



HAL
open science

Du drain potentiel au drain réel : caractérisation spatiale des chemins de l'eau de la Vallée Obscure (Gardon d'Anduze)

J. Gille

► **To cite this version:**

J. Gille. Du drain potentiel au drain réel : caractérisation spatiale des chemins de l'eau de la Vallée Obscure (Gardon d'Anduze). Sciences de l'environnement. 2007. hal-02590286

HAL Id: hal-02590286

<https://hal.inrae.fr/hal-02590286v1>

Submitted on 15 May 2020

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.

07/0051

Université Montpellier 2
Département des Sciences de la Terre et de l'Environnement de Montpellier

Mention Biologie Géosciences Agroressources Environnement
Master 2 Recherche Eau et Environnement

RP
GIL
φ 884

Mémoire de Recherche de 2^{ème} Année

Présenté par **Julian GILLE**

Année 2006/2007

Du drain potentiel au drain réel

Caractérisation spatiale des chemins de l'eau de la
Vallée Obscure (Gardon d'Anduze)



Sous la direction de :

C. PUECH Directeur de Recherche, UMR TETIS

P-A. AYRAL Ingénieur de Recherche, Ecole des Mines d'Alès

Travