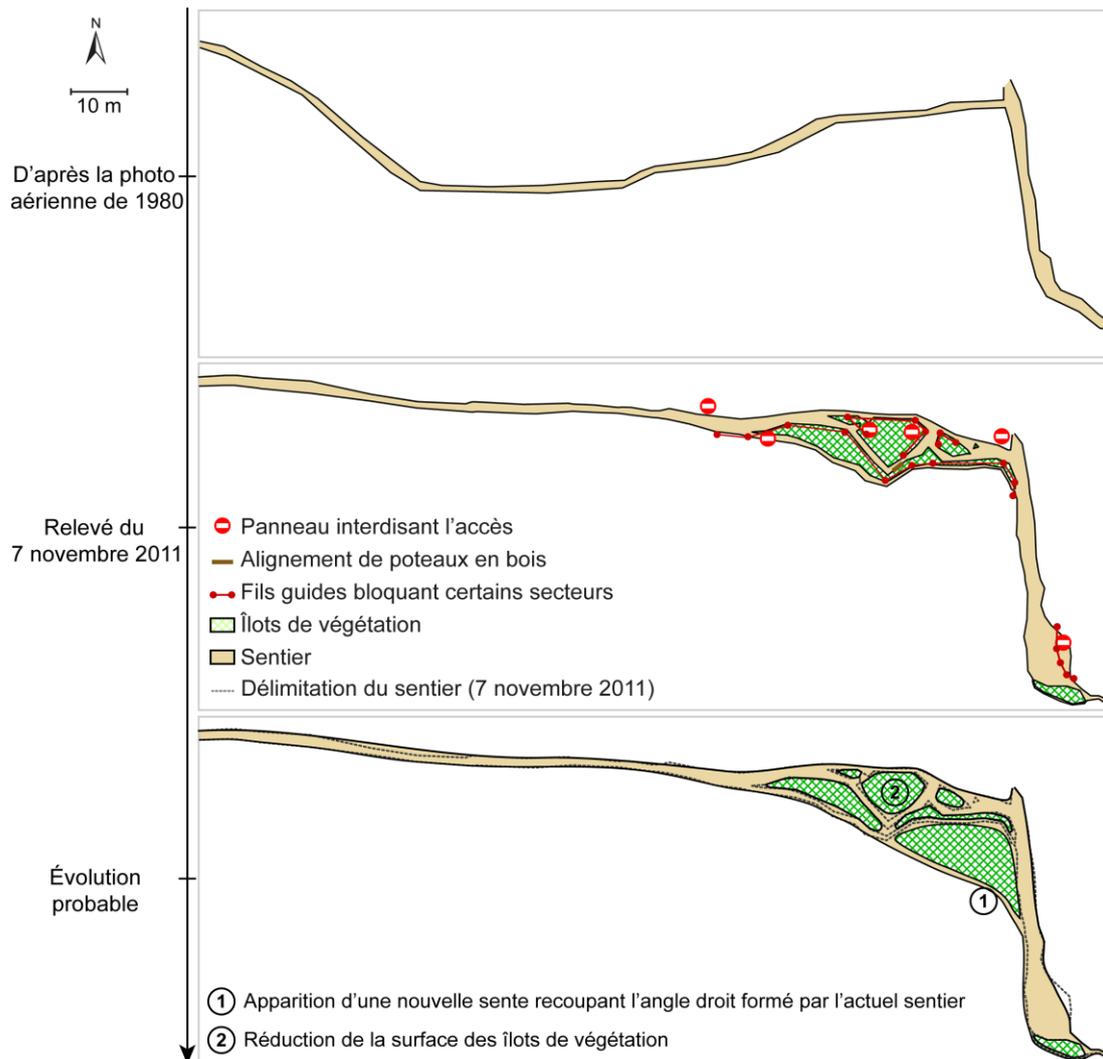


Fig. 93. Schéma prévisionnel de l'évolution du sentier du Col d'Enfer.

### 8.1.2.2. Comportement des randonneurs

D'une manière générale, les randonneurs ont tendance à appréhender les sentiers de randonnées comportant plusieurs sentes avec un « sens de circulation traditionnel ». Il ressort de notre étude que les randonneurs empruntent préférentiellement les sentes qui sont à leur droite. Ceci est d'autant plus vrai pour les personnes montant vers le sommet du Sancy. Cette tendance à marcher plus à droite se retrouve également pour les personnes faisant du hors-sentier.

Sur l'ensemble des parcours enregistrés au cours de cette étude (suivi de 690 randonneurs), 13,6 % des randonneurs effectuent du hors-sentier (Fig. 94). Ce pourcentage a été réduit de moitié après la mise en place des aménagements (fils guide, panneaux d'informations et d'interdiction, poteaux en bois pour soutenir

localement le bord du sentier) : il est passé de 9 % avant aménagements à 4,6 % après aménagements (calcul effectué sur le nombre total de randonneurs toutes périodes et tous trajets confondus). Les aménagements semblent donc avoir eu un impact positif sur le comportement des randonneurs.

En examinant ces résultats plus en détail, les aménagements, et notamment les fils guide, ont eu un réel impact sur les randonneurs descendant vers le Val de Courre. Sur cet itinéraire, une nette diminution du taux de personnes pratiquant le hors-sentier est observable : 5,7 % avant les aménagements contre 1 % après. Cette diminution est principalement localisée au niveau des îlots de végétation centraux. En revanche, la mise en place des aménagements ne semble pas avoir eu d'impact positif sur les randonneurs marchant sur la végétation extérieure du sentier, et ce malgré la présence de fils guides ou de panneau d'interdiction. La partie basse du sentier présente des sentes fortement ravinées et inconfortables à la randonnée, ce qui explique probablement pourquoi les randonneurs bravent certaines interdictions.

Il n'a pas été possible de le quantifier, mais un « effet de masse » de type « moutons de Panurge » est observable dans le comportement des randonneurs. Lorsqu'au moins une personne marche en dehors du sentier, les randonneurs allant dans la même direction vont être tentés de suivre le même chemin. De la même façon, un groupe de personnes randonnant ensemble vont avoir tendance à emprunter le même itinéraire même si plusieurs possibilités s'offrent à elles (sentes multiples par exemple).

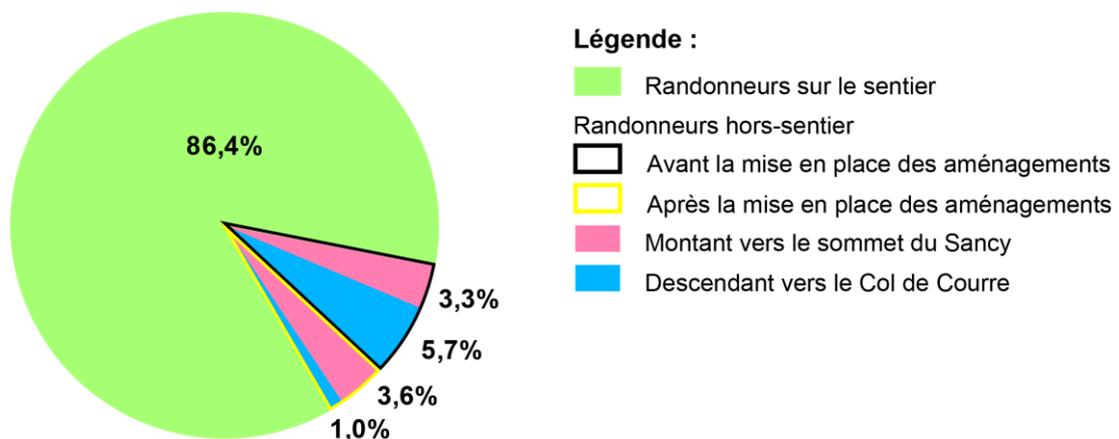


Fig. 94. Proportion de randonneurs marchant en dehors du sentier du Col d'Enfer. Sur l'ensemble des randonneurs suivis, 13,6 % pratique le hors-sentier. À mi-relevé, des aménagements visant à canaliser des randonneurs ont été mis en place, ce graphique montre l'évolution du comportement des randonneurs en fonction des aménagements.

## **8.2. Sites de la Chaîne des Puys**

### **8.2.1. Ravine du Petit Puy de Dôme**

#### **8.2.1.1. Des données actuelles vers l'évolution future de la ravine**

L'étude effectuée sur la ravine du Petit Puy de Dôme montre un recul continu des deux têtes de ravine (76 cm/an pour la ravine secondaire et 70 cm/an pour la ravine principale). Bien que le recul enregistré soit continu, il n'est ni constant dans le temps, ni identique sur les deux ravines emboîtées. En effet, le recul moyen des deux têtes de ravine est globalement plus important en période estivale qu'en période hivernale. De même, il est plus prononcé sur la ravine secondaire que sur la ravine principale. Cette dernière information est nuancée par la figure d'évolution des contours (Fig. 64, Partie 3) qui montre une activité plus importante au niveau de la ravine secondaire lors des derniers relevés, alors que le recul était plus fort sur la ravine principale lors des premiers relevés. Ceci tend à démontrer que l'activité érosive se déplace vers l'amont. Par ailleurs, il faut noter que lors des derniers relevés, nous avons remarqué la formation d'une rigole sur la partie est de l'amont du site, bien que cette rigole n'apparaisse pas sur les données topographiques du fait de sa faible profondeur (inférieure à la résolution des relevés). Cette modification topographique sur la partie haute de la ravine, associée à la déviation d'une partie de l'écoulement au-dessus de la ravine secondaire, ainsi que les dépôts observés sur le côté est de cette dernière ravine secondaire, nous laissent supposer qu'une nouvelle ravine pourrait se former parallèlement à celle que nous avons étudiée (Fig. 97).

Outre les évolutions du contour de la ravine, nous avons pu constater une certaine cyclicité dans le fonctionnement du fond de la ravine avec une tendance au remplissage du fond avec un apport de matériaux venant des versants de la ravine durant les hivers et une évacuation des sédiments pendant l'été. Cette « respiration » exprime l'intervention et la succession de processus morphogéniques différents d'une saison à une autre. Nous y reviendrons dans le paragraphe 8.2.3.

Afin de tenter de limiter l'érosion de ce secteur, et sur demande des propriétaires du Petit Puy de Dôme, les gardes nature du PNRVA ont mis en place deux fascines en bois sur le bas de la ravine au cours de l'été 2010. La première a été

placée entre le cône de déjection et la ravine principale. La seconde se situe sur le côté ouest, au niveau du bas de la ravine principale, en aval d'un secteur dépourvu de végétation. Au vu de nos dernières observations sur le terrain, il semblerait que la première fascine joue son rôle de rétention des sédiments (Fig. 96). En septembre 2015 un remplissage s'est opéré derrière celle-ci (Fig. 95), nous avons mesuré une épaisseur de sédiment de 30 cm à 1 m des bords de la fascine, et 52 cm au centre de la fascine. Ainsi, un volume de sédiment d'environ 3 m<sup>3</sup> s'est déposé derrière cette fascine en 5 ans, soit 0,6 m<sup>3</sup>/an, ce qui représente un dixième du taux d'érosion mesuré sur l'ensemble de la ravine, abstraction faite du cône de déjection (6,3 m<sup>3</sup>/an). Étant donné le déplacement de l'activité érosive sur l'est de la ravine et l'absence de dépôts derrière la deuxième fascine, cette dernière ne semble pas d'une grande utilité. La mise en place de ces aménagements ne pourrait que déplacer le problème et non le régler.



Fig. 95. Photos des fascines en bois mises en place à la sortie du cône de déjection de la ravine du Petit Puy de Dôme.

La fascine au premier plan a été mise en place pendant l'été 2010, celle qui se trouve derrière a été installée pendant l'été 2015.

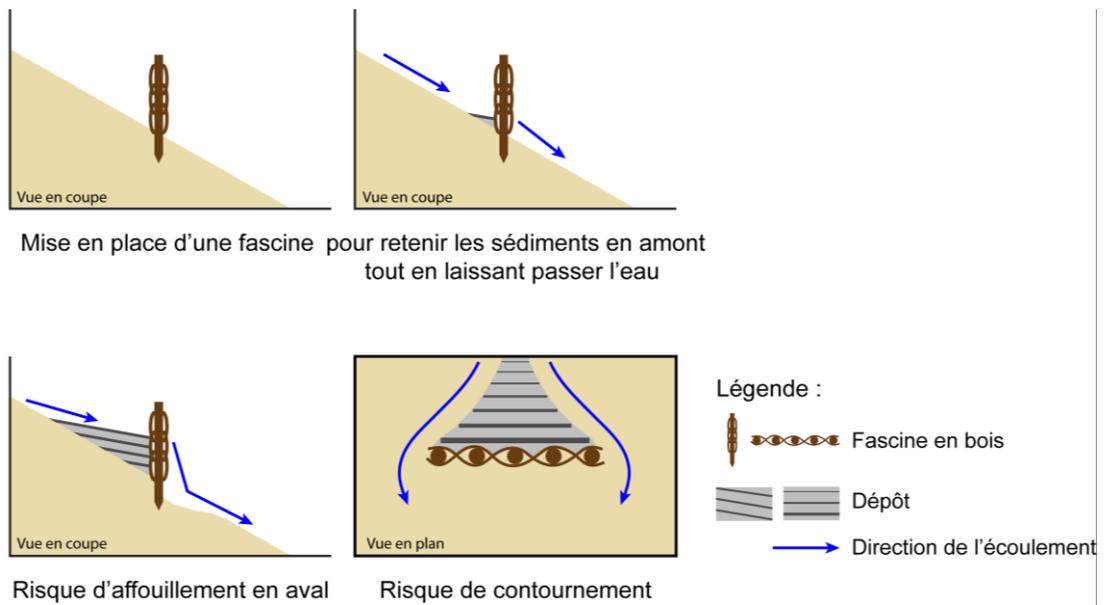


Fig. 96. Schéma du fonctionnement d'une fascine.

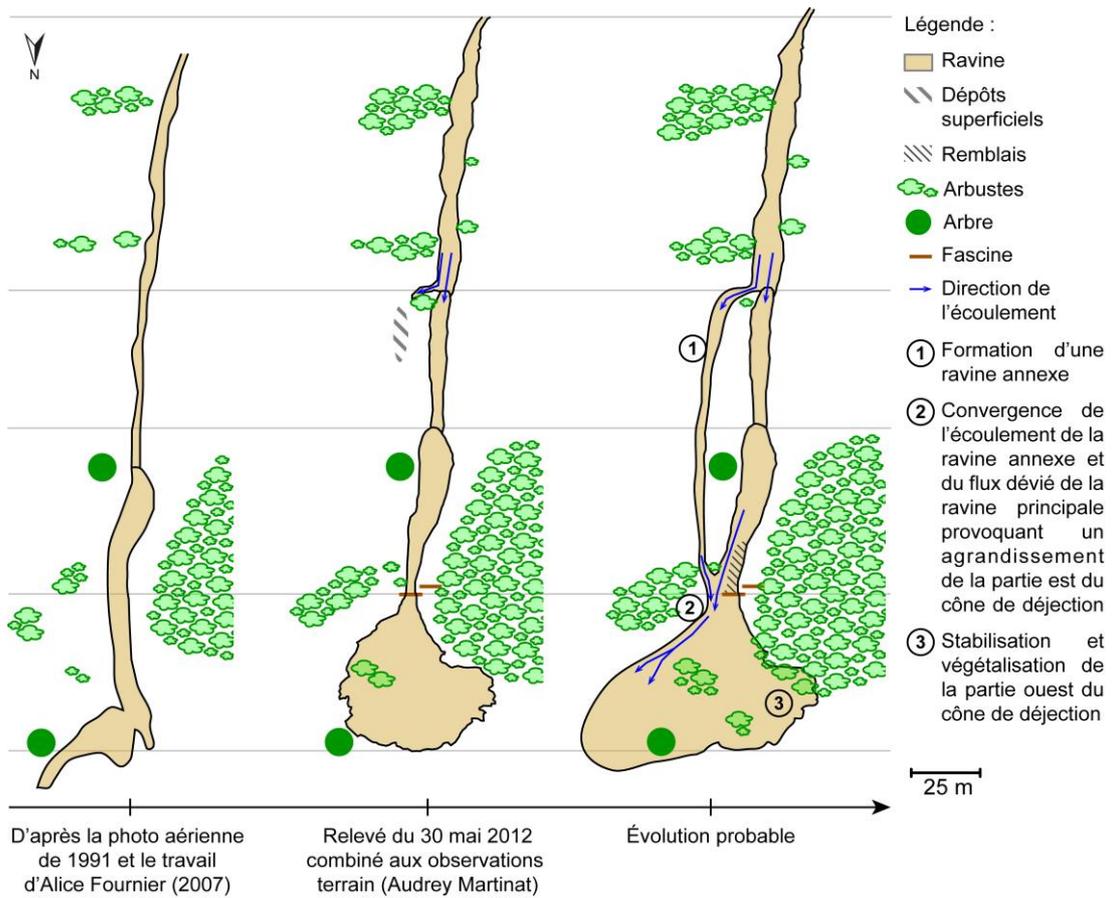


Fig. 97. Schéma prévisionnel de l'évolution de la ravine du Petit Puy de Dôme.

### 8.2.1.2. Comparaison avec l'évolution d'autres ravines en milieux de moyenne montagne

Nous avons répertorié quelques études conduites sur des ravines dans des milieux de moyenne montagne, en privilégiant les études ayant fourni des taux de recul de tête de ravine et des volumes d'érosion accumulation (Tableau 18). Les têtes de ravines situées sur des substrats meubles ou en climat très humide (climat de mousson, climat continental subhumide) subissent des taux d'érosion plus rapides que la ravine du Petit Puy de Dôme (recul de tête de ravine jusqu'à 17 fois plus rapide). Les ravines sous climat très humide ont tendance à afficher des volumes d'érosion très importants, même si les taux de retrait des têtes de ravine sont parfois assez faibles (Ghimire *et al.*, 2006). Les volumes mesurés dans la région des collines des Siwalik sont de 117 à 440 fois plus importants que ceux mesurés sur la ravine du Petit Puy de Dôme, mais les taux de recul sont identiques voire légèrement inférieurs. Outre le paramètre climatique, le contexte de soulèvement tectonique de la région des Siwalik peut également expliquer les importants volumes enregistrés. Le taux de soulèvement de ce secteur est de 0,8 à 1,2 mm/an (Lavé et Avouac, 2000). En réponse à ce soulèvement, l'incision supplante largement l'élargissement et le recul des versants extrêmement pentus.

Bien que les ravines roumaines étudiées par Ionita (2006) affichent les taux de retrait et les volumes les plus importants (2778,7 m<sup>3</sup>/an), il faut noter que, sur les 30 ans de suivi, les dix dernières années montrent une diminution significative du taux de retrait des têtes de ravines (le taux de retrait est 4 fois moins important dans les années 1980 que dans les années 1960). Sous des climats plus secs comme celui du sud-est de l'Espagne, l'érosion des ravines semble plus faible (4 m<sup>3</sup>/an d'érosion pour un recul de tête de ravine de 0,1 m/an), même sur des substrats relativement tendres, notamment marneux (Vandekerckhove *et al.*, 2001).

Franckl *et al.* (2012) mettent en évidence une diminution de l'érosion après des travaux de conservation de l'eau et de stabilisation des ravines (Nyssen *et al.*, 2004) près de la ville de Mekelle, au nord de l'Éthiopie. Le taux de recul des têtes de ravine passe de 3,8 m/an à 0,34 m/an après les travaux, et le volume moyen de sédiments érodés de 47,7 m<sup>3</sup>/an à 5,2 m<sup>3</sup>/an. Ainsi, les aménagements effectués semblent avoir

eu un impact positif sur l'érosion qui a quasiment été divisée par dix en termes de volume et de recul de têtes de ravine. Cependant, ces résultats post-aménagement ont été obtenus sur une seule saison des pluies, c'est-à-dire entre juillet et septembre 2010, ce qui en relativise la portée (Franckl *et al.*, 2012).

Il faut également souligner que comparée à ces autres ravines, celle du Petit Puy de Dôme occupe une surface réduite (de 50 à 5000 fois plus petite, *cf.* Tableau 18). Les taux d'érosion estimés en termes de volume sont donc relativement importants si on les ramène à la faible surface affectée. La ravine du Petit Puy de Dôme représente donc un stade de ravine jeune à évolution rapide. Son rapport entre taux d'érosion ( $\text{m}^3/\text{an}$ ) et surface ( $\text{km}^2$ ) est en fait plus élevé que les ravines de Roumanie (Ionita, 2006) ou de l'Iowa (Thomas *et al.*, 2004), à l'exception de celles Siwaliks (Ghimire *et al.*, 2006).

<b>Autres ravines dans le monde</b>	<b>Type de substrat</b>	<b>Type de climat</b>	<b>Durée d'observation</b>	<b>Recul moyen de tête de ravine (m/an)</b>	<b>Volume moyen de sédiments érodés (m<sup>3</sup>/an)</b>	<b>Surface (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Référence</b>
Plateau de la Moldavie à l'est de la Roumanie (13 ravines)	Argilo-sableux	Continental tempéré	30 ans 1961-1970 1971-1980 1981-1990	12,5 19,8 12,6 5,0	2778,7	7,28	Ionita, 2006
Nord-est de la Chine (5 ravines)	Sol noir sur dépôts fluviaux	Continental subhumide	2 ans	6,2	729,1	–	Hu <i>et al.</i> , 2007 Wu <i>et al.</i> , 2008
Nord de l'Éthiopie (18 ravines)	Grès et calcaires	Semi-aride	27 ans (moyenne) de 3 à 47 ans	3,8 (moyenne) de 0,53 à 18,4	47,7 (moyenne) de 1,3 à 425,4	16,72	Nyssen <i>et al.</i> , 2002 Frankl <i>et al.</i> , 2012
Ouest de l'Iowa aux États-Unis (1 ravine)	Loess	Continental	36 ans	2,8	255,6	0,3	Thomas <i>et al.</i> , 2004
Région des collines Siwalik Est du Népal (3 ravines)	Grès, argiles et conglomérats non consolidés	Climat de mousson (soulèvement tectonique)	28 ans	0,48 à 0,73	738 à 2783	0,018	Ghimire <i>et al.</i> , 2006
Ravine du Petit Puy de Dôme France (1 ravine)	Dépôts scoriacés	Montagnard à forte influence océanique	5 ans	0,73	6,3	0,0036	Martinat, ce travail
Sud-est de l'Espagne (46 ravines)	Marnes et calcaires marneux	Méditerranéen semi-aride	2 ans	0,1	4	17,35	Vandekerckhove <i>et al.</i> , 2001

Tableau 18. Taux d'érosion des ravines dans le monde : éléments de comparaison.

### 8.2.2. Sentier sud-est du Puy de Côme

De manière générale, comme sur la ravine du Petit Puy de Dôme, une alternance dépôt/accumulation au fil des saisons hivernales et estivales est enregistrée sur le sentier sud-est du Puy de Côme. Outre cette « respiration » du fond du sentier, l'ensemble de ce dernier est généralement sujet à l'érosion depuis les premiers relevés en avril 2006.

Cependant, bien que la plupart des transects montrent une érosion significative ou une tendance à l'érosion, certains transects affichent quant à eux une tendance à la stabilisation. C'est notamment le cas pour les transects 13 et 14 : l'encaissement du sentier au niveau de ces derniers a atteint une couche stratigraphique cendreuse plus indurée et imperméable. Les faibles accumulations qui y sont parfois enregistrées, correspondent à de la matière en transit vers l'aval du sentier. Tant que cette couche sera préservée, cette portion de sentier ne devrait pas s'en trouver modifiée, ou du moins pas incisée (Fig. 98, transect 13).

Rappelons que lors des premiers relevés (avril 2006 et octobre 2007), 21 transects avaient été mesurés. N'ayant pas retrouvé les piquets matérialisant les bords du 21<sup>e</sup> transect (le plus en aval) lors de notre première campagne de terrain (novembre 2009) et puisque le cône de déjection était relativement proche du transect 20, nous avons supposé que ce dernier transect avait été rempli, entraînant une croissance du cône de déjection vers l'amont. De la même façon, nous émettons l'hypothèse d'un comblement progressif des transects les plus en aval avec des phases de dépôt successives lors des années à venir (Fig. 98, transect 20).

Le sentier étant rectiligne et parallèle à la pente la plus forte, il favorise la concentration des eaux de pluie. Les transects qui n'ont pas de caractéristiques spécifiques, telles qu'un substrat différent ou une position proche du cône de déjection, continueront à fonctionner comme nous l'avons observé dans nos relevés. Malgré cette alternance saisonnière d'érosion et d'accumulation, l'érosion l'emportant sur l'accumulation, le sentier devrait continuer à s'inciser et à s'élargir. Les transects les plus en amont (transect 1 à 6), qui ne sont pas sous couvert forestier, seront d'autant plus affectés par l'érosion.

Bien que ce sentier ait été interdit à la randonnée en 2002, l'érosion a continué à l'affecter. L'arrêt de la fréquentation du sentier n'a pas suffi à stopper la dynamique érosive sur ce secteur. Passé le franchissement d'un certain seuil, il semblerait qu'il n'y ait plus de résilience possible, l'importante perturbation du milieu ayant irrémédiablement modifié son fonctionnement.

Ces observations soulèvent la question d'une éventuelle évolution morphologique du sentier en ravine : dans quelles circonstances passe-t-on de l'un à l'autre ? Selon Neboit (1991), « la ravine est une incision durable, qui comporte un fond assimilable à un talweg, le long duquel l'écoulement exerce un creusement périodique, et des flancs qui font moins figure de berges que de versants en réduction, soumis à leur propre dynamique, irréductible à celle du chenal d'écoulement comme à celle de l'espace qui les environne ». Bien qu'au niveau de certains transects le fond puisse être assimilable à un talweg (transect 15 par exemple), ce n'est pas tout à fait le cas des transects situés plus en amont. Cependant, l'écoulement est parfaitement canalisé dans le sentier (ou plutôt ex-sentier). La dynamique latérale (ex. chutes de mottes de sol suite à l'affouillement) est encore intimement liée à l'incision du talweg et s'assimile davantage à un fonctionnement de type berge plutôt qu'à un versant. Ce secteur pourrait ainsi représenter un stade intermédiaire entre un sentier et une ravine.

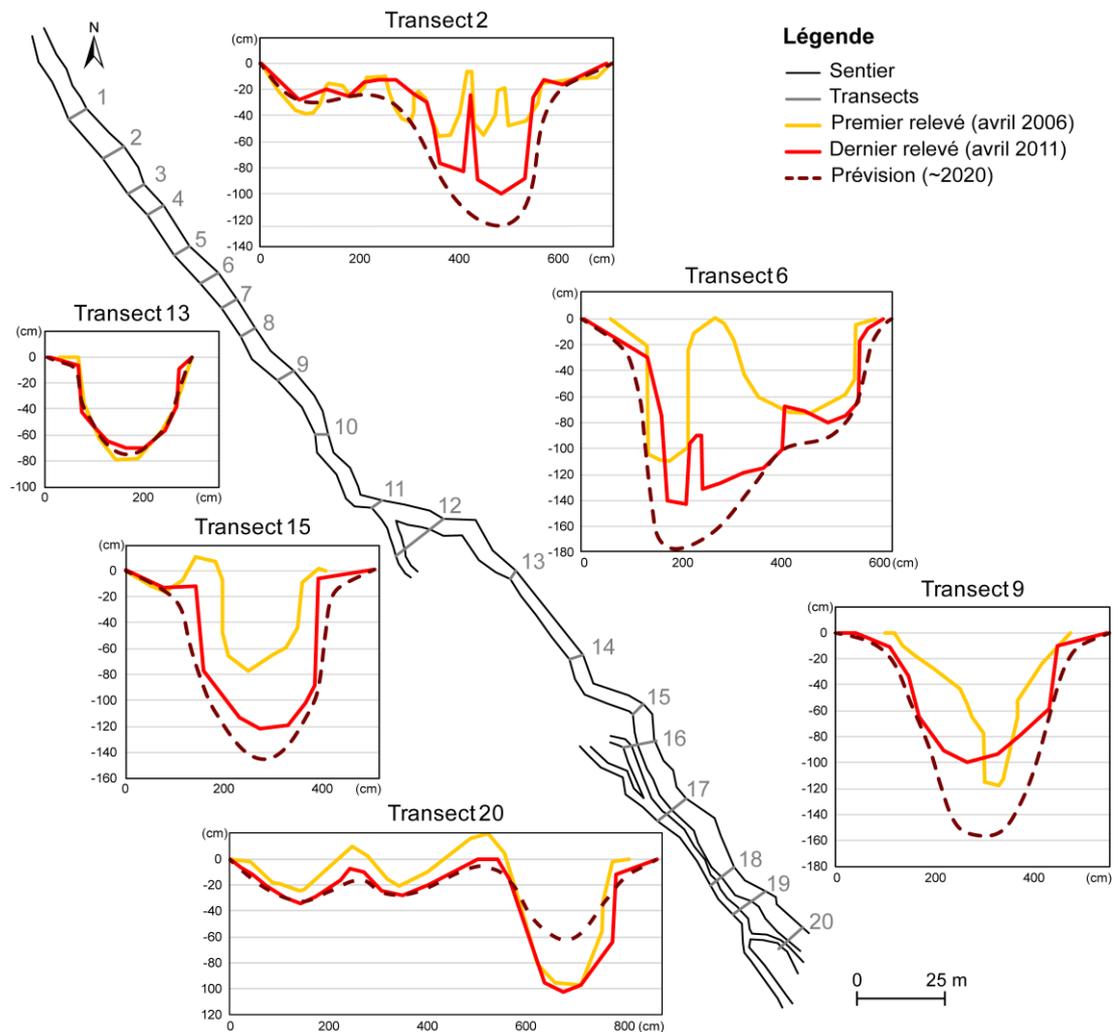


Fig. 98. Évolution prévisionnelle des transects du Puy de Côme.

Dans la littérature, beaucoup d'articles font état des différentes méthodes de relevés manuels utilisant des transects ou les comparent avec d'autres méthodes de suivi des sentiers de randonnée. De même, plusieurs articles présentent ainsi un état des lieux des sentiers à un instant donné. Rares sont les chercheurs ayant effectué un suivi d'érosion avec cette méthode.

Yoda et Watanabe (2000), qui ont effectué un suivi d'érosion à moyen terme, trouvent des taux d'érosion surfacique plus de trois fois moins élevés que les nôtres (Tableau 19). Il faut préciser que la période d'enneigement de leur secteur est beaucoup plus longue (couverture neigeuse constante d'octobre à mai). Une autre différence notable avec notre secteur d'étude est le fait que, dès le début de nos relevés, le sentier sud-est du Puy de Côme était interdit à la randonnée ; il n'est donc plus soumis à l'érosion anthropique, contrairement au sentier du parc national

Daisetsuzan, situé à Hokkaido au Japon (Yoda et Watanabe, 2000). Le taux d'érosion moyen de Cole (1983) calculé sur le sentier Big Creek dans le désert Selway-Bitterroot est nettement inférieur au notre. De plus, l'accumulation y surpasse parfois l'érosion. Il en conclut que ce sentier est dans l'ensemble relativement stable, seules quelques portions sur les 27 km ayant connu une érosion significative (Cole, 1991). Au niveau de la gestion de ce secteur, Cole (1991) suggère donc de mettre l'accent uniquement sur les quelques secteurs ayant des problèmes spécifiques de dégradation. Les recherches menées sur les sentiers du Parc National de Guadalupe Mountains en arrivent au même constat mais nuancent leurs conclusions en raison de la courte durée de leur étude (Fish *et al.*, 1981). Étant donné que le sentier montre des signes de dégradation malgré les résultats obtenus, ils émettent l'hypothèse que la courte période de relevé ait biaisée les résultats en enregistrant une période favorable au dépôt qui ne serait pas représentative d'une étude sur le long terme.

Parmi les études réalisées sur les sentiers de randonnée avec la méthode des transects, nos résultats affichent des taux nettement supérieurs à ceux relevés dans la littérature (Tableau 19). Ceci est un argument supplémentaire pour étayer l'hypothèse que le secteur sud-est du Puy de Côme est en passe de devenir une ravine.

Sentiers	Type de substrat	Type de climat	Durée d'observation	Taux d'érosion moyen (cm <sup>2</sup> /an)	Référence
Sentier sud-est du Puy de Côme	Dépôts scoriacés	Montagnard à forte influence océanique	5 ans	1700	Martinat, ce travail
Parc national Daisetszan Japon du Nord	Dépôts volcaniques de type cendre et matériel pyroclastique	Montagnard prononcé	7 ans	286 à 539	Yoda et Watanabe, 2000
Sentier Big Creek Montana, États-Unis	Métamorphique	–	2 ans	42	Cole, 1983 Cole, 1991
Parc National Guadalupe Mountains Texas, États-Unis	Calcaire	Semi-aride	17 mois	- 484,1 (dépôt)	Fish <i>et al.</i> , 1981

Tableau 19. Taux d'érosion des sentiers, calculés par la méthode des transects, dans le monde : éléments de comparaison.

### 8.2.3. Saisonnalité du fonctionnement des sentiers de la Chaîne des Puys

Au niveau des secteurs étudiés dans la Chaîne des Puys, le climat se caractérise par des hivers plutôt secs et frais avec un cumul de précipitations moyen de 335 mm et 63 cycles de gel-dégel en moyenne sur l'ensemble de notre période d'étude. Les étés, très orageux, sont plus humides avec 537 mm de précipitations cumulées en moyenne, sur la période des relevés de terrain. Cette saisonnalité climatique engendre une alternance saisonnière des processus morphogéniques, qui se traduit par une rythmicité des variations topographiques.

Les températures négatives, et surtout les cycles gel-dégel, favorisent la déstructuration du sol. Lorsque le gel est intense, des pipkrakes se forment et ameublissent la partie superficielle du fond des ravines/sentiers (Fig. 99). Les parois plus ou moins pentues n'échappent pas à ces processus qui mobilisent et trient des sédiments et déstructurent la partie superficielle du sol. La végétation aux abords du sentier a tendance à protéger cette partie superficielle du sol avec son système racinaire. L'érosion des flancs se fait donc par affouillement sous le système racinaire. Les périodes d'incision entraînent en effet une dynamique rétrogressive de rééquilibrage des versants / berges. Lorsque le poids de la motte en surplomb devient trop important pour être retenu par les racines, elle bascule progressivement pour finir par chuter. L'ensemble des matériaux désagrégés sur les parois latérales s'accumule au bas des parois par mouvement de masse ou par ruissellement dû aux fontes nivales et aux précipitations hivernales. Toute cette matière se sédimente au fond de la ravine. Ce remplissage se fait sur l'ensemble des ravines/sentiers, mais est accentué sur les parties situées sous les têtes de ravine. Hu *et al.* (2007) parlent alors de processus « d'ajustement interne » des ravines dû aux cycles gel-dégel et à la fonte nivale.



Fig. 99. Indices de processus érosifs hivernaux sur la ravine du Petit Puy de Dôme. Les photos ont été prises le 28 octobre 2010. La photo de gauche représente des pipkrakes. La photo de droite montre des mottes basculées de végétation et sol. Ces mottes basculées sont le résultat d'un relai de processus. L'érosion des orages de fin d'été prépare le terrain et dégage.

Durant la saison des orages d'été, les précipitations abondantes sur des temps courts provoquent des écoulements suffisamment énergiques pour évacuer les matériaux accumulés au fond des sentiers/ravines lors de la saison hivernale. Une fois ces matériaux purgés, l'érosion liée au ruissellement concentré entraîne une incision du fond des ravines/sentiers. Nos secteurs d'étude étant situés sur des terrains scoriacés meubles, l'incision peut être importante (Fig. 100). Les processus érosifs liés aux précipitations orageuses d'été affectent l'ensemble des secteurs (Fig. 100). Certaines périodes estivales sont plus propices à l'érosion que d'autres ; par exemple, les relevés de fin d'été 2007 montrent une érosion très forte à la fois sur le Petit Puy de Dôme et sur le sentier sud-est du Puy de Côme. Notons que c'est au cours de l'été 2007 que le plus fort cumul de précipitations (632,8 mm) a été enregistré sur la période du suivi topographique des deux secteurs. Sur cette même période, l'incision maximale enregistrée sur les transects du Puy de Côme a été de plus d'1,20 m (transect 6, Fig. 76, Partie 3), d'1,70 m sur la ravine du Petit Puy de Dôme, le profil en long de la ravine principale enregistre une incision d'1,70 m (Fig. 66, Partie 3).

Concernant les précipitations de type orageux, des études en laboratoire (Römkens *et al.*, 2002) ont montré que des pluies torrentielles décroissantes (de 60 mm/h à 15 mm/h) ont un impact érosif plus important sur une surface initialement sèche que des pluies d'intensité croissantes. Ceci pourrait expliquer que malgré des

taux de précipitations importants certains étés, les effets se font moins ressentir sur les évolutions topographiques.



Fig. 100. Marques d'érosion estivale photographées après l'été 2010. Une incision est visible sur les deux têtes de ravine, même si la tête de ravine principale montre une incision plus forte. Une rigole temporaire s'est dessinée en aval de la fascine en bois installée entre la ravine principale et le cône de déjection.

### 8.2.3.3. Un processus cyclique en faveur de l'érosion

L'idée d'un processus cyclique dans l'érosion des sols revient régulièrement dans les articles traitant de l'érosion des ravines (Ionita, 2006 ; Hu *et al.*, 2007 ; Rodzik *et al.*, 2009), ou de l'érosion des sentiers (Tomczyk et Ewertowski, 2013).

En effet, durant les hivers, les ravines et sentiers fortement ravinés affectés par des processus « d'ajustement interne » (Hu *et al.*, 2007), voient leurs fonds s'exhausser quand leurs berges s'élargissent afin de réduire leur pente (Fig. 101). En revanche, la forte énergie de ruissellement concentré, libérée par les pluies orageuses d'été, provoque le désengorgement des dépôts hivernaux du fond de ces secteurs (Rodzik *et al.*, 2009). Une fois les dépôts hivernaux évacués, le ruissellement concentré incisera le fond des secteurs ravinés, augmentant ainsi la pente des berges (Fig. 101). Au final, une fois la ravine mise en place, ce fonctionnement cyclique s'auto-alimentera.

En revanche, Allée (2003) remarque que le bilan sédimentaire de la ravine de l'Aubaret, située sur les hautes terres granitiques cévenoles (Mont Lozère, France), ne s'équilibre pas sur un cycle annuel. Il explique qu'une dynamique de stockage caractérise les années modales mais que ce bilan s'inverse à la suite d'épisodes pluvieux exceptionnels. La ravine est alors affectée par une dynamique d'incision (Allée, 2003).

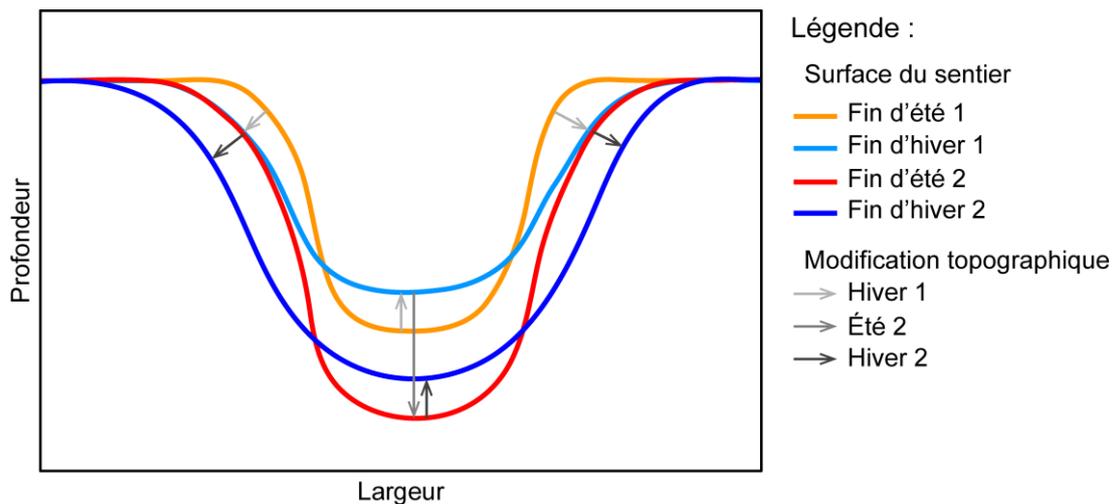


Fig. 101. Évolution générale saisonnière d'un sentier/ravine formé dans un substrat de type scoriacé de la Chaîne des Puys.

## Conclusion

Les secteurs étudiés dans la Chaîne des Puys, exempts de fréquentation touristique, nous ont montré que l'érosion « naturelle » opérant suivant un cycle saisonnier. L'hiver, les ravines/sentiers sont affectés par des processus d'ajustement interne ; les nombreux cycles gel-dégel affectant les sentiers ainsi que les épisodes de fontes du manteau neigeux occasionnel favorisent une accumulation sur le fond des sites étudiés et un élargissement de leurs berges. À l'opposé, les fortes précipitations estivales provoquent un ruissellement qui évacue le dépôt hivernal et incise les sentiers qui se transforment souvent en ravines. Sans intervention humaine, il semblerait que ce cycle s'auto-entretienne, avec tout de même des variations dans l'ampleur du phénomène, en fonction de la variabilité interannuelle du climat.

Cependant, lorsque les sentiers sont soumis à une fréquentation touristique importante, ce cycle saisonnier est remis en question, même pour les sentiers présentant un stade de dégradation moins avancé que ceux étudiés dans la Chaîne des Puys. Ainsi le principal facteur engendrant l'érosion des sentiers n'est plus le seul climat, mais une combinaison des facteurs climatiques et anthropiques. Le taux de fréquentation et le comportement des randonneurs vont entraîner une dégradation importante du site. Le piétinement répété des randonneurs pratiquant le hors-sentier favorisera la perte de végétation et la création de nouvelles sentes. Ces sentes,

souvent rectilignes et très pentues, risquent d'engendrer un ruissellement concentré provoquant à terme un ravinement.

Afin de limiter l'apparition de nouvelles formes d'érosion, les gestionnaires mettent en place des aménagements à l'intention des randonneurs (les canalisant ou les informant) ou des aménagements visant à limiter l'action du ruissellement. Globalement, la mise en place d'aménagements sur les secteurs étudiés a eu des impacts plutôt bénéfiques. Cependant, la position des aménagements est d'une importance capitale pour le bon fonctionnement de ces derniers, un mauvais positionnement pouvant entraîner un déplacement du problème et non sa résolution. Une bonne compréhension des rythmes et processus érosifs et du comportement des randonneurs permet de choisir judicieusement l'emplacement et le type d'aménagements à mettre en place, sur les sentiers.

## **Chapitre 9 : Enseignements généraux et préconisations de gestion**

La diversité de nos secteurs d'étude, qui vont du sentier bien dessiné avec des taux d'érosion faibles entre le sommet du Sancy et le Col de la Cabane jusqu'à des sites où l'érosion semble irréversible comme la ravine du Petit Puy de Dôme, nous fournit une vision générale des sentiers de moyenne montagne auvergnate et de leurs évolutions potentielles. À partir de toutes les informations recueillies au cours de cette thèse, nous allons tenter de faire une synthèse des modalités d'évolution des sentiers et de leurs facteurs de contrôle, afin d'apporter des éléments d'information aux gestionnaires permettant de limiter la dégradation des sentiers, notamment en contexte de forte fréquentation touristique.

### **9.1. Du sentier à la ravine : une évolution sous contrainte climato-anthropique**

Les résultats obtenus sur le sentier sud-est du Sancy et celui du Col d'Enfer et ceux obtenus sur la ravine du Petit Puy de Dôme et sur le sentier sud-est du Puy de Côme montrent des différences. De manière générale, les secteurs du Sancy montrent une tendance à l'accumulation entre les relevés de milieu de printemps et ceux d'automne et une tendance à l'érosion entre les relevés de milieu d'automne et ceux de printemps. En revanche, les sentiers de la Chaîne des Puys indiquent des résultats opposés. Étant donné que ces derniers ont bénéficié d'une étude plus longue (5 ans contre 1,5 an pour les sentiers du Massif du Sancy), il est possible que les études réalisées dans le Sancy n'aient pas été faites sur un temps suffisamment long pour obtenir des résultats généralisables, et nous aurions possiblement observé une évolution morphologique remarquable. Cependant, une autre hypothèse est envisageable. La fréquentation touristique, étant une des différences majeures entre ces secteurs, pourrait expliquer cette apparente contradiction. Les sites de la Chaîne des Puys sont interdits à la randonnée et sont donc très peu fréquentés, alors que les secteurs du Massif du Sancy connaissent des pics de fréquentation importante

comme l'avait déjà démontré Julie Bussière (2009) (le PNRVA estime que 60000 randonneurs empruntent chaque été le sentier sud-est du Sancy). Or, nous avons mis en évidence, sur le secteur du Col d'Enfer, une augmentation de la surface du sentier au cours de notre période estivale inter-relevé, causée par une diminution de la surface des îlots de végétation ainsi qu'un recul des berges du sentier. La matière apportée par les berges et les îlots de végétation migre vers l'aval du sentier. Cependant, il est possible que les précipitations estivales, ou du moins celles qui se produisent avant la date des relevés topographiques d'automne, ne soient pas suffisamment puissantes pour évacuer l'ensemble de cette matière avant nos relevés. Notons que les mois possédant les plus forts cumuls de précipitations dans le Massif du Sancy sont les mois de novembre et décembre (Fig. 102). Or nos relevés d'avant hiver ont eu lieu début octobre et début novembre pour le secteur du Col d'Enfer et fin septembre pour le sentier sud-est du Sancy. Entre nos relevés d'automne dans le Massif du Sancy et l'apparition de la couverture neigeuse permanente, il peut s'écouler plus d'un mois pendant lequel les processus hivernaux sont à l'œuvre. Bien que cette période soit courte, les fortes précipitations automnales (Fig. 102), les fontes successives des averses de neige précoces et les cycles gel-dégel peuvent engendrer une érosion suffisante pour évacuer les matériaux restants de l'accumulation enregistrée avant nos relevés d'automne, et inciser le sol du sentier. Ceci expliquerait pourquoi nos résultats tendent à mettre en évidence une érosion hivernale. Par la suite, la couverture neigeuse protégeant le sentier quasiment jusqu'à notre prochain relevé de printemps, l'évolution morphologique du sentier s'en trouverait ralentie voire inexistante. Ainsi, notre taux d'érosion calculé sur la période que nous avons défini comme hivernale (Tableau 8 : -2,8 cm/an) devrait être recalculé en fonction de ce paramètre (pas ou peu d'évolution du sentier durant la présence de la couverture neigeuse permanente), le taux d'érosion hivernale serait donc de -14,2 cm/an.

Comme nous l'avons mentionné plus haut, les sentiers de la Chaîne des Puys ne suivent pas le modèle. N'ayant pas de couverture neigeuse permanente, ils ne sont à aucun moment protégés des agressions climatiques. L'hiver, ils sont donc affectés par de nombreux cycles gel-dégel (en moyenne 63 par hiver sur l'ensemble de notre période de relevé), par la fonte des différentes averses neigeuses et par les précipitations hivernales qui vont mobiliser le matériel des versants et engendrer

ainsi une érosion latérale et un engorgement du fond des ravines. Les précipitations hivernales dans la Chaîne des Puys ne sont pas suffisamment efficaces pour faire transiter ce dépôt très loin vers l'aval, le mois enregistrant le plus faible cumul de précipitation étant le mois de mars, suivi de près par les mois de janvier et février (Fig. 102). En revanche, il y a une très nette augmentation de la quantité de précipitation entre le mois d'avril et le mois de mai. Nos relevés topographiques d'avant été ayant en général lieu au mois d'avril, nous enregistrons les effets des fortes précipitations du mois de mai dans la période inter-relevé (de mi-avril à mi-octobre) qualifiée d'estivale. Dans cette période estivale, sur l'ensemble de la période de nos relevés, nous avons enregistré un cumul de précipitations moyen de 537 mm, soit 68 % de la moyenne des cumuls annuels (794 mm). Ces précipitations, et le ruissellement concentré qu'elles engendrent, vont évacuer progressivement les dépôts hivernaux et de début de printemps par le biais d'un transit sédimentaire, puis inciser le fond de la ravine. Nos relevés topographiques de milieu d'automne coïncident avec une baisse des précipitations et une baisse des températures. Nous enregistrons donc, par le biais de nos relevés topographiques, la quasi-totalité de la période d'érosion longitudinale.

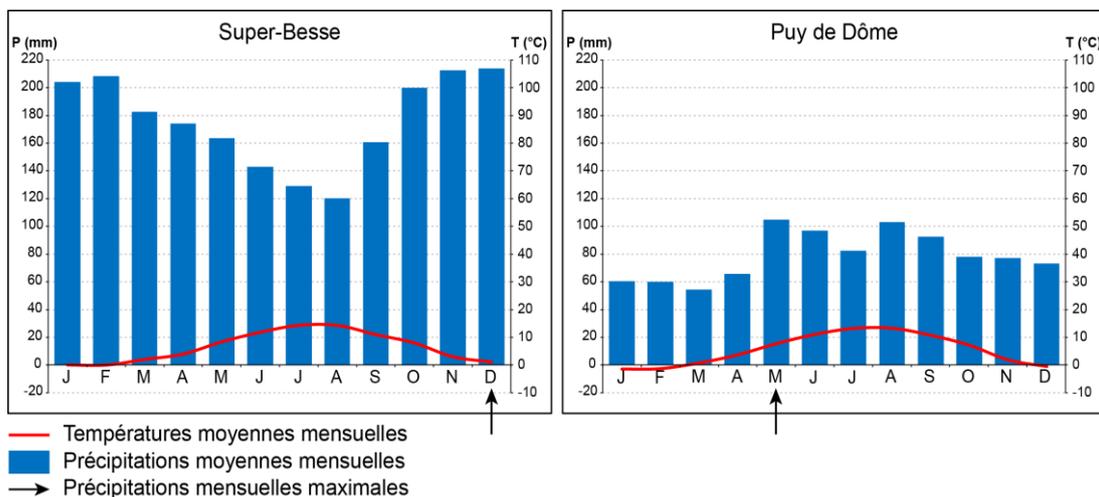


Fig. 102. Diagrammes ombrothermiques des stations météorologiques les plus proches de nos secteurs d'étude.

Une partie des dégradations observées sur les sentiers est directement liée au comportement des randonneurs et à la surfréquentation touristique. En effet

lorsqu'une portion du sentier est boueuse ou occupée par une flaque d'eau, les randonneurs vont avoir tendance à contourner cet obstacle, quitte à passer sur la végétation bordière du sentier (Fig. 103). Ce comportement va avoir pour conséquence l'élargissement du sentier. Si ce dernier est difficilement praticable, parce qu'il est très pentu ou glissant, comme le sentier du Col d'Enfer après un épisode pluvieux, les randonneurs vont avoir tendance à marcher à côté du sentier. Les randonneurs ont également tendance à recouper les lacets qu'il dessine. En piétinant de manière répétée la végétation bordière du sentier, les randonneurs favorisent ainsi la création de nouvelles sentes.

Bien que souvent engendrées par une fréquentation touristique intense et répétée, certaines formes d'érosion sont entretenues et amplifiées par les conditions naturelles et par l'orientation du sentier par rapport au sens de la plus grande pente. Sur un sentier très pentu, un ravinement va très vite apparaître, le rendant ainsi inconfortable pour le randonneur. Un substrat meuble, tel que des dépôts scoriacés, ou une géométrie particulière, comme un sentier très linéaire positionné parallèlement à la pente (Fig. 103), vont amplifier ce phénomène. Une fois que les ravines sont formées, elles peuvent continuer à produire des sédiments longtemps après que les causes de déclenchement ont cessé (Valentin *et al.*, 2005).

Le suivi d'érosion sur le sentier sud-est du Puy de Côme nous a prouvé qu'interdire d'accès un secteur préalablement dégradé n'empêchera pas celui-ci d'être affecté par l'érosion. Les paramètres de ce secteur (substrat scoriacé meuble, sentier linéaire très pentu (jusqu'à 28°), climat rigoureux avec nombreux orages d'été et cycles gel-dégel) favorisent une érosion importante. Le fait de simplement interdire l'accès à un sentier de randonnée, sans réhabilitation, n'empêchera pas l'érosion car (1) la fréquentation touristique n'est pas le seul facteur érosif en jeu et (2) le seuil au-delà duquel une résilience est possible a été franchi.

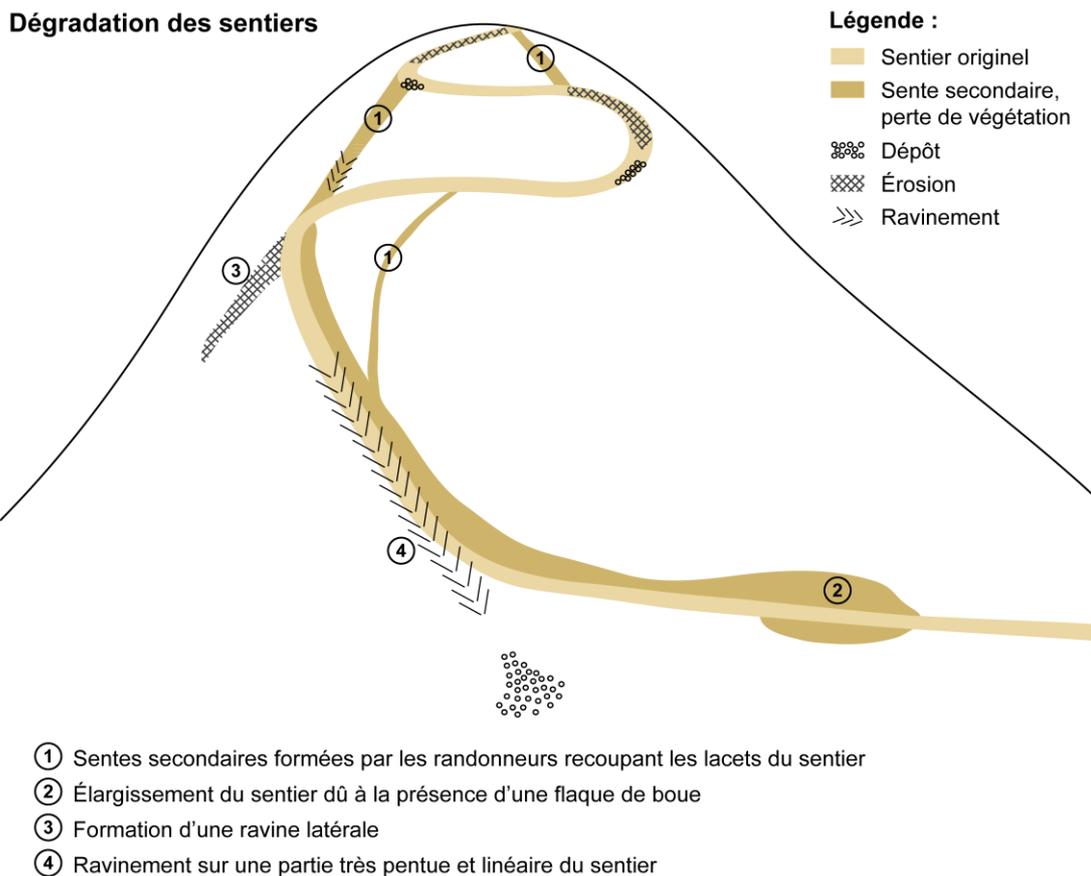


Fig. 103. Les principales formes d'érosion des sentiers de randonnée sous influence climato-anthropique.

## 9.2. Impacts des aménagements antérieurs et préconisations en matière de gestion

Le sentier sud-est du Massif du Sancy ayant été entièrement aménagé au cours de l'été 2015 (Fig. 108), nous n'avons pas de proposition de gestion. Cependant nous ne sommes pas convaincus que l'ensemble des aménagements effectués sur ce site soient efficaces. La mise en place de boudin de coco visant à maintenir la végétation bordière et de toile de coco sur les abords du sentier possédant toujours un sol (ou une partie de sol) semble judicieuse pour préserver la végétation en place et favoriser son développement. Cependant, certains secteurs ont bénéficié de ces aménagements alors qu'ils sont dépourvus de sol au moins depuis le début des années 1900 (Fig. 104). Cette volonté de vouloir recouvrir tout affleurement rocheux, alors qu'il est en place depuis de nombreuses années et qu'il est relativement stable engendre souvent des déceptions quant à la réussite d'un tel projet.

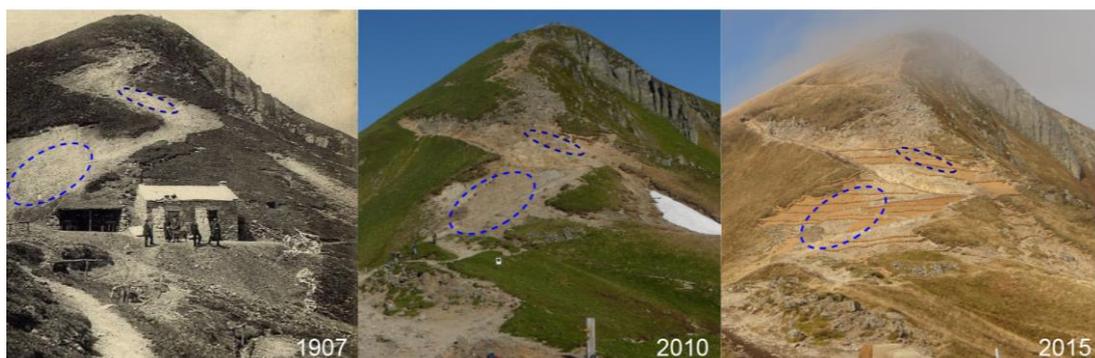


Fig. 104. Comparaison des photos du sentier sud-est du Massif du Sancy de 1907, 2010 et 2015, en termes de substrat affleurant.

Le secteur du Col d'enfer a également bénéficié de quelques aménagements depuis la fin de nos relevés topographiques. Cependant, ces derniers sont d'une moins grande ampleur que le projet de réhabilitation du sentier sud-est du Sancy. Il s'agit, pour l'essentiel, de la mise en place de fils guide canalisant les randonneurs, de seuil favorisant leur marche ainsi que la rétention de sédiment et de rigole d'évacuation de l'eau sur la partie basse du sentier (Fig. 105). Le choix de fermeture d'une partie du sentier a également été réalisé. Ces aménagements semblent plutôt bien pensés, bien que les seuils soient parfois un peu haut à surmonter, mais la partie haute du sentier, celle qui est la plus inconfortable à la marche (sol très glissant et très pentu) n'a pour le moment bénéficié que de peu d'aménagement. Seule une portion du sentier a été mis en défens et un morceau de toile de coco a été installé dans le but de favoriser une végétalisation spontanée de cette surface, mis en place il y a plus d'un an, cet aménagement est toujours sans succès.

Nous avons également réfléchi à une proposition d'aménagement de ce secteur, visant à la fois à le rendre plus confortable à la marche et à réhabiliter une partie de celui-ci (Fig. 105). Le choix d'un itinéraire unique, longé de fils guide suffisamment haut et solide pour dissuader la pratique du hors-sentier et pouvant servir d'appui au randonneur lors de son ascension vers le Sancy ou de sa descente vers le Col de Courre. Un espacement suffisant pour que deux randonneurs puissent se croiser est cependant nécessaire à ce type d'installation. En plus des fils guide, des emmarchements d'espacement régulier permettraient d'atténuer un peu la pente, toutefois la hauteur de ceux-ci ne doit pas perturber la marche du randonneur. Le reste du sentier pourrait bénéficier de la mise en place de quelques fascines en bois

afin d'engendrer un remplissage à l'amont qui permettrait de re-végétaliser ce secteur si la végétation ne s'y installe pas spontanément.

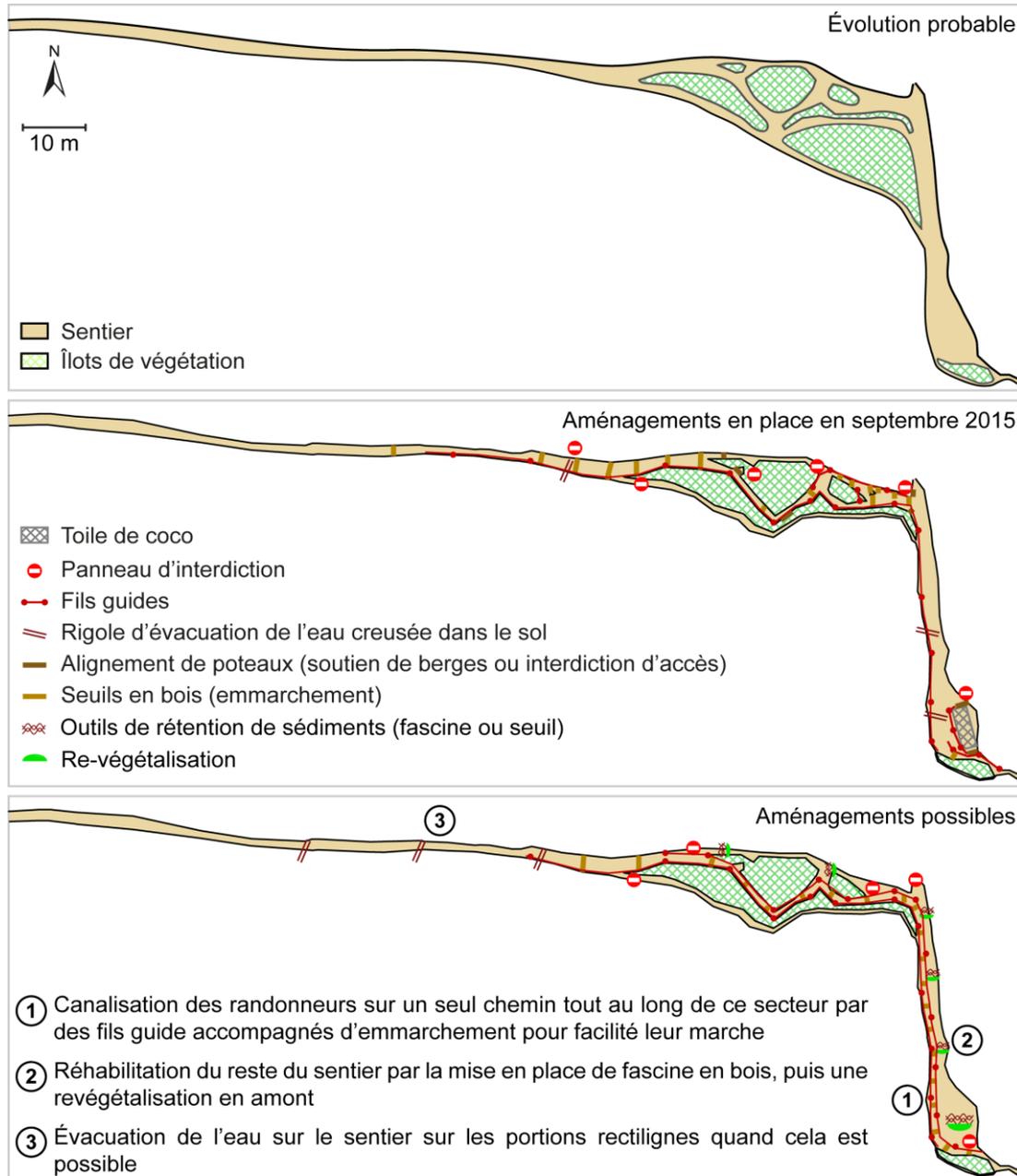


Fig. 105. Proposition d'aménagements sur le secteur du Col d'Enfer.

La ravine du Petit Puy de Dôme est un formidable outil pédagogique permettant, à petite échelle, d'observer l'ensemble des processus affectant un tel objet, depuis sa partie amont jusqu'à son cône de déjection. Il serait dommage de

vouloir la faire disparaître pour des raisons « esthétiques ». Cependant, quelques aménagements peuvent tout de même être mis en place afin de ne pas voir notre prévision d'évolution se réaliser (apparition d'une ravine parallèle à celle existante, Fig. 106). Nous préconisons donc la mise en place de quelques fascines en bois permettant de retenir les sédiments au sein de cette ravine. Ces installations seraient surtout situées sur la partie haute de la ravine qui est la partie la plus active actuellement (Fig. 106). Deux fascines permettraient de limiter l'incision visible et grandissante de la bordure est de cette partie haute et limiteraient le ruissellement concentré donnant naissance à la potentielle ravine parallèle. Et une fascine accompagnée de végétation permettrait de réduire l'impact de l'écoulement concentré qui déjà engendre la naissance d'une rigole.

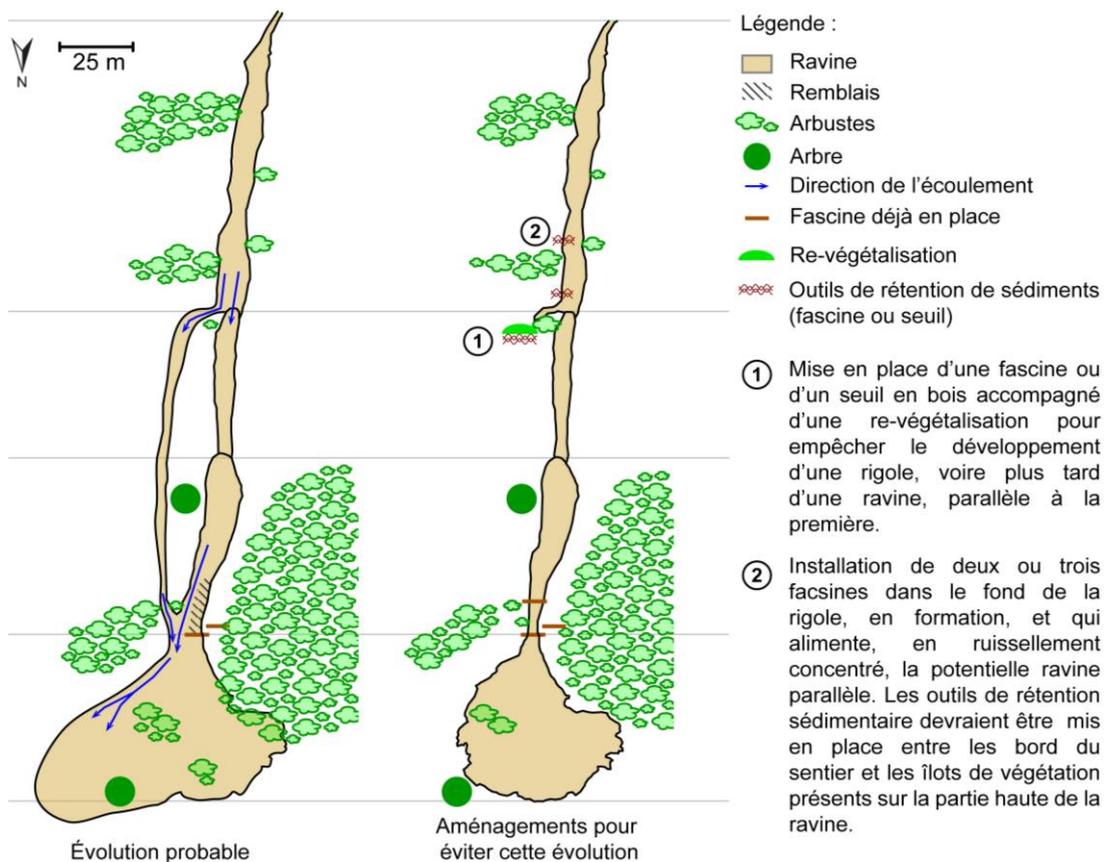


Fig. 106. Proposition d'aménagement sur la ravine du Petit Puy de Dôme.

Pour limiter l'évolution rapide du sentier sud-est du Puy de Côme, il serait envisageable de mettre en place des fascines à l'intérieur du sentier. Si nos prévisions

sont justes, l'érosion devrait être plus active sur la partie haute de ce sentier. Il serait donc judicieux de focaliser nos aménagements sur ce secteur. De plus, entre le transect 11 et le transect 12 une bifurcation en « Y » divise l'écoulement concentré (Fig. 98), et les transects 13 et 14 ont montrés des tendances à la stabilité. Ainsi une première fascine pourrait être installée en amont de cette bifurcation (entre le transect 10 et 11 par exemple), puis deux ou trois autres fascines à l'amont de cette dernière, à intervalle plus ou moins régulier.

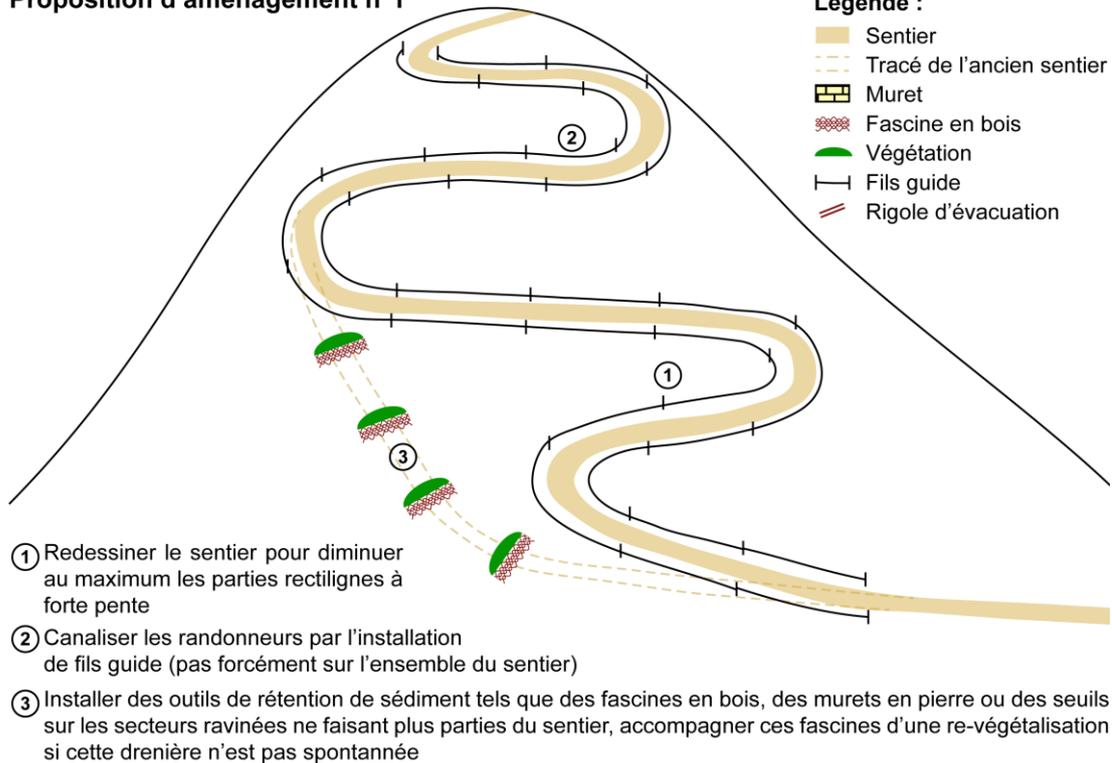
Quand cela est possible, la meilleure façon de lutter contre l'érosion est d'avoir un sentier bien dessiné, de préférence en lacets pour limiter le pouvoir érosif de l'écoulement concentré (Fig. 107, proposition 1). Une utilisation raisonnée et responsable des sentiers passe également par l'éducation des randonneurs (Audet *et al.*, 2006). Afin de limiter la pratique du hors-sentier, des actions telles que des panneaux d'interdiction ont été réalisées dans l'ensemble du Massif du Sancy. Pour appuyer ces actions, il serait possible de réaliser des campagnes expliquant aux utilisateurs du sentier les dégradations qui pourraient arriver suite à une pratique régulière et répétée du hors-sentier. Les enjeux liés aux panneaux d'interdictions ne sont pas toujours très bien compris par les randonneurs occasionnels. Le cas échéant, la mise en place de fils guide suffisamment visibles et difficilement surmontables ou de murets en pierre, est un outil plutôt efficace dans la canalisation des randonneurs (Fig. 107, proposition 1 et 2). Le positionnement de ces aménagements de « canalisation » est important, notamment au niveau des sentiers en lacets, leur but étant aussi d'empêcher les randonneurs de couper les lacets.

Sur la ravine du Petit Puy de Dôme, nous avons pu observer l'efficacité des fascines en bois dans la rétention de sédiments. Cependant, cette rétention de sédiments n'est efficace que localement, uniquement derrière la fascine, et n'empêche pas le ruissellement concentré de s'écouler et d'inciser le sol à l'aval de celle-ci. C'est pourquoi, dans la littérature, les fascines sont souvent accompagnées d'une re-végétalisation à l'amont. La végétation a un effet protecteur, en réduisant l'énergie des agents érosifs, tels que le ruissellement concentré, et en maintenant les sols en place (Rey *et al.*, 2004 ; Rey, 2005). Il est donc important d'accompagner la mise en place de fascines par la plantation de végétaux (Fig. 107, proposition 1). Crozas (1994) recense les espèces végétales susceptibles d'être utilisées dans la lutte contre l'érosion des sols en fonction de différents critères biologiques, anatomiques

et écologiques et détermine les deux grandes familles permettant de répondre aux objectifs. Outre la famille des légumineuses, celle qui nous intéressera le plus pour nos secteurs est celle des graminées. Ces espèces sont très résistantes aux conditions extrêmes dans lesquelles elles vivent. Elles possèdent un système racinaire dense et ramifié très efficace pour la fixation du sol, la partie aérienne couvrante assure une bonne protection contre l'énergie cinétique de la pluie et la multiplication végétative par tallage permet le développement de touffes denses efficaces contre le ruissellement (Crosaz, 1995). Les graminées présentes sur nos sites d'étude et pouvant potentiellement servir dans la lutte contre l'érosion des sols sont : *Calamagrotis arundinacea* et *Festuca paniculata* dans le Massif du Sancy, et *Calamagrotis arundinacea* et *Bromus erectus* dans la Chaîne des Puys. *Bromus erectus* et une espèce de *Festuca* (*Festuca ovina*) sont d'ailleurs citées dans les graminées présentes sur le site de Draix et pouvant faire partie des espèces utilisées dans la lutte contre l'érosion de ce secteur (Crosaz, 1995).

Comme nous l'avons vu, le ruissellement concentré est un processus érosif prépondérant dans la dégradation des sentiers et dans la formation des ravines. Plus le sentier est linéaire et pentu, avec des berges développées, plus le ruissellement concentré va avoir une action forte. Pour limiter son pouvoir érosif, il est donc impératif de casser la dynamique de ruissellement et de créer des zones d'accumulation, les dépôts s'effectuant principalement à l'arrière des obstacles présents sur le sentier (fascine, végétation, gros bloc,...). Ceci suggère que pour ralentir le taux d'érosion des sections pentues, l'outil le plus efficace serait un réseau de drainage perpendiculaire/oblique par rapport au sentier (Tomczyk et Ewertowski, 2013) (Fig. 107, proposition 2). Ce réseau de drainage aurait une double application : évacuer l'eau du sentier et retenir une partie des sédiments. Cependant, la mise en place d'un tel réseau demande un entretien régulier avec l'évacuation des sédiments piégés dans les rigoles ou gouttières pour que le drainage reste effectif.

### Proposition d'aménagement n°1



### Proposition d'aménagement n°2

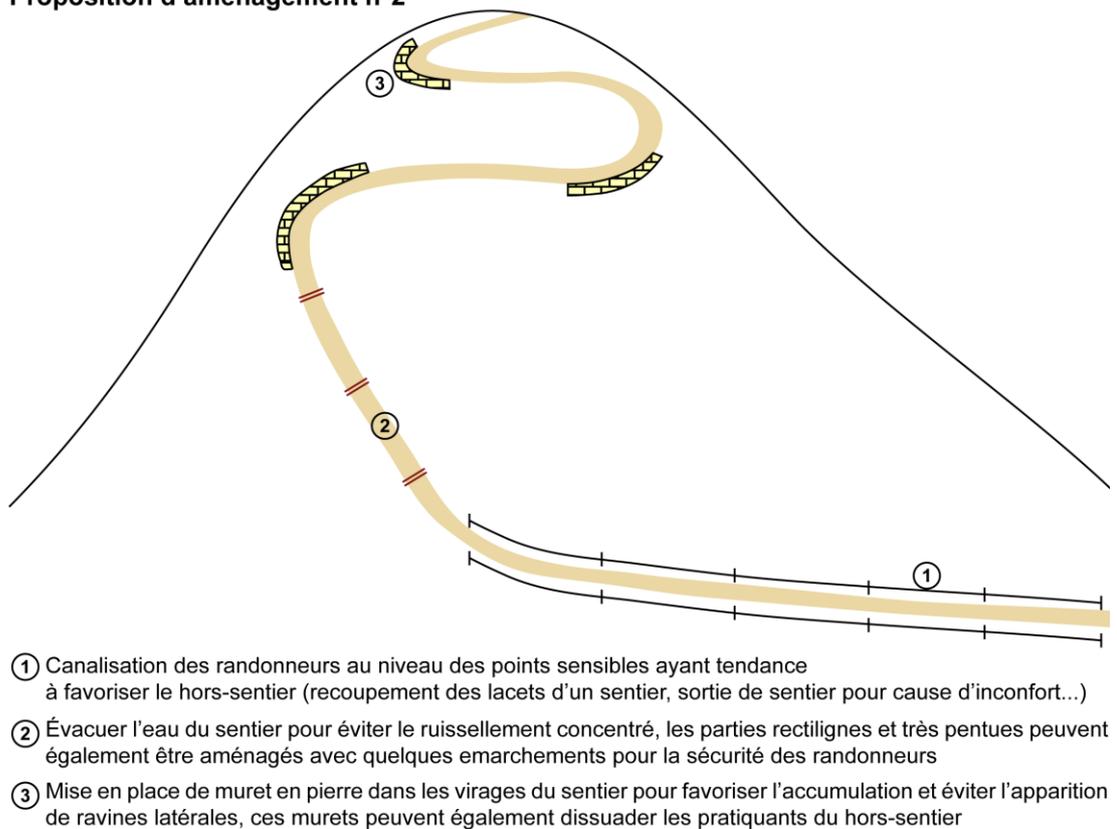


Fig. 107. Propositions d'aménagements pour lutter contre l'érosion des sentiers de randonnée.

## Conclusion

Si nos secteurs d'étude présentent des stades d'érosion et des rythmes d'évolution différents, un continuum existe entre eux. Ainsi, le sentier sud-est du Puy de Sancy présente les caractéristiques d'un sentier bien dessiné, moyennement endommagé, entretenu par les gardes nature du PNRVA (muret en pierre canalisant les randonneurs ou limitant la migration du flux sédimentaire, rigole d'évacuation des eaux en travers du sentier sur certains secteurs). Le sentier du Col d'Enfer, malgré la mise en place de quelques aménagements, est fortement endommagé sur une bonne partie du secteur. Les secteurs de la Chaîne des Puys, sévèrement endommagés, en sont à un stade ultérieur, l'un semblant en passe de devenir une ravine (sentier sud-est du Puy de Côme), l'autre ayant déjà atteint ce stade.

Avec cette vision des différentes étapes d'évolution possible des sentiers, il semble possible d'opérer des aménagements ou d'appliquer une gestion particulière afin d'éviter d'atteindre des stades extrêmes tel qu'un sentier fortement à sévèrement endommagé (Bratton *et al.*, 1979 ; Marion *et al.*, 2006). Plusieurs possibilités d'aménagement léger s'offrent aux gestionnaires. Il est cependant préférable d'effectuer une étude complète du site, en fonction des différents facteurs générateurs d'érosion (facteurs environnementaux et anthropiques), afin de mettre en place l'aménagement adéquat au meilleur emplacement possible pour que celui-ci soit le plus efficace.

# Conclusion générale

## Les apports de la thèse

Nos quatre secteurs d'étude sont tous très différents et pourtant complémentaires. Ils forment un continuum présentant des stades d'érosion différents d'après la méthode de classification des sentiers (Bratton *et al.*, 1979 ; Marion *et al.*, 2006), et présentant des rythmes d'évolution différents :

- *Le sentier sud-est du Sancy* présente des lacets sur sa partie amont (la plus pentue) mais il est plus rectiligne sur sa partie aval. En moyenne, les divers secteurs étudiés du sentier sud-est du Sancy affichent un bilan sédimentaire de 1,42 m<sup>3</sup>/an. Ce sentier, le mieux dessiné de tous, est celui qui s'érode le moins rapidement (0,525 cm/an) car ses lacets ralentissent l'érosion en formant des zones de stockage au niveau des virages (taux de dépôt enregistré : 6 cm/an). Il est certain que les murets en pierre visant à empêcher les randonneurs de recouper le sentier au niveau des lacets ont pour effet de ralentir la dynamique érosive. Malgré des taux d'érosion faible (0,5 cm/an moyenné sur l'ensemble des secteurs) et une bonne gestion du sentier, des aménagements relativement lourds ont été mis en place entre juillet et septembre 2015. Ces aménagements comprennent la mise en place de 100 m de fils guide, 170 m de muret en pierres sèches, 40 renvois d'eau en pierres sèches, 6 marches en pierre et 600 m de boudins de coco et une grande quantité de toile de coco. Pour les gestionnaires, ces aménagements ont pour but : (1) de canaliser les randonneurs sur un seul itinéraire afin d'assurer leur sécurité et le confort de marche ; (2) de stabiliser les zones d'érosion afin de favoriser la reprise spontanée de la végétation ; (3) de préserver les espèces animales et végétales aux abords du sentier. Certes, sur certains secteurs, comme aux abords de la végétation, les boudins de coco permettront une stabilisation des berges. Mais sur certains secteurs totalement dépourvus de sol (déjà dans les années 1900), il est peu probable que la végétation reprenne spontanément.



Fig. 108. Photo des aménagements du sentier sud-est du Sancy réalisés au cours de l'été 2015.

- *Le sentier du Col d'Enfer* définit un angle droit entre deux parties de sentier plus rectilignes, dans un secteur au substrat instable (dépôts cendro-ponceux altérés). Les portions rectilignes et légèrement encaissées favorisent l'écoulement concentré et ont tendance à engendrer la pratique du hors-sentier chez les randonneurs. Ainsi, le sentier du Col d'Enfer voit sa surface augmenter de 29,67 m<sup>2</sup>/an avec un bilan sédimentaire de 25,3 m<sup>3</sup>/an. Des travaux d'aménagement se font progressivement sur ce sentier. Ainsi, nous avons pu voir la mise en place de fils guide, de panneaux d'interdiction, de quelques poteaux en bois pour soutenir localement les abords du sentier. Dernièrement, des seuils en bois servant à la fois d'outils de rétention de sédiments et d'embranchement, des renvois d'eau et des fils guide ont été mis en place sur la partie basse du site. Sur la partie haute, une portion du sentier a été recouverte de toile de coco (été 2014) sans effet sur la recolonisation végétale un an après, et des fils guide permettent la canalisation des randonneurs.



Fig. 109. Photo des aménagements récents sur le sentier du Col d'Enfer.  
La photo de gauche montre les aménagements réalisés sur la partie basse, la photo de droite montre les aménagements de la partie haute.

- *Le sentier sud-est du Puy de Côme*, interdit depuis 2002, a un tracé rectiligne, souvent encaissé (profondeur max des berges : 1,35 m) et subit malgré tout une évolution rapide (taux d'érosion moyen des tranches d'érosion sur l'ensemble de la période de relevé – d'avril 2006 à avril 2011 – et sur l'ensemble des vingt transects relevés : 17 cm<sup>2</sup>/an). Il est en passe de se transformer en ravine. Cette hypothèse se confirme par l'évolution récente de la partie amont du sentier qui montre une incision de plus de 1,6 m au niveau du transect 6 (Fig. 110).



Fig. 110. Photo montrant l'incision de la partie amont du sentier sud-est du Puy de Côme au niveau du transect 6.

Le décimètre tendu en travers du sentier montre le niveau d'origine du sol.

- D'après les photographies aériennes de 1974, *la ravine du Petit Puy de Dôme*, actuellement composée de deux ravines emboîtées, semblait avoir à l'origine les caractéristiques d'un sentier tel que celui du Puy de Côme : rectiligne, dans le sens de la pente, taillé dans un substrat scoriacé, mais colonisé par une formation végétale plus ouverte. La ravine du Petit Puy de Dôme témoigne d'une forte érosion (avec un recul moyen de ces têtes de ravine de 73 cm/an en moyenne pour un taux d'érosion de 6,3 m<sup>3</sup>/an sur l'ensemble de la ravine sans le cône de déjection (bilan sédimentaire : 0,2 m<sup>3</sup>/an (ravine + cône de déjection)). La partie haute de la ravine montre une incision de plus en plus importante ainsi qu'une déviation de l'écoulement sur le côté est de la ravine, comme nous le suggérons dans notre modèle prévisionnel d'évolution (Fig. 97). D'ailleurs, une rigole linéaire commence à se dessiner sur le côté est de la ravine secondaire.



Fig. 111. Photo représentant la naissance d'une rigole parallèle à la ravine du Petit Puy de Dôme.

En raison d'un taux de fréquentation variable (fréquentation forte voire surfréquentation dans le Massif du Sancy et absence de fréquentation dans nos

secteurs de la Chaîne des Puys) et d'un climat quelque peu différent (couverture neigeuse permanente sur 5,5 mois dans le Sancy et non dans la Chaîne des Puys), le mode de fonctionnement intra-annuel des sentiers de nos deux massifs diffère. En effet, les sentiers du Massif du Sancy montrent une accumulation entre nos relevés de printemps et d'automne, et une érosion entre nos relevés d'automne et de printemps, alors que les sentiers de la Chaîne des Puys enregistrent sur les mêmes périodes une évolution inverse. Ainsi, ce travail nous a permis de comprendre le cadre temporel des processus érosifs et les volumes impliqués en liens avec les différents facteurs de contrôle de l'érosion.

Au cours de cette thèse, nous avons défini les facteurs contrôlant l'érosion des sentiers de moyenne montagne auvergnate (Fig. 112), qui relèvent de deux grandes catégories : les facteurs environnementaux et les facteurs anthropiques. Ces derniers se subdivisent en deux sous parties interconnectées : les facteurs hérités et les facteurs actuels.

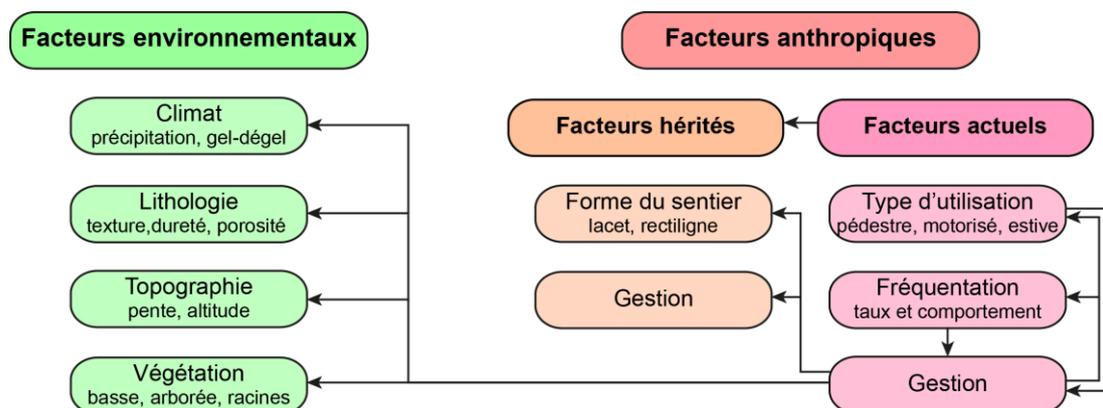


Fig. 112. Les facteurs de contrôle de l'évolution des sentiers de moyenne montagne auvergnate.

Nous avons défini les deux groupes distincts de facteurs de contrôle, les facteurs environnementaux et les facteurs anthropiques mais qui ne sont pas pour autant totalement indépendant l'un de l'autre. Certains facteurs anthropiques, notamment le mode de gestion actuel, est dépendant des facteurs environnementaux ainsi que des autres facteurs anthropiques, qu'ils soient actuels ou passés.

Les aménagements rencontrés sur les secteurs étudiés nous ont appris qu'ils peuvent avoir un effet positif s'ils sont bien positionnés et adaptés à la problématique (fils guide diminuant la pratique du hors-sentier, fascine en bois ou muret en pierre retenant des sédiments). Cependant, nous avons également pu constater l'efficacité de certains aménagements, voire un impact négatif lorsqu'ils sont mal conçus ou mal

positionnés. En effet, certains fils guide n'ont pas eu l'effet de canalisation des randonneurs souhaité sur le Col d'Enfer. Au niveau de la sente secondaire, les randonneurs n'ont pas hésité à passer outre l'interdiction matérialisée par un panneau et par un fil guide. Ainsi, sur ce secteur et la végétation environnante, la pratique du hors-sentier a augmenté jusqu'à 8,4 %. De même, une fascine en bois mise en place sur le Petit Puy de Dôme s'avère inefficace car positionnée sur un secteur qui n'est pas aussi vulnérable qu'on pourrait le penser (Fig. 113). Certes la zone amont de ce secteur est peu végétalisée et laisse le substrat à nu (peu ou pas de sol), mais il n'y a aucun signe montrant la présence de ruissellement concentré ou d'autre processus érosif.

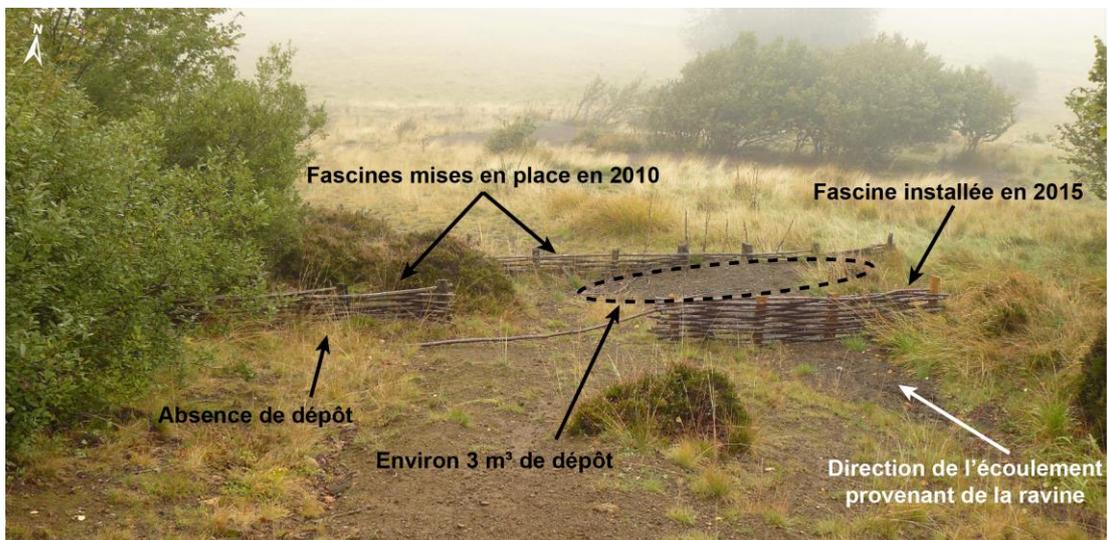


Fig. 113. Fascine en bois installée sur le bas de la ravine du Petit Puy de Dôme.

## Les limites de la thèse

Les méthodes que nous avons utilisées pour les relevés topographiques possèdent chacune leurs propres limites. Outre les aspects de qualité des résultats dont nous avons discuté dans le chapitre 7, les *contraintes logistiques* (taille et poids des appareils, temps requis pour l'installation en vue de l'acquisition, besoin important en personnel) et les *problèmes techniques* liés aux appareils de mesure ont parfois été un handicap. Le dysfonctionnement du scanner laser lors du second scan a

limité l'étude saisonnière de l'évolution topographique prévue au départ sur le sentier sud-est du Puy de Sancy. Sur ce secteur, comme sur celui du Col d'Enfer, les premiers relevés étaient prévus en milieu d'automne 2009, mais pour des raisons logistiques et climatiques, ils n'ont pu être réalisés qu'en fin de printemps 2010.

Ceci nous amène aux *limites temporelles* pour mener ce travail à terme. Bien que le volet « Chaîne des Puys » de cette thèse ait bénéficié de données antérieures, l'ensemble de ce travail reste une étude à court terme (1,5 ans dans le Massif du Sancy et 5 ans dans la Chaîne des Puys). De plus, l'acquisition des séries de données du Petit Puy de Dôme et du Puy de Côme est incomplète (lacune d'un an et demi et de deux ans entre nos données et les données antérieures).

Notre étude sur les changements morphologiques liés un évènement climatique extrême n'a pas fourni les résultats espérés en raison de *contraintes météorologiques* non prévisibles. L'été 2011, au cours duquel cette étude a été réalisée, n'a pas bénéficié d'évènement climatique avec une période de retour d'au moins 2 ans (37 mm de précipitation maximale enregistrés, 42,3 mm pour un épisode pluvieux avec une période de retour de 2 ans). De plus, le cumul des précipitations de l'été 2011 (505 mm) est inférieur à la moyenne des cumuls estivaux calculée sur la période de suivi topographique (moyenne de 537 mm entre 2006 et 2012). Cette étude mériterait tout de même d'être réitérée lors d'un été plus propice, et peut être approfondie avec une étude climatique poussée afin de déterminer des seuils ou des types de précipitation déclenchant des évènements morphogéniques. Selon Römken *et al.* (2002), à quantité de précipitation égale, l'impact d'un épisode d'intensité croissante ou décroissante diverge. Il serait très intéressant de connaître quel est le type d'épisode pluvieux le plus fréquent sur nos secteurs d'étude ainsi que de déterminer quelles sont les conséquences morphologiques de ces épisodes.

## **Propositions de gestion**

Le climat ne semble pas être un facteur de contrôle suffisamment discriminant entre les sentiers du Massif du Sancy et ceux de la Chaîne des Puys. Dans ces deux secteurs géographiques, le climat est de type montagnard à influence océanique. Bien que les diagrammes ombrothermiques du Puy de Dôme et du Mont Dore soient un peu différents, les deux secteurs sont soumis à des contraintes climatiques similaires

(orages d'été et hivers rudes avec des cycles gel-dégel), bien que le Massif du Sancy soit protégé une partie de l'hiver par une couverture neigeuse permanente. Cependant, cette dernière n'empêche pas l'existence de nombreux cycles gel-dégel et de cycles d'enneigement-fonte lors des premiers épisodes neigeux ou des neiges tardives, en marge de la mise en place du manteau neigeux stable. Pour valider cette hypothèse, il faudrait réaliser une étude climatique plus fine avec la mise en place d'une station météo proche du Col d'Enfer.

Nous choisissons donc de faire abstraction du climat et de nous recentrer sur les deux paramètres principaux pouvant expliquer les variations d'intensité d'érosion sur les sentiers de la moyenne montagne auvergnate : l'érodabilité du substrat et la fréquentation touristique. L'érodabilité du substrat est une combinaison des facteurs lithologiques (texture, dureté, perméabilité) et topographiques (pente, altitude). Sur cette base, nous proposons un modèle de gestion des sentiers (Fig. 114) afin d'assurer la préservation du milieu ainsi que la sécurité et le confort de marche des randonneurs. Le graphique présentant ce modèle de gestion se subdivise en quatre catégories :

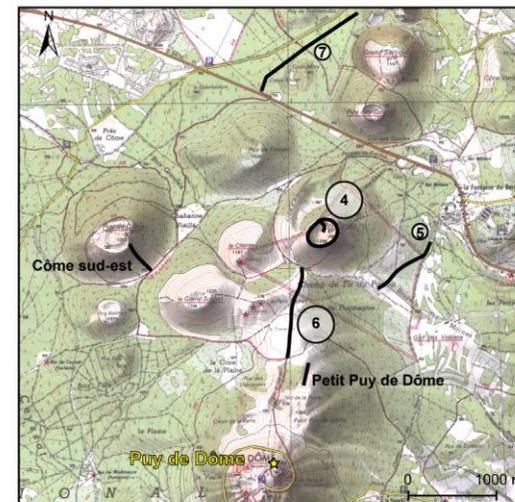
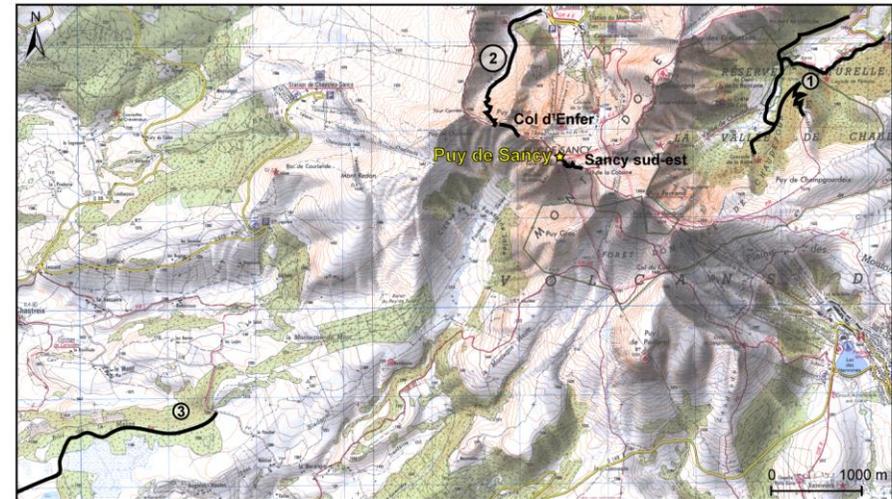
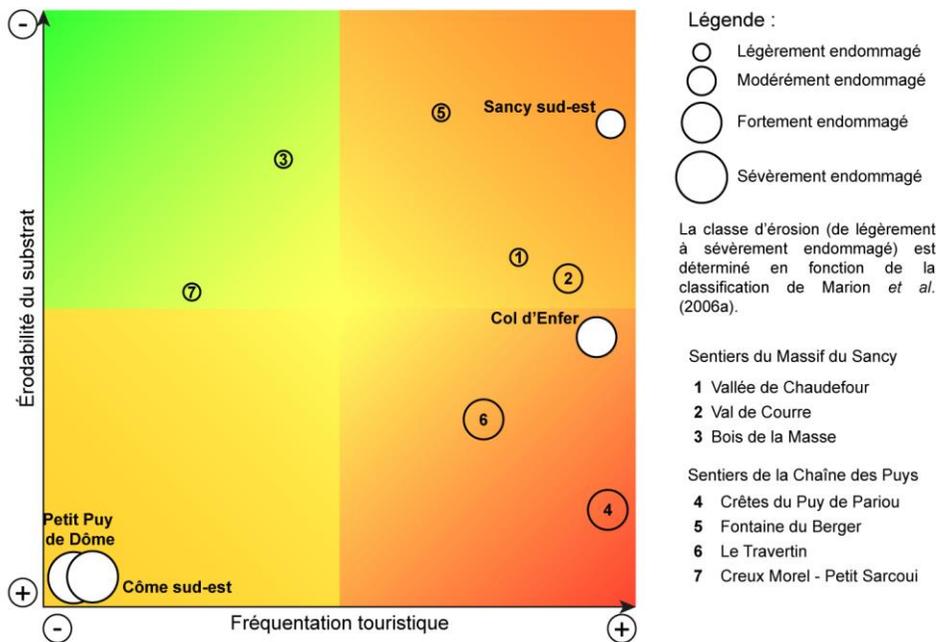
- Catégorie A (vert) : cette catégorie possède un faible taux de fréquentation touristique et une faible propension à l'érodabilité du substrat. Les sentiers faisant partie de cette catégorie sont généralement peu endommagés. Leur évolution morphologique se fait lentement (taux d'érosion surfacique  $< 1$  mm/an). Cependant, si les différents facteurs contrôlant l'érosion évoluent (par exemple : évolution des conditions climatiques, augmentation de la pression touristique ou pastorale), l'équilibre du secteur pourrait disparaître. Les sentiers de cette catégorie ne demandent pas d'aménagement spécifique, un suivi ponctuel pluriannuel pour vérifier l'évolution des sentiers permettrait une réactivité en temps voulu.

- Catégorie B (jaune) : une forte érodabilité du substrat mais une faible fréquentation touristique caractérisent cette catégorie. En conséquence, les secteurs de cette catégorie ne représentent pas un risque d'insécurité pour les randonneurs. Cependant, certains secteurs ayant eu une forte fréquentation touristique par le passé, tels que le sentier sud-est du Puy de Côme, peuvent se retrouver dans cette catégorie. L'érosion initiée par l'homme a engendré un déséquilibre du milieu ayant pour conséquence une accélération et une intensification de l'érosion naturelle (moins bonne infiltration de l'eau, ruissellement concentré, incision jusqu'au substrat, plus

de végétalisation spontanée). Les aménagements envisageables sur ces sites sont plus d'ordre à restaurer un équilibre : aménagements visant à retenir les sédiments au sein du bassin versant ; assurer un maintien des sols ; limiter les actions du ruissellement concentré.

- Catégorie C (orange) : dans cette catégorie, le facteur anthropique prend une part plus importante que les facteurs environnementaux. Bien que la fréquentation touristique soit très importante, le faible degré d'érodabilité du substrat fait que l'évolution morphologique du sentier n'est pas excessive (tranche d'érosion moyenne  $< 1$  cm/an). Le cas du sentier sud-est du Sancy illustre bien ceci : les photos de ce site datant du début du 20<sup>e</sup> siècle montrent déjà des secteurs dépourvus de végétation où le substrat affleure ; de plus, notre étude topographique montre des taux d'érosion faibles en comparaison de nos autres secteurs. Nous conseillons donc des aménagements visant à assurer la sécurité des randonneurs (canalisation par le biais de fils guide ou muret en pierre, emmarchement lorsque la pente est très forte), ainsi que des aménagements favorisant l'évacuation de l'eau pour limiter son action et préserver l'équilibre actuel du milieu.

- Catégorie D (rouge) : les sentiers de cette catégorie sont ceux qui présentent le plus souvent une évolution rapide (taux d'érosion  $> 1$  cm/an), et un risque pour la sécurité des randonneurs. Fortement à sévèrement endommagés, comme celui du Col d'Enfer, ces sentiers présentent un déséquilibre important et vont donc demander une attention particulière de la part des gestionnaires. Il faut impérativement rendre ces sentiers plus confortables à la randonnée pour éviter le risque de voir l'apparition de nouvelles sentes due à la pratique du hors-sentier (en emmarchement, fils guide d'une hauteur suffisante pour servir à la fois de soutien/d'aide à la marche et pour canaliser les randonneurs sur un sentier unique). Des aménagements visant à évacuer l'eau du sentier, à maintenir les sols et la végétation bordière, ainsi qu'à retenir les sédiments au sein du sentier sont également vivement recommandés quand il n'est pas possible de redessiner le sentier afin d'éviter au maximum les portions rectilignes.



Proposition de gestion / d'aménagement pour les sentiers endommagés :

- A** ■ Suivi de l'évolution du sentier, information/indication des randonneurs
- B** ■ Rétention des sédiments (fascine en bois, muret en pierre) ; stabiliser le sol (végétalisation) ; limitation de l'action de l'eau (rigole d'évacuation, augmentation de la rugosité du sol avec de la végétation)
- C** ■ Limitation de l'action de l'eau (rigole d'évacuation) ; canalisation des randonneurs (fils guide, muret en pierre)
- D** ■ Limitation de l'action de l'eau (rigole d'évacuation) ; limitation des portions rectilignes très pentues ; canalisation des randonneurs (fils guide, murets en pierre, panneaux de « signalisation ») ; possibilité d'aménagements plus lourds comme des marches avec des rondins de bois à condition que l'eau soit évacuée lors des précipitations

Fig. 114. Outils d'aide à la décision pour les gestionnaires.

## Perspectives de recherche

Cette étude a fourni des informations substantielles sur les facteurs de contrôle de l'érosion des sentiers, le fonctionnement saisonnier des processus érosifs, ainsi que sur les tendances évolutives des secteurs étudiés. Elle a également permis de développer un modèle de gestion et d'aménagement ayant une applicabilité directe pour les gestionnaires.

Cependant, il serait intéressant de faire une étude sur la végétation bordière des sentiers, et plus précisément sur le système racinaire. D'après les observations sur le terrain, nous avons constaté que jusqu'à un certain point, la végétation jouait un rôle significatif dans le maintien des bords du sentier. Cependant, aucune de nos études ne prend réellement en compte ce paramètre. Des tests de résistance du système racinaire aux contraintes d'affouillement, de climat et de piétinement, en fonction des différents végétaux existant dans ces secteurs, pourraient permettre de déterminer quel type de re-végétalisation mettre en place pour aider à la stabilisation des bords des sentiers.

Mais il serait également très utile, dans la limites de la documentation existante, de se livrer à une analyse rétrospective sur un pas de temps plus long, par exemple pour mieux cerner les paramètres à l'origine de la transformation du sentier du Petite Puy de Dôme en ravine. Enfin, compte tenu de l'hétérogénéité des sentiers de la moyenne montagne auvergnate en terme de substrats, de pente, de tracé et de fréquentation touristique, il apparaît nécessaire d'élargir le corpus de sites étudiés, afin d'étayer nos interprétations sur des bases plus sûres.



# Bibliographie

**Alba M., Longoni L., Papini M., Roncoroni F., Scaioni M., 2005.** *Feasibility and problems of TLS in modelling rock faces for hazard mapping*. Proceeding of the ISPRS Workshop "Laser scanning 2005", Enschede, Netherlands, 156-161.

**Allée P., 2003.** *Dynamiques hydrosédimentaires actuelles et holocènes dans les systèmes fluviaux de moyenne montagne (Limousin, Hautes Cévennes, Maures)*. Université de Limoges, 451 p.

**Arnalds O., Bartoli F., Buurman P., Oskarsson H., Stoops G., Garcia-Rodeja E., 2007.** *Soils of volcanic regions in Europe*. Springer, 644 p.

**Astrade L., Ployon E., Veyrat-Charvillon S., 2011.** Les données laser terrestre à haute résolution pour le suivi de la charge de fond dans les tronçons torrentiels. Retours d'expériences. In: *Images et modèles 3D en milieux naturels*. Collection EDYTEM 107-118.

**Audet V., Seigner V., Molard J., 2006.** Inventaire des impacts des activités récréatives en milieu forestier protégé : le cas du parc de la forêt ancienne du mont Wright. *Téoros. Revue de recherche en tourisme* 25 (25-3): 52-58.

**Bartoli F., Regalado C. M., Basile A., Buurman P., Coppola A., 2007.** Physical properties in European volcanic soils: a synthesis and recent developments. In: *Soils of Volcanic Regions in Europe*. Springer Berlin Heidelberg, 515-537.

**Bayfield N. G., Aitken R., 1992.** Managing the Impacts of Recreation on Vegetation and Soils: A Review of Techniques. *Institute of Terrestrial Ecology*: 100 p.

**Belenguier L., Birard C., 2013.** *Document d'Objectifs du Site Natura 2000 Monts Dore "FR 8301042"*. Aydat, Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne, 148 p.

**Beuselinck L., Steegen A., Govers G., Nachtergaele J., Takken I., Poesen J., 2000.** Characteristics of sediment deposits formed by intense rainfall events in small catchments in the Belgian Loam Belt. *Geomorphology* 32: 69-82.

**Birard C., Soulier A., 2011.** *Document d'Objectifs du Site Natura 2000 Chaîne des Puys "FR 8301052"*. Aydat, Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne, 122 p.

**Boivin P., Besson J. C., Briot D., Camus G., De Goër A., Gourgaud A., Labazuy P., De Larouzière D., Livet M., Mergoil J., Miallier D., Morel J. M., Vernet G., Vincent P., 2004.** *Volcanologie de la Chaîne des Puys, carte et fascicule*. 4<sup>e</sup> édition, Parc Naturel des Volcans d'Auvergne, 179 p.

**Bratton S. P., Hickler M. G., Graves J. H., 1979.** Trail erosion patterns in Great Smoky Mountains National Park. *Environmental Management* 3 (5): 431-445.

**Bussièrre J., 2009.** *Etude de fréquentation estivale de la réserve naturelle nationale de Chastreix-Sancy*. Mémoire de master 2, Clermont-Ferrand, Université Blaise Pascal, PNRVA, 132 p.

**Castillo C., Pérez R., James M. R., Quinton J. N., Taguas E. V., Gómez J. A., 2012.** Comparing the accuracy of several field methods for measuring gully erosion. *Soil Science Society of America Journal* 76 (4): 1319-1332.

**Cerdà A., 1998.** The influence of aspect and vegetation on seasonal changes in erosion under rainfall simulation on a clay soil in Spain. *Canadian Journal Of Soil Science* 78 (2): 321-330.

- Cheng H., Wu Y., Zou X., Si H., Zhao Y., Liu D., Yue X., 2006.** Study of ephemeral gully erosion in a small upland catchment on the Inner-Mongolian Plateau. *Soil and Tillage Research* 90 (1-2): 184-193.
- Cheng H., Zou X., Wu Y., Zhang C., Zheng Q., Jiang Z., 2007.** Morphology parameters of ephemeral gully in characteristics hillslopes on the Loess Plateau of China. *Soil and Tillage Research* 94 (1): 4-14.
- Cole D. N., 1983.** *Assessing and monitoring backcountry trail conditions*. United States, Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station, 14 p.
- Cole D. N., 1989.** *Wilderness campsite monitoring methods: a sourcebook*. United States, Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station, 57 p.
- Cole D. N., 1991.** *Changes on trails in the selway-bitterroot wilderness, Montana, 1978-89*. United States, Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station, 7 p.
- Condomines M., Morand P., Camus G., Duthou L., 1982.** Chronological and geochemical study of lavas from the Chaîne des Puys, Massif Central, France: Evidence for crustal contamination. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 81 (4): 296-303.
- Coquillard P., Gueugont J., Maichalet R., 1988.** *Landes et herbages des édifices volcaniques de la Chaîne des Puys (Massif Central français). II. Ecologie et pastoralisme*. XVI<sup>e</sup> Colloque phytosociologique : Phytosociologie et pastoralisme, Paris, 665-681.
- Crosaz Y., 1995.** *Le matériel végétal : un outil pour la protection des sols*. Onzième Journée du Réseau Erosion, Paris, Bulletin - Réseau Erosion, 449-460.
- Dąbek P., Żmuda R., Ćmielewski B., Szczepański J., 2013.** Analysis of water erosion processes using terrestrial laser scanning. *Acta Geodyn. Geomater.* 11 (1): 45-52.
- Evans M., Lindsay J., 2010.** High resolution quantification of gully erosion in upland peatlands at the landscape scale. *Earth Surface Processes and Landforms* 35 (8): 876-886.
- Farrell T. A., Marion J. L., 2001.** Trail Impacts and Trail Impact Management Related to Visitation at Torres del Paine National Park, Chile. *Leisure/Loisir* 26 (1-2): 31-59.
- Fédération Québécoise De La Marche, 2004.** *Aménagement, évaluation et entretien des sentiers pédestres au Québec : normes et critères*. 45 p.
- Fish E. B., Brothers G. L., Lewis R. B., 1981.** Erosional impacts of trails in Guadalupe Mountains National Park, Texas. *Landscape Planning* 8 (4): 387-398.
- Fournier-Teissedre A., 2008.** *La ravine du Petit Puy de Dôme : Essai d'approche quantitative de l'érosion et implications géomorphologiques*. Mémoire de Master 2, Clermont Ferrand, Université Blaise Pascal, Geolab, 106 p.
- Fournier A., 2007.** *Le ravinement dans la Chaîne des Puys : formes, processus et flux de matière. L'exemple de la ravine du Petit Puy de Dôme*. Mémoire de Master 1, Clermont Ferrand, Université Blaise Pascal, Geolab, 93 p.
- Franckl A., Poesen J., Deckers J., Haile M., Nyssen J., 2012.** Gully head retreat rates in the semi-arid highlands of Northern Ethiopia. *Geomorphology* 173: 185-195.
- Frissell S. S., 1978.** Judging recreation impacts on wilderness campsites. *Journal of Forestry* 76: 481-483.
- Fröhlich C., Mettenleiter M., 2004.** Terrestrial laser scanning - new perspectives in 3D surveying. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36: 7-13.

- Genet P.-E., Villierme L., Ba S., Sinjoux V., 2011.** *Apport de la photogrammétrie multi-images au suivi d'érosion des ravines de moyenne montagne : application à la ravine du Petit Puy de Dôme.* Université Blaise Pascal, Géolab, Clermont-Ferrand,
- Ghimire S. K., Higaki D., Bhattarai T. P., 2006.** Gully erosion in the Siwalik Hills, Nepal: estimation of sediment production from active ephemeral gullies. *Earth Surface Processes and Landforms* 31 (2): 155-165.
- Giménez R., Marzloff I., Campo M. A., Seeger M., Ries J. B., Casali J., Álvarez-Mozos J., 2009.** Accuracy of high-resolution photogrammetric measurements of gullies with contrasting morphology. *Earth Surface Processes and Landforms* 34 (14): 1915-1926.
- Guérin G., 1983.** *La thermoluminescence des plagioclases, méthode de datation du volcanisme. Applications au domaine volcanique français : Chaîne des Puys, Mont Dore et Cézallier, Bas-Vivarais.* Thèse d'état, Paris, Université Pierre et Marie Curie, Paris IV, 253 p.
- Gutiérrez Á. G., Schnabel S., Contador F. L., 2009.** Gully erosion, land use and topographical thresholds during the last 60 years in a small rangeland catchment in SW Spain. *Land Degradation & Development* 20 (5): 535-550.
- Hammit W. E., Cole D. N., 1998.** *Wildland recreation: ecology and management*, John Wiley & Sons, 361 p.
- Hancock G. R., Cawter D., Fityus S. G., Chandler J., Wells T., 2008.** The measurement and modelling of rill erosion at angle of repose slopes in mine spoil. *Earth Surface Processes and Landforms* 33 (7): 1006-1020.
- Helgath S. F., 1975.** *Trail deterioration in the Selway-Bitterroot Wilderness.* United States, Department of Agriculture, Forest Service, 15 p.
- Henry J. B., Malet J. P., Maquaire O., Grussenmeyer P., 2002.** The use of small-format and low-altitude aerial photos for the realization of high-resolution DEMs in mountainous areas: application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Earth Surface Processes and Landforms* 27 (12): 1339-1350
- Heritage G. L., Hetherington D., 2007.** Towards a protocol for laser scanning in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms* 32 (1): 66-74.
- Heritage G. L., Milan D. J., 2009.** Terrestrial Laser Scanning of grain roughness in a gravel-bed river. *Geomorphology* 113 (1): 4-11.
- Heritage G. L., Milan D. J., Large A. R. G., Fuller I. C., 2009.** Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality. *Geomorphology* 112 (3-4): 334-344.
- Hortobágyi B., Vautier F., Burkart A., Wrobel T. J., Peiry J.-L., Steiger J., Corenblit D., 2015.** *Use of photogrammetry for the study of riparian vegetation dynamics.* I. S. River - 2e Conférence Internationale "Recherches et Actions au service des fleuves et grandes rivières", Lyon,
- Hu G., Wu Y., Liu B., Yu Z., You Z., Zhang Y., 2007.** Short-term gully retreat rates over rolling hill areas in black soil of Northeast China. *Catena* 71 (2): 321-329.
- Ionita I., 2006.** Gully development in the Moldavian Plateau of Romania. *Catena* 68 (2-3): 133-140.
- Jacome A., Puech C., Raclot D., Bailly J. S., Roux B., 2008.** *Extraction d'un modèle numérique de terrain à partir de photographies par drone.* Montpellier, Cemagref, 18 p.
- Jacome Pereira A., 2009.** *MNT à très haute résolution spatiale pour la représentation 3D de ravines d'érosion en montagne.* Thèse, Paris, AgroParisTech, 260 p.

- James L. A., Watson D. G., Hansen W. F., 2007.** Using LiDAR data to map gullies and headwater streams under forest canopy: South Carolina, USA. *CATENA* 71 (1): 132-144
- Jewel M., Hammitt W., 2000.** Assessing soil Erosion on trails: a comparison of techniques. *United States, Departement of Agriculture, Forest Service Proceeding* 5: 133-140.
- Kincey M., Challis K., 2010.** Monitoring fragile upland landscapes: The application of airborne lidar. *Journal for Nature Conservation* 18 (2): 126-134.
- Krafft M., De Larouzière F.-D., 1999.** *Guide des volcans d'Europe et des Canaries*, Editions Delachaux et Niestlé, Lausanne, 415 p.
- Krzemien K., Sobiecki K., 2004.** Le role des processus morphologiques contemporains dans le modelage de massif volcanique des Monts Dore (Massif Central). *Prace Geograficzne* 113: 11-25.
- Lambert S., 2000.** Les géotextiles : fonctions, caractéristiques et dimensionnement. *Ingénieries - E A T* 22: 17-25.
- Lavandier G., Dangla L., Bruciamacchie M., Rey F., 2010.** Modélisation spatio-temporelle et approche économique du piégeage de sédiments dans les ravines marneuses végétalisées par génie biologique : le modèle Simulfascine. *Revue Forestière Française* 62 (5): 525-540.
- Lavé J., Avouac J. P., 2000.** Active folding of fluvial terraces across the Siwaliks Hills, Himalayas of central Nepal. *Journal of Geophysical Research* 105 (B3): 5735-5770
- Lavina P., 1985.** *Le volcan du Sancy et le "Massif Adventif" (Massif des Monts Dore - Massif Central Français). Etudes volcanologiques et structurals.* Thèse de troisième cycle, Clermont Ferrand, Université Blaise Pascal, 220 p.
- Lavina P., 1999.** *Cartes volcanologique et des formations superficielles de la Réserve Naturelle de la Vallée de Chaudéfour : nouvelles contributions à l'étude du strato-volcan du Sancy (Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne, Massif Central, France).* éditions du BRGM, Résumé in Colloque "Volcanismes, Sédimentations et Tectoniques Cénozoïques Périalpins", Orléans, 20 p.
- Lee K. H., Isenhardt T. M., Schultz R. C., Mickelson S. K., 1998.** Nutrient and sediment removal by switchgrass and cool-season grass filter strips in Central Iowa, USA. *Agroforestry Systems* 44 (2-3): 121-132.
- Lefeuve M., 2013.** *Dynamiques végétales contemporaines dans les estives de la Chaîne des Puys : pour une approche intégrée.* Thèse, Clermont Ferrand, Université Blaise Pascal, 354 p.
- Legrand P., Bartoli F., Curt T., 2007.** Spécificité des sols volcaniques du Massif Central : Bénéfices et contraintes pour la gestion forestière. *Revue Forestière Française* 59 (2): 99-118.
- Leonard R. E., Whitney A. M., 1977.** *Trail transect: a methode for documenting trail changes.* United States, Department of Agriculture, Forest Service, 8 p.
- Leung Y., Marion J. L., Ferguson J. Y., 1997.** *Methods for assessing and monitoring backcountry trail conditions: an empirical comparison.* D. Harmon, Making Protection Work: Proceedings of the 9th George Wright Society Conference on Research and Resource Management in Parks and on Public Land, Albuquerque, 406-414.
- Marion J. L., 1984.** *Campsite assessment systems: application, evaluation, and development.* J. S. Popadic, K. I. Butterfield, D. H. Anderson, Popadic M. R., Proceedings of the 1984 national river recreation symposium, Baton Rouge, Louisiane, Louisiana State University, College of Design, School of Landscape Architecture, 561-576.
- Marion J. L., Leung Y.-F., 2001.** Trail resource impacts and an examination of alternative assessment. *Journal of Park and Recreation Administration* 19 (3): 17-37.

- Marion J. L., Leung Y.-F., Nepal S. K., 2006.** Monitoring trail conditions: new methodological considerations. *The George Wright Forum* 23 (2): 37-49.
- Marion J. L., Olive N., 2006.** *Assessing and understanding trail degradation: results from Big South Fork National River and recreational area.* U. S. Geological Survey Patuxent Wildlife Research Center, Cooperative Park Studies Unit, 80 p.
- Marion J. L., Wimpey J. F., Park L. O., 2012.** The science of trail surveys : Recreation ecology provides new tools for managing wilderness trails. *Park Science* 28 (3): 60-65.
- Martinat A., 2009.** *Mise en place d'une méthode de suivi d'érosion au val des Dents Bouches (Massif du Sancy).* Mémoire de master 2, Clermont Ferrand, Université Blaise Pascal, Geolab, 38 p.
- Martinez-Casasnovas J. A., 2003.** A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. *Catena* 50 (2-4): 293-308.
- Marzloff I., Poesen J., 2009.** The potential of 3D gully monitoring with GIS using high-resolution aerial photography and a digital photogrammetry system. *Geomorphology* 111 (1-2): 48-60.
- Marzloff I., Ries J. B., Poesen J., 2011.** Short-term versus medium-term monitoring for detecting gully-erosion variability in Mediterranean environment. *Earth Surface Processes and Landforms* 36: 1604-1623.
- Menadier L., 2012.** *Paysages de fromages : sensibilités au paysage, pratiques des agriculteurs et ancrage territorial des AOC fromagères de moyennes montagnes d'Auvergne et de Franche-Comté.* Thèse, Clermont-Ferrand, Université Blaise Pascal, 544 p.
- Meyer L. D., Dabney S. M., Harmon W. C., 1995.** Sediment-trapping effectiveness of still-grass hedges. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers* 38 (3): 809-815.
- Milan D. J., Heritage G. L., Hetherington D., 2007.** Application of a 3D laser scanner in the assessment of erosion and deposition volumes and channel change in a proglacial river. *Earth Surface Processes and Landforms* 32 (11): 1657-1674.
- Morel J.-M., Genevois-Gomendy V., 2009.** *Etude géologique et pédologique des cheminements dégradés du secteur entre la plateforme du Ferrand/col de la Cabane et la Tour Carrée (Massif des Monts Dore, Chambon-sur-Lac, Le Mont Dore, et Chastreix, 63). Propositions de réhabilitation et préconisations d'aménagements.* Chastreix, Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne, Réserve Chastreix-Sancy, 28 p.
- Nachtergaele J., Poesen J., 1999.** Assessment of soil losses by ephemeral gully erosion using high-altitude (stereo) aerial photographs. *Earth Surface Processes and Landforms* 24 (8): 693-706.
- Nanzyo M., Shoji S., Dahlgren R., 1993.** Physical characteristics of volcanic ash soils. In: *Developments in Soil Science.* Elsevier, 189-207.
- Natura 2000, 2010.** Cartographie des habitats naturels et des espèces en Auvergne (Programme CHANES). Dreal Auvergne, <http://carmen.application.developpement-durable.gouv.fr/7/CHANES.map#>
- Neboit R., 1991.** *L'Homme et l'érosion : l'érosion des sols dans le monde,* Faculté des Lettre et Sciences humaines de l'Université Blaise-Pascal, Clermont Ferrand, 269 p.
- Nehlig P., Boivin P., De Goër A., Mergoïl J., Prouteau G., Sustrac G., Thiéblemont D., 2003.** Les Volcans du Massif Central. *Geologues, Numéro spécial Massif Central:* 41 p.
- Nyssen J., Veyret-Picot M., Poesen J., Moeyersons J., Haile M., Deckers J., Govers G., 2004.** The effectiveness of loose rock check dams for gully control in Tigray, northern Ethiopia. *Soil Use and Management* 20 (1): 55-64.

- Olive N. D., Marion J. L., 2009.** The influence of use-related, environmental, and managerial factors on soil loss from recreational trails. *Journal of Environmental Management* 90 (3): 1483-1493.
- Oostwoud Wijdenes D., Poesen J., Vandekerckhove L., Nachtergaele J., Baerdemaeker J., 1999.** Gully-head morphology and implications for gully development on abandoned fields in a semi-arid environment, Sierra de Gata, southeast Spain. *Earth Surface Processes and Landforms* 24 (7): 585-603.
- Oostwoud Wijdenes D. J., Poesen J., Vandekerckhove L., Ghesquiere M., 2000.** Spatial distribution of gully head activity and sediment supply along an ephemeral channel in a Mediterranean environment. *Catena* 39 (3): 147-167.
- Optech Incorporated, 2006.** Iris: Summary Specification Sheet. [http://www.optech.ca/pdf/ILRIS\\_SpecSheet\\_110309\\_Web.pdf](http://www.optech.ca/pdf/ILRIS_SpecSheet_110309_Web.pdf)
- Parkner T., Page M. J., Marutani T., Trustrum N. A., 2006.** Development and controlling factors of gullies and gully complexes, East Coast, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms* 31 (2): 187-199.
- Perroy R. L., Bookhagen B., Asner G. P., Chadwick O. A., 2010.** Comparison of gully erosion estimates using airborne and ground-based LiDAR on Santa Cruz Island, California. *Geomorphology* 118 (3-4): 288-300.
- Pierrot Deseilligny M., Clery I., 2011.** Evolution récente en photogrammétrie et modélisation 3D par photo des milieux naturels. In: *Images et modèles 3D en milieux naturels*. Collection Edytem, 51-66.
- Pnr Des Volcans D'auvergne, 2008.** *Réhabilitation des sentiers des crêtes du massif du Sancy : tranche 2, le Puy de la Perdrix*. 23 p.
- Pnr Des Volcans D'auvergne, 2009.** *Réhabilitation des sentiers des crêtes du massif du Sancy : tranche 3, le Puy Ferrand*. 22 p.
- Pnr Des Volcans D'auvergne, 2013.** *Techniques d'aménagement des cheminements sur sols volcaniques fragiles : guide de l'écochantier*. 54 p.
- Pop O., Guitton M., Surdeanu V., 2009a.** L'érosion sur les sentiers de randonnée et leurs aménagements dans le Massif du Sancy (Massif Central Français). In: *Studia Universitatis Babeş-Bolyai*. 193-202.
- Pop O., Thouret J.-C., Surdeanu V., 2009b.** Geomorphological features of holocene landslides in the pliocene-quaternary Stratovolcanoes Massif of Sancy (France). In: *Studia Universitatis Babeş-Bolyai*. 5-14.
- Prévosto B., 1999.** *Analyse fonctionnelle des boisements spontanés et modélisation de leur développement. Application aux peuplements de Betula pendula et Pinus sylvestris en moyenne montagne volcanique (La Chaîne des Puys, Massif Central)*. Aix-Marseille III, Université de droit, d'économie et des sciences, 201 p.
- Puech C., Thommeret N., Kaiser B., Bailly J.-S., Andres J., Rey F., Mathys N., 2009.** MNT à très haute résolution dans les modelés fortement disséqués : des données aux tests d'application. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 2: 141-152.
- Raclot D., Puech C., Mathys N., Roux B., Jacome A., Asseline J., Bailly J.-S., 2005.** Photographies aérienne prises par drone et modèle numérique de Terrain : apports pour l'observatoire sur l'érosion de Draix. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 1: 7-20.
- Radoane M., Ichim I., Radoane N., 1995.** Gully distribution and development in Moldavia, Romania. *Catena* 24 (2): 127-146.

- Rengers F. K., Tucker G. E., 2015.** The evolution of gully headcut morphology: a case study using terrestrial laser scanning and hydrological monitoring. *Earth Surface Processes and Landforms* 40: 1304-1317.
- Rey F., 2005.** Efficacité des ouvrages de génie biologique pour le piégeage des sédiments dans les ravines incisées dans les marnes (Alpes du Sud, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 1/2005: 21-30.
- Rey F., Ballais J.-L., Marre A., Rovéra G., 2004.** Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *Comptes Rendus Geoscience* 336 (11): 991-998.
- Richet P., 2003.** *Guide des volcans de France*, BRGM éditions, 427 p.
- Rinehart R. P., Hardy C. C., Rosenau H. G., 1978.** Measuring trail conditions with stereo photography. *Journal of Forestry* 76 (8): 501-503.
- Rodzik J., Furtak T., Zglobicki W., 2009.** The impact of snowmelt and heavy rainfall runoff on erosion rates in a gully system, Lublin Upland, Poland. *Earth Surface Processes and Landforms* 34 (14): 1938-1950.
- Römkens M. J. M., Helming K., Prasad S. N., 2002.** Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes. *Catena* 46: 103-123.
- Rosser N. J., Petley D. N., Lim M., Dunning S. A., Allison R. J., 2005.** Terrestrial laser scanning for monitoring the process of hard rock coastal cliff erosion. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 38 (4): 363-375.
- Ruiz A., Kornus W., Talaya J., Colomer J. L., 2004.** *Terrain modeling in an extremely steep mountain: a combination of airborne and terrestrial lidar*. Proceeding of the XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turquie, IAPRS, 281-284.
- Serre F., 1998.** *Chute de neige et manteaux neigeux sur les hautes terres du Massif Central français - Etude d'une contrainte climatique*. Thèse de troisième cycle, Clermont Ferrand, Université Clermont Ferrand II, 329 p.
- Serre F., 2001.** *La neige dans le Massif Central : une contrainte pour la gestion des territoires ?*, Presse Universitaires Blaise Pascal, Clermont Ferrand, 190 p.
- Szeliski R., 2010.** *Computer Vision: Algorithms and Applications*
- Talibart C., 2014.** *Etude microtopographique diachronique d'édifices volcaniques en phase pré-éruptive et éruptive : apports de la photogrammétrie terrestre*. Mémoire de master 2, Clermont Ferrand, Université Blaise Pascal, Laboratoire Magmas et Volcans, 62 p.
- Tarrolì P., Dalla Fontana G., 2009.** Hillslope-to-valley transition morphology: New opportunities from high resolution DTMs. *Geomorphology* 113: 47-57.
- Thénoz M., 1981.** La pratique touristique estivale et son impact dans un espace protégé : le cas de la Vallouise dans le parc national des Ecrins. *Revue de géographie de Lyon* 56 (3): 275-302.
- Thomas J. T., Iverson N. R., Burkart M. R., Kramer L. A., 2004.** Long-term growth of a valley-bottom gully, western Iowa. *Earth Surface Processes and Landforms* 29 (8): 995-1009.
- Tinsley B. E., Fish E. B., 1985.** Evaluation of trail erosion in Guadalupe Mountains National Park, Texas. *Landscape Planning* 12 (1): 29-47.
- Tomczyk A. M., Ewertowski M., 2013.** Quantifying short-term surface changes on recreational trails: The use of topographic surveys and 'digital elevation models of differences' (DODs). *Geomorphology* 183 (0): 58-72.

- Vaisse L., 2005.** *Quantification et gestion de l'érosion des chemins de randonnée dans la Chaîne des Puys*. Mémoire de Master Clermont Ferrand, Université Blaise Pascal, Geolab, 72 p.
- Vaisse L., 2006.** *La dégradation des chemins de randonnée dans la Chaîne des Puys*. Mémoire de Master, Clermont Ferrand, Université Blaise Pascal, Geolab, 67 p.
- Valadas B., 1984.** *Les hautes terres du Massif Central français - Contribution à l'étude des morphodynamiques récentes sur les versants cristallins et volcaniques*. Thèse d'Etat, Paris, Université de Paris I Panthéon-Sorbonne, 927 p.
- Valentin C., Poesen J., Li Y., 2005.** Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena* 63 (2-3): 132-153.
- Vandekerckhove L., Poesen J., Govers G., 2003.** Medium-term gully headcut retreat rates in Southeast Spain determined from aerial photographs and ground measurements. *Catena* 50 (2-4): 329-352.
- Vandekerckhove L., Poesen J., Oostwoud Wijdenes D., Gyssels G., 2001.** Short-term bank gully retreat rates in Mediterranean environments. *Catena* 44 (2): 133-161.
- Veyret Y., 1978.** *Modelés et formations d'origine glaciaire dans le Massif Central français - problèmes de distribution et de limites dans un milieu de moyenne montagne*. Thèse d'Etat, Paris, Université de Paris I Panthéon-Sorbonne, 783 p.
- Veyret Y., Hotyat M., Bouchot B., 1990.** L'érosion d'origine anthropique dans un milieu de moyenne montagne : le Massif Montdorien. In: *La Terre et les Hommes, Mélanges offert à Max Derruau*. 545-556.
- Vianello A., Cavalli M., Tarolli P., 2009.** LiDAR-derived slopes for headwater channel network analysis. *Catena* 76 (2): 97-106.
- Walker R. I., 1968.** *Photography as an aid to wilderness resource inventory and analysis*. Fort Collins, Colorado States University, 114 p.
- Westoby M. J., Brasington J., Glasser N. F., Hambrey M. J., Reynolds J. M., 2012.** "Structure-from-Motion" photogrammetry : A low-coast, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179: 300-314.
- Whitmore G. D., 1952.** The development of photogrammetry. In: *Manual of photogrammetry (2nd edition)*. American society of photogrammetry, Washington D.C., 1-16.
- Wu Y., Cheng H., 2005.** Monitoring of gully erosion on the Loess Plateau of China using a global positioning system. *Catena* 63 (2-3): 154-166.
- Wu Y., Zheng Q., Zhang Y., Liu B., Cheng H., Wang Y., 2008.** Development of gullies and sediment production in the black soil region of northeastern China. *Geomorphology* 101 (4): 683-691.
- Yoda A., Watanabe T., 2000.** Erosion of mountain hiking trail over a seven-year period in Daisetsuzan National Park Central Hokkaido Japan. *United States, Department of Agriculture, Forest Service Proceeding* 5: 172-178.
- Young A. P., Ashford S. A., 2006.** Application of airborne LIDAR for seacliff volumetric change and beach-sediment budget contributions. *Journal of Coastal Research* 22 (2): 307-318.
- Zucca C., Canu A., Della Peruta R., 2006.** Effects of land use and landscape on spatial distribution and morphological features of gullies in an agropastoral area in Sardinia (Italy). *Catena* 68 (2-3): 87-95.

# ANNEXES



# Annexe 1 : Fiche technique du puits perdu



## LES PUIITS PERDUS > FICHE 4 | GUIDE ÉCOCHANTIER



**Matériaux**  
Compter environ 3 m<sup>3</sup> de matériaux grossier type pouzzolane (20/40) pour un puits de 1,5 m x 1,5 m x 1,5 m de haut.

Le chemin est profilé en auge, l'eau est canalisée sur une longue distance. Elle prend alors de la vitesse et de la force et multiplie sa capacité de transport de matériaux (puy des Goules).

### État des lieux et diagnostic sur le terrain

Lorsque le chemin présente un profil en « auge » et qu'il est très encaissé, il est souvent impossible d'évacuer l'eau régulièrement. C'est pourquoi la mise en place de puits perdus à la sortie des renvois d'eau (ou tranchée à merlon) est une solution technique intéressante.

### Mise en œuvre

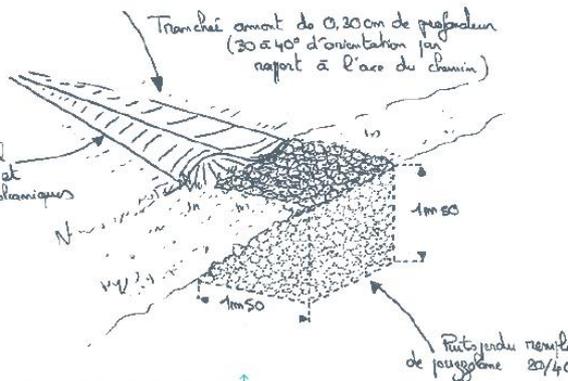
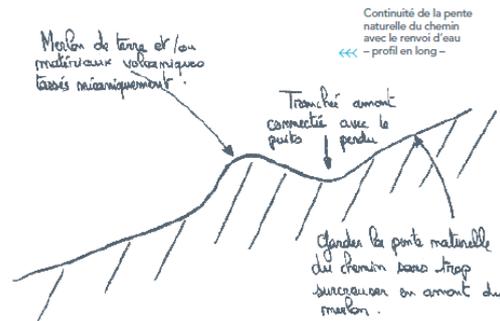
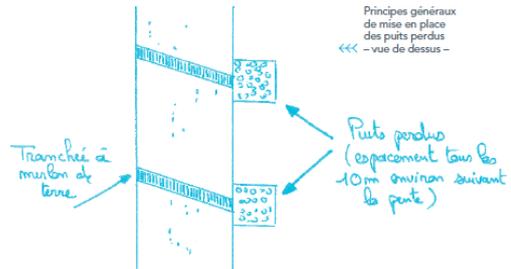


Schéma de principes d'un renvoi d'eau avec un puits perdu

Le puits perdu de forme rectangulaire est creusé à la mini pelle



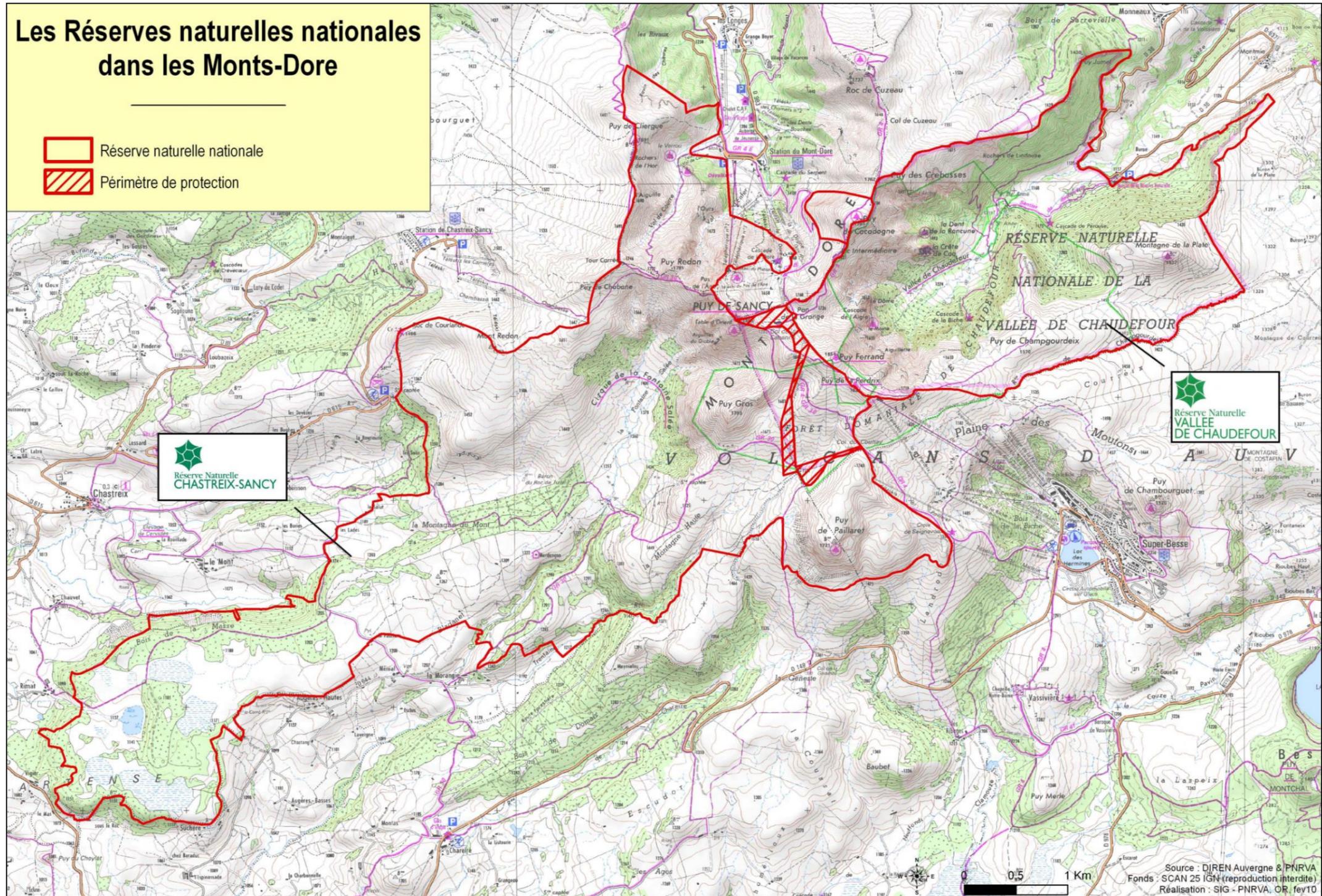
Renvoi d'eau naturel (ou tranchée à merlon) se déversant dans le puits perdu (Chemin des Gravouses)

### Entretien et pérennité de l'aménagement

Il est nécessaire de suivre régulièrement ces aménagements. Deux visites annuelles au minimum, voir plus s'il y a de fortes précipitations. Il est indispensable de remodeler les renvois d'eau naturels et leurs merlons en aval. Un « brassage » des matériaux du puits perdu est souvent nécessaire afin d'éviter un colmatage entre les roches par les dépôts de particules fines... Cette dernière opération s'effectue souvent à l'automne à l'aide d'un engin mécanisé de type mini pelle.



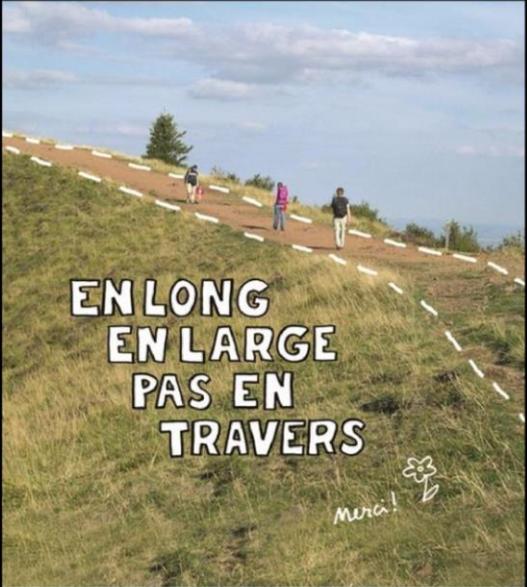
## Annexe 2 : Délimitation des réserves naturelles nationales dans le massif des Monts Dore





## Annexe 3 : Campagne de sensibilisation

### « La Chaîne des Puys, fragile par nature »

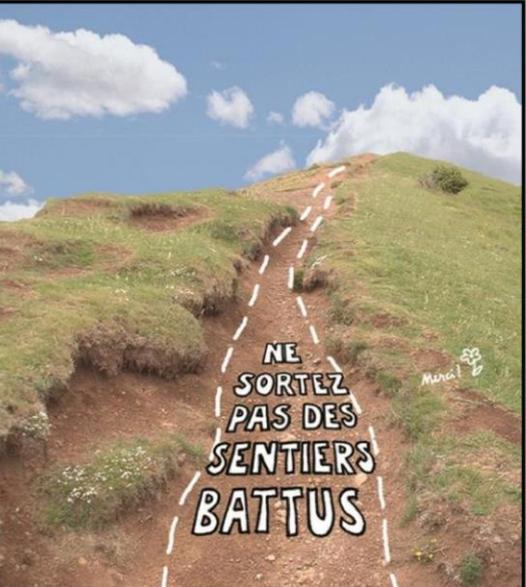


**EN LONG  
EN LARGE  
PAS EN  
TRAVERS**

Merci! 

**Bienvenue dans la Chaîne des Puys, un site naturel classé.**

La structure géologique de la Chaîne des Puys en fait un site particulièrement fragile. Les sols sont jeunes, les sous-sols sont meubles et la destruction de leur couverture végétale les rend très sensibles à l'érosion. L'utilisation de raccourcis fragilise les sols, dérange la faune et dégrade la flore. Merci de ne pas vous écarter des sentiers balisés et de privilégier le chemin déjà tracé. (Certains sentiers sont en cours de réhabilitation, il est important de respecter la signalétique en place pour votre sécurité.)

**NE  
SORTEZ  
PAS DES  
SENTIERS  
BATTUS**

Merci! 

**Bienvenue dans la Chaîne des Puys, un site naturel classé.**

La structure géologique de la Chaîne des Puys en fait un site particulièrement fragile. Les sols sont jeunes, les sous-sols sont meubles et la destruction de leur couverture végétale les rend très sensibles à l'érosion. L'utilisation de raccourcis fragilise les sols, dérange la faune et dégrade la flore. Merci de ne pas vous écarter des sentiers balisés et de privilégier le chemin déjà tracé. (Certains sentiers sont en cours de réhabilitation, il est important de respecter la signalétique en place pour votre sécurité.)



● un puy c'est tout

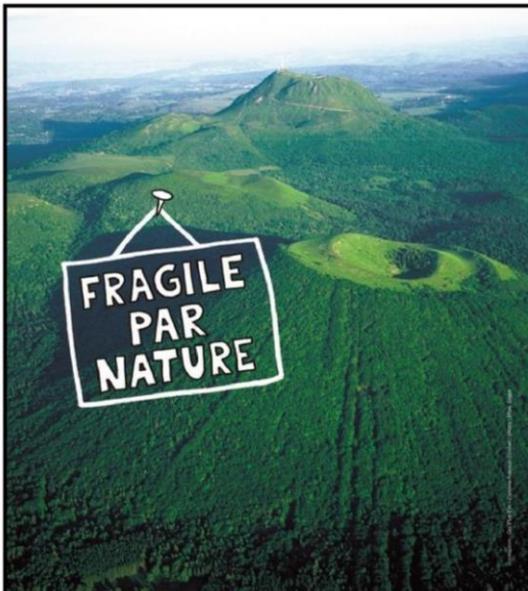


**NE ROULEZ  
PAS DES  
MÉCANIQUES**

**Bienvenue dans la Chaîne des Puys, un site naturel classé.**

La structure géologique de la Chaîne des Puys en fait un site particulièrement fragile. Motos, quads, 4x4... dégradent des sols jeunes, sensibles à l'érosion. Merci de respecter la réglementation en vigueur.



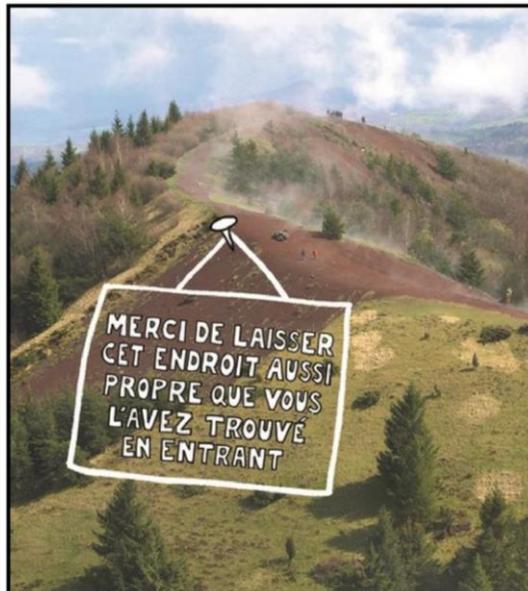


**Bienvenue** dans la Chaîne des Puy, un site naturel classé.

La Chaîne des Puy est un des ensembles volcaniques les plus remarquables d'Europe. Fragile par sa jeunesse géologique et sa forte sensibilité à l'érosion naturelle, elle mérite quelques attentions particulières afin de la protéger et de la préserver. Nous comptons sur vous !  
 Utilisez les aires de stationnements aménagées !!! Ne vous écartez pas des sentiers tracés et balisés !!! Ne jetez aucun déchet !!! Ne dérangez pas les troupeaux en estive !!! Tenez vos chiens en laisse !!! Ne cueillez pas les fleurs protégées !!! Respectez les propriétés privées !!!



● un puy c'est tout



**Bienvenue** dans la Chaîne des Puy, un site naturel classé.

Afin d'éviter toute pollution sur la Chaîne des Puy, merci de conserver vos déchets et débris jusqu'à la prochaine poubelle. Seul un respect de tous permettra de préserver ce site naturel sensible et fragile : nous comptons sur vous.



● un puy c'est tout

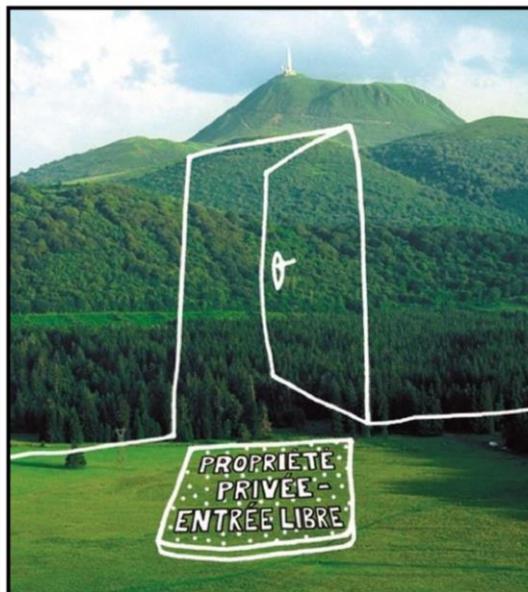


**Bienvenue** dans la Chaîne des Puy, un site naturel classé.

La Chaîne des Puy est une terre d'estive, activité agricole nécessaire à l'équilibre économique et paysager du territoire. Quand le troupeau est dérangé, les risques d'accidents sont augmentés et le travail du berger en difficulté. A l'approche d'un troupeau, merci de le contourner, de veiller à ne pas faire de bruit et à garder vos chiens en laisse ou ne pas les laisser chausser. Merci également de veiller à la bonne fermeture des barrières.



● un puy c'est tout



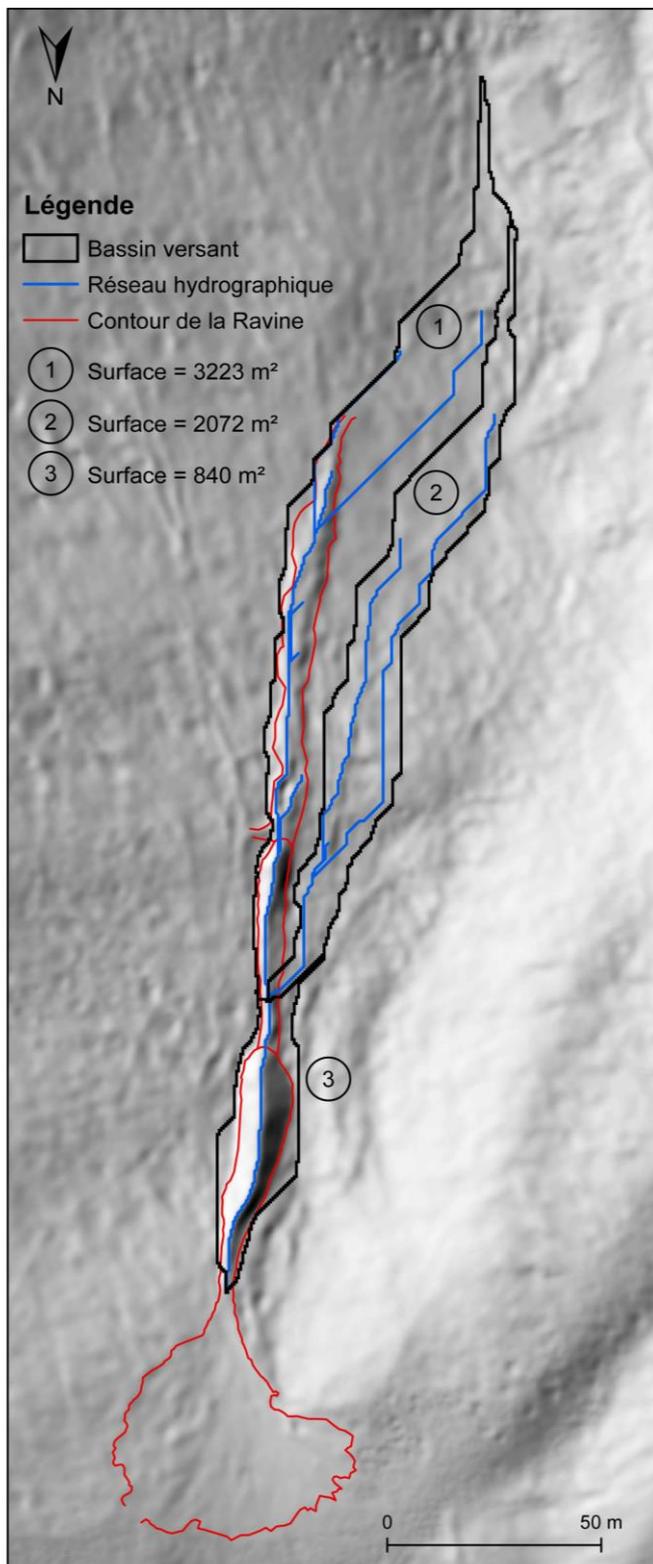
**Bienvenue** dans la Chaîne des Puy, un site naturel classé.

La Chaîne des Puy appartient à des propriétaires privés qui acceptent d'ouvrir gratuitement leurs terrains et de les partager avec vous. Votre comportement responsable et respectueux aide à la préservation du site.



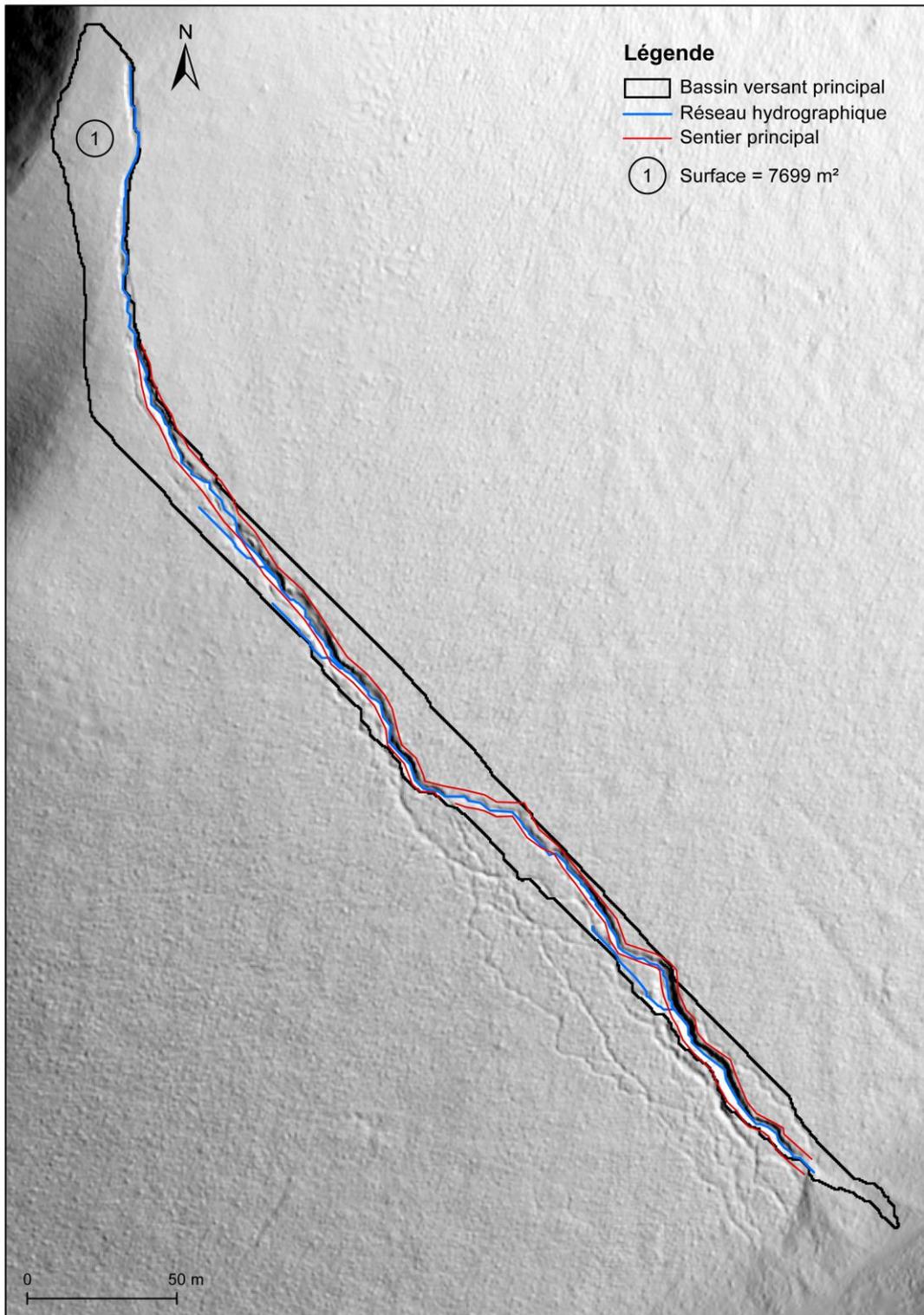
● un puy c'est tout

## Annexe 4 : Bassin versant de la ravine du Petit Puy de Dôme

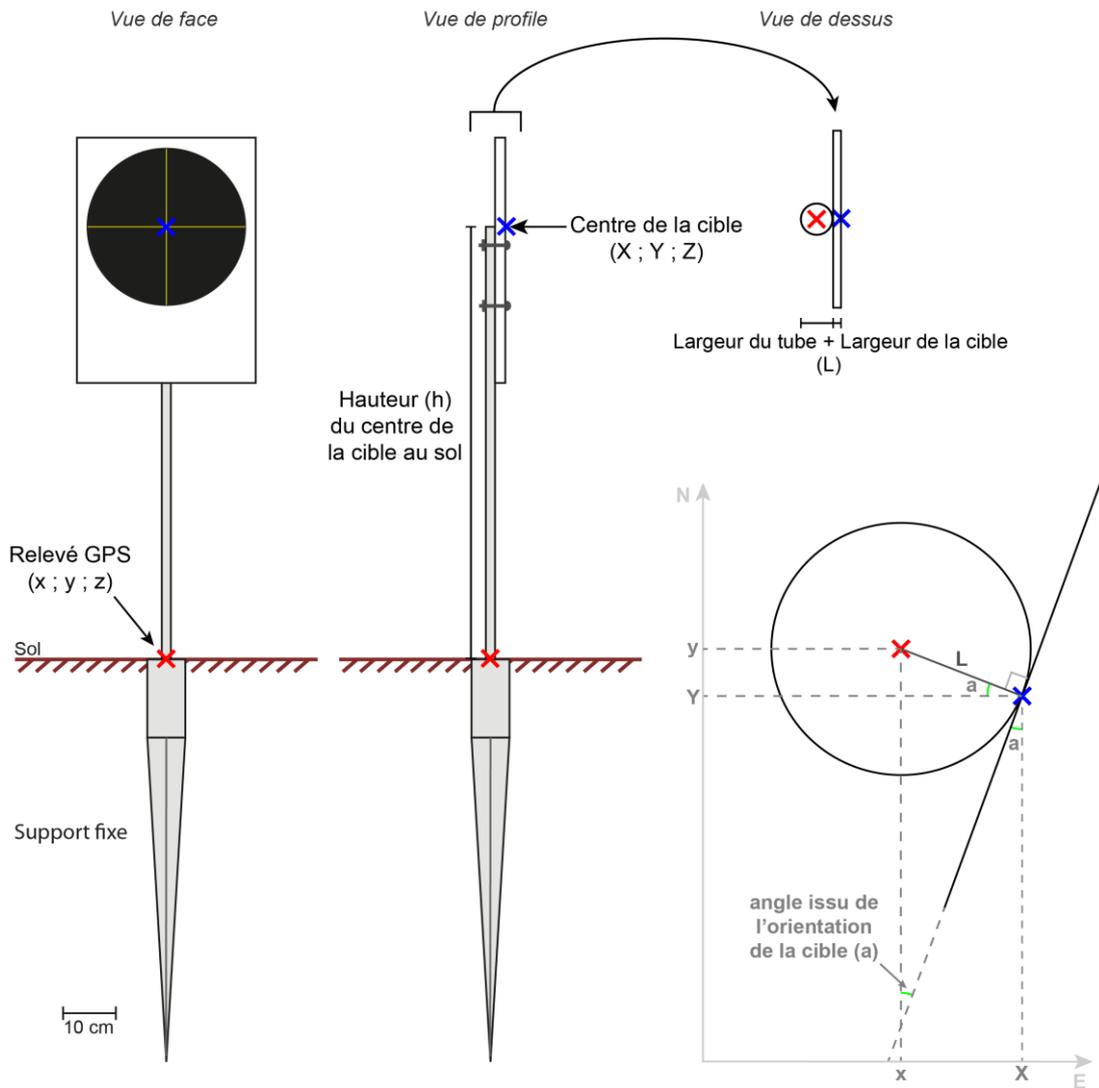


Les données LiDAR utilisées pour calculer les bassins versants de la ravine du Petit Puy de Dôme (Annexe 4) et du sentier sud-est du Puy de Côme (Annexe 5) ont été obtenues via la société Geophenix par le biais d'un projet collectif conduit par le Centre Régional Auvergnat de l'Information Géographique (CRAIG) qui a été soutenu financièrement par le Conseil Général du Puy de Dôme, le Fond Européen de Développement Régional (FEDER) et l'Université Blaise Pascal de Clermont Ferrand (UBP).

## Annexe 5 : Bassin versant du sentier sud-est du Puy de Côme



## Annexe 6 : Corrections appliquées aux cibles du secteur sud-est du Sancy



Pour géoréférencer le modèle numérique de terrain issu du scanner laser, il faut les coordonnées GPS du centre de la cible. Les corrections suivantes doivent être appliquées :

$$X = x + \cos(a) \cdot L$$

$$Y = y - \sin(a) \cdot L$$

$$Z = z + h$$



## Liste des figures

Fig. 1. Localisation des sites d'étude situés dans le Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne (PNRVA) .....	8
Fig. 2. Synthèse méthodologique .....	9
Fig. 3. Exemple de recoupement de sentier sur le Glacier Blanc dans le parc national des Ecrins (Thénoz, 1981).....	19
Fig. 4. Profil longitudinal des types de tête de ravine (Oostwoud Wijdenes D. <i>et al.</i> , 1999). .....	21
Fig. 5. Exemple d'aménagements visant à canaliser les randonneurs.....	23
Fig. 6. Photo d'un chenal d'évacuation creusé à même le substrat sur le versant nord du Puy de Dôme (PNR des Volcans d'Auvergne, 2013).....	24
Fig. 7. Exemple d'embranchement dans le Massif du Sancy (PNR des Volcans d'Auvergne, 2013).....	25
Fig. 8. Murets en pierre (ravine latérale du sentier sud-est du Sancy) et fascine en bois (au pied de la ravine du Petit Puy de Dôme dans la Chaîne des Puys) (PNR des Volcans d'Auvergne, 2013).....	27
Fig. 9. Schéma illustrant la mesure d'incision maximale en fonction des sentiers en terrain plat ou à flanc de versant et en fonction du type de méthode (MIP ou MIC). (Farrell et Marion, 2001). .....	30
Fig. 10. Disposition d'un transect et formule calculant l'air de la section, d'après Cole (1983). .....	31
Fig. 11. Différents mode d'acquisition des photographies aériennes et précision attendue des MNT obtenus (Henry <i>et al.</i> , 2002).....	35
Fig. 12. Rapport B/h en fonction du terrain (Jacome <i>et al.</i> , 2008).....	37
Fig. 13. Exemple d'acquisition de photo en tournant autour d'un objet (Pierrot Deseilligny et Clery, 2011). .....	39
Fig. 14. Exemple d'acquisition linéaire de photos pour modéliser une falaise. (Pierrot Deseilligny et Clery, 2011). .....	39
Fig. 15. Exemple de prises de photo pour une étude en photogrammétrie multi-image dans la province de Murcie au sud-est de l'Espagne (Marzloff et Poesen, 2009).....	40
Fig. 16. Schéma présentant une possible explication concernant la profondeur sous-estimée et la largeur surestimée des ravines (James <i>et al.</i> , 2007). .....	43
Fig. 17. Secteurs bénéficiant d'une protection, d'une gestion des paysages, ou d'un inventaire de la faune et de la flore au sein du PNRVA. ....	52
Fig. 18. Carte géologique de la partie centrale du Massif du Sancy. ....	53
Fig. 19. Carte des pentes du Massif du Sancy, réalisée d'après le MNT à 10 m de 2010 fourni par le CRAIG (Centre Régional Auvergnat de l'Information Géographique). ....	54
Fig. 20. Synthèse des données climatiques disponibles autour du Puy de Sancy. ....	56
Fig. 21. Carte de la végétation du massif du Sancy, d'après les données du programme CHANES (Natura 2000, 2010). .....	58
Fig. 22. Extrait de la carte des activités touristiques et de pleine nature du site Natura 2000 Monts Dore (Belenguier et Birard, 2013). .....	60
Fig. 23. Extrait de la carte d'état des lieux 2012 des sentiers de randonnée du site Natura 2000 du Mont Dore (Belenguier et Birard, 2013).....	60
Fig. 24. Comparaison de photographies prises avant 1907 et en 2010. La photo de gauche est issue d'une carte postale qui a été envoyée en 1907. Les zones entourées en couleur permettent de saisir visuellement les évolutions. ....	62
Fig. 25. Secteur d'étude du sentier du Col d'Enfer .....	63
Fig. 26. Carte géologique de la zone centrale de la Chaîne des Puys. ....	64
Fig. 27. Carte des pentes de la partie centrale de la Chaîne des Puys, réalisée d'après le MNT à 10 m de 2010 du CRAIG. ....	65
Fig. 28. Diagramme ombrothermique du Puy de Dôme réalisé avec les données climatiques de Météo France de 1948 à 1981 et de 1995 à 2011.....	66
Fig. 29. Carte de la végétation de la partie centrale de la Chaîne des Puys, réalisée d'après les données du programme CHANES de Natura 2000.....	68
Fig. 30. Périmètres de la coopérative d'estives d'Orcines (Lefeuvre, 2013). .....	69

Fig. 31. Extrait de la carte répertoriant l'état des sentiers du site Natura 2000 de la Chaîne des Puys (Birard et Soulier, 2011).....	70
Fig. 32. Affiches de la campagne de sensibilisation, « La Chaîne des Puys, fragile par nature », réalisé par le Syndicat mixte du Parc des Volcans d'Auvergne (Birard et Soulier, 2011). .....	71
Fig. 33. Photo aérienne de 1974, avant la formation de la ravine du Petit Puy de Dôme (Source : IGN).....	72
Fig. 34. Photographie de la ravine du petit puy de Dôme.....	73
Fig. 35. Évolution du contour de la ravine du Petit Puy de Dôme entre 1991 et 2007 sur une photo aérienne de 1999 (Fournier-Teissedre, 2008). .....	74
Fig. 36. Carte topographique du Puy de Côme, extrait de carte IGN, datant à gauche de 1991 et à droite de 2007. L'ellipse rouge représente l'emplacement du sentier étudié. ....	75
Fig. 37. Scanner laser Optech Ilris 3D.....	79
Fig. 38. DGPS Magellan.....	79
Fig. 39. Nuage de points obtenu par relevé scanner laser.....	79
Fig. 40. Cible permettant de géoréférencer les nuages de points. ....	81
Fig. 41. Emplacement des différentes cibles présentes sur notre secteur d'étude.....	81
Fig. 42. GPS différentiel utilisé pour le suivi d'érosion. La photo A montre la base du DGPS Leica, la photo B le DGPS Magellan.....	84
Fig. 43. Ensemble des points d'un relevé topographique effectué sur la ravine du Petit puy de Dôme (02.09.11).....	86
Fig. 44. Ensemble des données topographiques brutes relevées sur la ravine du Petit Puy de Dôme.....	87
Fig. 45. Ensemble de points d'un relevé topographique effectué sur le sentier du col d'Enfer (12.10.10).....	90
Fig. 46. Méthode manuelle de suivi de l'érosion par transect sur les sentiers. ....	91
Fig. 47. Position des transects sur le sentier du Puy de Côme. ....	91
Fig. 48. Station météo installée près du haut de la ravine du petit Puy de Dôme. ....	93
Fig. 49. Indices du passage du troupeau ovin. A. Piétinement sur la partie haute de la ravine. B. Bord de la ravine éboulé. ....	94
Fig. 50. Position de la caméra par rapport au secteur d'étude. ....	95
Fig. 51. Image extraite d'une des vidéos filmant le passage des randonneurs (encerclés en rouge).....	96
Fig. 52. Sectorisation du sentier.....	96
Fig. 53. Comparaisons entre les différents MNT issus des trois relevés effectués sur le terrain. ....	108
Fig. 54. Zoom sur la partie haute de la pyramide du Sancy (secteur 1).....	109
Fig. 55. Zoom sur une des ravines latérales à la base de la pyramide du Sancy (secteur 2).....	110
Fig. 56. Zoom sur un secteur situé en contrebas du sentier, au pied de la pyramide du Sancy, versant sud (secteur 3). ....	111
Fig. 57. Partie supérieure du sentier menant au sommet du Sancy (secteur 4). ....	112
Fig. 58. Évolution du tracé du sentier du Col d'Enfer entre 1980 et 2009 (d'après les photos aériennes de l'IGN).....	114
Fig. 59. Évolution des bords du sentier lors des quatre relevés effectués au DGPS. ....	115
Fig. 60. Comparaisons des TIN effectués à partir des données relevées au GPS Différentiel. ....	118
Fig. 61. Aménagements mis en place entre le mois de juillet et le mois d'août 2010. ....	119
Fig. 62. Utilisation du sentier par les randonneurs en fonction de leur sens de randonnée et de l'aménagement ou non du sentier (Fig. 61). ....	121
Fig. 63. Évolution de la tête de ravine principale durant l'été 2010. ....	126
Fig. 64. Évolution saisonnière du contour de la ravine du Petit Puy de Dôme entre 2007 et 2012. ....	127
Fig. 65. Évolution du contour de la ravine du Petit Puy Dôme au cours de l'été 2011.....	128
Fig. 66. Profils en long et en travers de relevés DGPS effectués entre 2007 et 2012 sur la ravine du Petit Puy de Dôme. ....	129
Fig. 67. Profils en long et en travers de relevés DGPS effectués au cours de l'été 2011 sur la ravine du Petit Puy de Dôme.....	130
Fig. 68. Évolution de l'amont de la ravine principale. Les zones encerclées mettent en évidence des mottes en cours de migration vers le talweg.....	131
Fig. 69. Photos de la Ravine du Petit Puy de Dôme, avec le cône de déjection en premier plan.....	132
Fig. 70. Comparaison de nos relevés DGPS avec le relevé LiDAR aéroporté de la Chaîne des Puys.....	133
Fig. 71. Box plots représentant l'erreur de l'ensemble des points de chaque relevé.....	137
Fig. 72. Trajectoire du ruissellement concentré entre la partie haute de la ravine et la ravine secondaire. ....	137

Fig. 73. Cartographie de l'évolution saisonnière de la ravine du Petit Puy de Dôme. ....	138
Fig. 74. Cartographie de l'évolution de la ravine du Petit Puy de Dôme : zoom sur l'été 2011. ....	139
Fig. 75. Affouillement latéral de près de 90 cm en rive gauche entre le transect 16 et le transect 17. ....	142
Fig. 76. Données relevées sur le sentier sud-est du Puy de Côme entre 2006 et 2011 : transect 1 à 11. ....	142
Fig. 77. Photo représentant une couche de scories indurées, juste en aval du transects 14. ....	148
Fig. 78. Erreur méthodologique concernant le relevé topographique du transect 2. ....	148
Fig. 79. Évolution des tranches d'érosion de chaque transect du sentier sud-est du Puy de Côme entre avril 2006 et avril 2011. ....	149
Fig. 80. Précipitations journalières des stations météo du Puy de Dôme et du Petit Puy de Dôme. ....	151
Fig. 81. Courbes des précipitations cumulées entre chaque relevé topographique inter-saisonnier sur la ravine du Petit Puy de Dôme. ....	152
Fig. 82. Courbes des précipitations cumulées entre chaque relevé topographique inter-saisonnier sur le sentier sud-est du Puy de Côme. ....	153
Fig. 83. Comparaison des données de précipitations entre la station météo France situé au sommet du Puy de Dôme et la station météo temporaire installée sur le haut de la ravine du Petit Puy de Dôme. ....	153
Fig. 84. Précipitations journalières et cumuls enregistré sur la station météo temporaire du Petit Puy de Dôme entre chaque relevé topographique effectué au cours de l'été 2011. ....	155
Fig. 85. Températures journalières relevées sur les stations météo du Puy de Dôme et Petit Puy de Dôme. ....	157
Fig. 86. Problèmes posés par l'utilisation d'un scanner laser longue portée (Astrade <i>et al.</i> , 2011). ....	169
Fig. 87. Comparaison des relevés au GPS différentiel et par photogrammétrie terrestre (Genet <i>et al.</i> , 2011). ....	171
Fig. 88. Photo représentant les bords de la ravine du Petit Puy de Dôme lors du test de photogrammétrie (Genet <i>et al.</i> , 2011). ....	171
Fig. 89. Moyennes journalières des hauteurs de neige enregistrées sur la ravine du Petit Puy de Dôme entre le 14 avril 2011 et le 7 novembre 2012. ....	174
Fig. 90. Champs d'application des différentes méthodes de suivi topographique utilisées. ....	176
Fig. 91. Comparaison des types de données obtenues à partir des différentes méthodes utilisées pour le suivi topographique. ....	177
Fig. 92. Évolution des surfaces de sol nu entre 1980 et 2009 du secteur situé entre le sommet du Sancy et le Col de la Cabane. ....	181
Fig. 93. Schéma prévisionnel de l'évolution du sentier du Col d'Enfer. ....	184
Fig. 94. Proportion de randonneurs marchant en dehors du sentier du Col d'Enfer. ....	185
Fig. 95. Photos des fascines en bois mises en place à la sortie du cône de déjection de la ravine du Petit Puy de Dôme. ....	187
Fig. 96. Schéma du fonctionnement d'une fascine. ....	188
Fig. 97. Schéma prévisionnel de l'évolution de la ravine du Petit Puy de Dôme. ....	188
Fig. 98. Évolution prévisionnelle des transects du Puy de Côme. ....	194
Fig. 99. Indices de processus érosifs hivernaux sur la ravine du Petit Puy de Dôme. ....	197
Fig. 100. Marques d'érosion estivale photographiées après l'été 2010. ....	198
Fig. 101. Évolution générale saisonnière d'un sentier/ravine formé dans un substrat de type scoriacé de la Chaîne des Puys. ....	199
Fig. 102. Diagrammes ombrothermiques des stations météorologiques les plus proches de nos secteurs d'étude. ....	203
Fig. 103. Les principales formes d'érosion des sentiers de randonnée sous influence climato-anthropique. ....	205
Fig. 104. Comparaison des photos du sentier sud-est du Massif du Sancy de 1907, 2010 et 2015, en termes de substrat affleurant. ....	206
Fig. 105. Proposition d'aménagements sur le secteur du Col d'Enfer. ....	207
Fig. 106. Proposition d'aménagement sur la ravine du Petit Puy de Dôme. ....	208
Fig. 107. Propositions d'aménagements pour lutter contre l'érosion des sentiers de randonnée. ....	211
Fig. 108. Photo des aménagements du sentier sud-est du Sancy réalisés au cours de l'été 2015. ....	214
Fig. 109. Photo des aménagements récents sur le sentier du Col d'Enfer. ....	215
Fig. 110. Photo montrant l'incision de la partie amont du sentier sud-est du Puy de Côme au niveau du transect 6. ....	215
Fig. 111. Photo représentant la naissance d'une rigole parallèle à la ravine du Petit Puy de Dôme. ....	216
Fig. 112. Les facteurs de contrôle de l'évolution des sentiers de moyenne montagne auvergnate. ....	217

Fig. 113. Fascine en bois installé sur le bas de la ravine du Petit Puy de Dôme.....	218
Fig. 114. Outils d'aide à la décision pour les gestionnaires.....	222

# Liste des tableaux

Tableau 1. Comparaison des méthodes de classement des sentiers de Frissell (1978), Bratton <i>et al.</i> (1979) et Marion <i>et al.</i> (2006).....	17
Tableau 2. Typologie des formes et des modelés d’incision selon leur taille et MNT permettant de les appréhender (Puech <i>et al.</i> , 2009).....	20
Tableau 3. Synthèse des différentes méthodes quantitatives de suivi d’érosion sur les ravines et les sentiers de randonnées. ....	46
Tableau 4. Tableau synthétique des études et méthodes employées sur chaque terrain.....	99
Tableau 5. Bilan érosion – accumulation effectué à partir des scans des différents secteurs (Fig. 54, Fig. 55, Fig. 56, Fig. 57).....	112
Tableau 6. Taux d’érosion des différents secteurs étudiés et des différentes périodes inter-relevé sur le sentier sud-est du Sancy. ....	113
Tableau 7. Bilan érosion – accumulation réalisé à partir des TIN (Fig. 60). ....	117
Tableau 8. Taux d’érosion du sentier du Col d’Enfer, calculés en prenant en compte la marge d’incertitude (d’après le Tableau 7). ....	117
Tableau 9. Nombre de randonneurs effectuant du hors sentier. ....	120
Tableau 10. Bilan érosion – accumulation réalisé à partir des TIN (Fig. 73, Fig. 74). ....	136
Tableau 11. Taux d’érosion annuels de la ravine du Petit Puy de Dôme en fonction des différentes périodes inter-relevé (prise en compte de la marge d’incertitude, Tableau 10). ....	136
Tableau 12. Taux d’érosion par tranche au niveau des différents transects du sentier sud-est du Puy de Côme. ....	141
Tableau 13. Profondeur des affouillements latéraux des berges du sentier. Mesures effectuées lors de la campagne du 27 octobre 2010. ....	142
Tableau 14. Analyse fréquentielle des précipitations avec un ajustement par la méthode des moments (Loi de Gumbel). Analyse effectuée d’après les données de Météo France sur la période 1948 – 2011. ....	154
Tableau 15. Synthèse des données de précipitations liées aux relevés intra-saisonniers de la période estivale 2011 (Fig. 84).....	156
Tableau 16. Nombre de cycles gel-dégel en fonction des périodes entre chaque relevé. Tableau réalisé à partir des données météo France du Puy de Dôme et de la station temporaire du Petit Puy de Dôme (Fig. 85).....	156
Tableau 17. Tableau synthétique des principaux résultats obtenus sur les sites d’étude de la Chaîne des Puys. ....	159
Tableau 18. Taux d’érosion des ravines dans le monde : éléments de comparaison. ....	191
Tableau 19. Taux d’érosion des sentiers, calculés par la méthode des transects, dans le monde : éléments de comparaison. ....	195



# Table des matières

<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>1</b>
<b>AVANT-PROPOS</b> .....	<b>3</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>5</b>
<b>PARTIE 1 : ÉTAT DE L'ART</b> .....	<b>11</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>13</b>
<b>CHAPITRE 1 : SENTIERS ET RAVINES EN MOYENNE MONTAGNE : FORMES D'ÉROSION ET DISPOSITIFS ANTI-ÉROSIFS</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1. Descriptions et classements des sentiers : les méthodes qualitatives</b> .....	<b>15</b>
1.1.1. Méthodes de classement des sentiers .....	15
1.1.2. Méthodes de recensement de l'érosion.....	18
<b>1.2. Formes d'érosion des sentiers et ravines</b> .....	<b>19</b>
1.2.1. Multiplication de sentiers .....	19
1.2.2. Le ravinement.....	20
<b>1.3. Dispositifs anti-érosifs</b> .....	<b>22</b>
1.3.1. Les aménagements sur le sentier .....	22
1.3.2. Les aménagements de lutte contre le ravinement .....	25
1.3.3. Les aménagements lourds.....	27
<b>Conclusion</b> .....	<b>28</b>
<b>CHAPITRE 2 : LES DIFFERENTES METHODES DE QUANTIFICATION DE L'ÉROSION DES SENTIERS OU RAVINES</b> .....	<b>29</b>
<b>2.1. Les méthodes de relevé à une dimension</b> .....	<b>29</b>
2.1.1. Méthodes de la mesure d'incision maximum .....	29
<b>2.2. Les méthodes de relevé à deux dimensions</b> .....	<b>31</b>
2.2.1. Méthode des transects .....	31
2.2.2. Méthodes de la photo-interprétation.....	32
<b>2.3. Les méthodes de relevé à trois dimensions</b> .....	<b>33</b>
2.3.1. Méthodes de mesure à l'aide d'un GPS ou d'une station totale .....	33
2.3.2. Méthodes de photogrammétrie .....	34
2.3.2.1. Méthodes de photogrammétrie stéréoscopique .....	35
2.3.2.2. Méthodes de photogrammétrie multi-image .....	38
2.3.3. Méthodes fondées sur la lasergrammétrie .....	40
2.3.3.1. Méthode du LiDAR aéroporté .....	41
2.3.3.2. Méthode du LiDAR terrestre .....	44
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>45</b>
<b>PARTIE 2 : SITES D'ETUDE ET METHODOLOGIE</b> .....	<b>47</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>49</b>
<b>CHAPITRE 3 : PRESENTATION DES SITES D'ETUDE</b> .....	<b>51</b>

<b>3.1. Le Massif du Sancy .....</b>	<b>53</b>
3.1.1. Contexte géologique et bioclimatique .....	53
3.1.1.1. Un stratovolcan à topographie contrastée .....	53
3.1.1.2. Un climat montagnard à influence océanique .....	55
3.1.1.3. Une végétation subalpine .....	56
3.1.1.4. L'importance des activités touristiques au sein du Massif du Sancy .....	59
3.1.2. Les secteurs d'étude .....	61
3.1.2.1. Entre le sommet du Sancy et Col de la Cabane .....	61
3.1.2.2. Secteur du Col d'Enfer .....	62
<b>3.2. La Chaîne des Puys.....</b>	<b>63</b>
3.2.1. Contexte géologique et bioclimatique .....	63
3.2.1.1. Un alignement de volcans hétérogènes .....	63
3.2.1.2. Une variabilité climatique est-ouest et nord-sud .....	66
3.2.1.3. Une fermeture paysagère .....	67
3.2.1.4. Des activités humaines variées .....	68
3.2.2. Les secteurs d'étude .....	71
3.2.2.1. La Ravine du Petit Puy de Dôme .....	71
3.2.2.2. Le sentier sud-est du Puy de Côme.....	74
<b>CHAPITRE 4 : METHODOLOGIE .....</b>	<b>77</b>
<b>4.1. Les données topographiques.....</b>	<b>77</b>
4.1.1. Scanner laser 3D longue portée .....	78
4.1.2. Les GPS différentiels.....	83
4.1.2.1. Le DGPS Leica sur la ravine du Petit Puy de Dôme .....	84
4.1.2.2. Le DGPS Magellan sur le sentier du Col d'Enfer.....	89
4.1.3. Mesures manuelles .....	90
<b>4.2. Données complémentaires .....</b>	<b>92</b>
4.2.1. Collecte de données climatiques .....	92
4.2.2. Fréquentation touristique et occupation du sentier par les randonneurs.....	93
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>97</b>
<b>PARTIE 3 : RESULTATS.....</b>	<b>101</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>103</b>
<b>CHAPITRE 5 : LES SENTIERS DU MASSIF DU SANCY : PRESENTATION DES RESULTATS.....</b>	<b>105</b>
<b>5.1. Suivis topographiques.....</b>	<b>105</b>
5.1.1. Sentier sud-est du Sancy.....	105
5.1.2. Le Col d'Enfer.....	113
5.1.2.1. Évolution du tracé du sentier .....	113
5.1.2.2. Évolution de la superficie et des bords du sentier.....	114
5.1.2.3. Bilan érosion – accumulation .....	115
<b>5.2. Fréquentation touristique et pratique des sentiers .....</b>	<b>118</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>121</b>
<b>CHAPITRE 6 : LES SENTIERS DE LA CHAINE DES PUY : PRESENTATION DES RESULTATS.....</b>	<b>123</b>
<b>6.1. Suivis topographiques.....</b>	<b>123</b>
6.1.1. La ravine du Petit Puy de Dôme .....	123
6.1.1.1. Évolution de la superficie de la ravine.....	124
6.1.1.2. Sections transversales et profils en long .....	125
6.1.1.3. Bilan érosion – accumulation de 2007 à 2012 .....	133
6.1.2. Le sentier sud-est du Puy de Côme .....	140

6.1.2.1. Évolution des sections transversales .....	140
6.1.2.2. Évolution des tranches d'érosion .....	147
<b>6.2. Traitement des données climatiques .....</b>	<b>150</b>
6.2.1. Les précipitations .....	150
6.2.1.1 Données pluviométriques : comparaison de la station météo France du Puy de Dôme et de la station du Petit Puy de Dôme .....	150
6.2.1.2. Les précipitations inter-relevés .....	150
6.2.1.3. Détermination des valeurs extrêmes et de leur période de retour .....	154
6.2.1.4. Zoom sur les précipitations de la ravine du Petit puy de Dôme au cours de l'été 2011 .....	154
6.2.2. Les températures .....	156
<b>Conclusion .....</b>	<b>158</b>
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>161</b>
<b>PARTIE 4 : INTERPRETATION – DISCUSSION.....</b>	<b>163</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>165</b>
<b>CHAPITRE 7 : APPORTS ET LIMITES DES METHODES UTILISEES.....</b>	<b>167</b>
<b>7.1. La lasergrammétrie .....</b>	<b>167</b>
<b>7.2. Les méthodes utilisant un gps différentiel .....</b>	<b>169</b>
<b>7.3. La méthode de relevé manuel .....</b>	<b>172</b>
<b>7.4. Les relevés climatiques .....</b>	<b>173</b>
<b>7.5. L'étude sur le comportement des randonneurs .....</b>	<b>174</b>
<b>conclusion .....</b>	<b>175</b>
<b>CHAPITRE 8 : ANALYSE DES RESULTATS PAR SECTEUR D'ETUDE .....</b>	<b>179</b>
<b>8.1. Sites du Massif du Sancy .....</b>	<b>179</b>
8.1.1. Sentier sud-est du Puy de Sancy.....	179
8.1.2. Sentier du Col d'Enfer.....	182
8.1.2.1. Évolution du sentier .....	182
8.1.2.2. Comportement des randonneurs .....	184
<b>8.2. Sites de la Chaîne des Puys .....</b>	<b>186</b>
8.2.1. Ravine du Petit Puy de Dôme.....	186
8.2.1.1. Des données actuelles vers l'évolution future de la ravine .....	186
8.2.1.2. Comparaison avec l'évolution d'autres ravines en milieux de moyenne montagne .....	189
8.2.2. Sentier sud-est du Puy de Côme .....	192
8.2.3. Saisonnalité du fonctionnement des sentiers de la Chaîne des Puys.....	196
8.2.3.3. Un processus cyclique en faveur de l'érosion.....	198
<b>Conclusion .....</b>	<b>199</b>
<b>CHAPITRE 9 : ENSEIGNEMENTS GENERAUX ET PRECONISATIONS DE GESTION .....</b>	<b>201</b>
<b>9.1. Du sentier à la ravine : une évolution sous contrainte climato-anthropique .....</b>	<b>201</b>
<b>9.2. Impacts des aménagements antérieurs et préconisations en matière de gestion .....</b>	<b>205</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>212</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>213</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>225</b>

ANNEXES .....	233
LISTE DES FIGURES.....	245
LISTE DES TABLEAUX.....	249

## RESUME

L'érosion des sentiers de moyenne montagne auvergnate est étudiée dans cette thèse à travers l'évolution morphologique de quatre secteurs présentant des stades d'érosion et des rythmes d'évolution différents, répartis dans le Massif du Sancy et la Chaîne des Puys. Notre approche méthodologique repose sur le croisement de trois jeux de données inédits collectés sur le terrain : relevés topographiques, données climatiques et cartographie du comportement des randonneurs. Les relevés topographiques fins mobilisent trois méthodes complémentaires de collecte de données (lasergrammétrie, GPS différentiel et relevés manuel). L'analyse croisée de l'ensemble de ces données nous a permis de : (1) quantifier des volumes d'érosion et de dépôt ; (2) cartographier les secteurs les plus sensibles à l'érosion ; (3) identifier une saisonnalité des processus érosifs ; (4) proposer un outil d'aide à la gestion des sentiers.

Nos résultats de quantification de l'érosion des sentiers indiquent une différenciation des secteurs étudiés. Ce gradient d'érosion constaté s'explique par : le contexte climatique local qui commande la saisonnalité des processus d'érosion, la fréquentation touristique inégale et l'érodabilité du substrat. En réponse à cette érosion, nous avons observé la mise en place de divers aménagements (fils guide, fascines, murets, rigoles d'évacuation...), globalement efficaces. Néanmoins, il apparaît qu'un affinement du positionnement de ces derniers, sur la base d'une compréhension des processus érosifs sur un temps plus long, optimiserait le rôle protecteur de ces ouvrages.

**Mots-clés :** Lasergrammétrie terrestre, GPS différentiel, érosion des sentiers, impact climatique, impact anthropique, Chaîne des Puys, Massif du Sancy.

## ABSTRACT

In this thesis, weathering of hiking trails has been studied in the low mountain ranges of the Massif Central (Auvergne, France) through the morphological comparison of four sectors in the Massif du Sancy and the Chaîne des Puys, each one presenting different erosion stages and rhythms of evolution. Our methodological approach is based on the crossing of three unpublished field datasets: topographic data, climate data and cartography of hiker behavior. High resolution topographic data mobilized three complementary data collection methods (terrestrial laser scanning, GPS monitoring and manual monitoring). Cross-analysis of all these data allowed us to: (1) quantify erosion and depositional volumes; (2) map the weathering sensitivity of studied areas; (3) identify the seasonality of weathering processes; (4) propose an operational evaluation tool for the management of hiking trails in low mountain ranges. Weathering quantification results show a clear differentiation of the studied areas. This contrasting erosion gradient has been proved to be linked to: local bioclimatic parameters which command the seasonality of weathering processes, irregular touristic attendance and substratum durability. In response to this erosion, varied management were introduced (guideline, wattle fence, low wall, water bars ...) and globally effective. Nevertheless, it appears that a refinement of the positioning adjustments, based on an understanding of weathering processes over a longer period would optimize the protective role of these structures.

**Key words:** Terrestrial laser scanning, Global positioning system trail erosion, climatic impact, human impact, Chaîne des Puys, Massif du Sancy (French Massif Central).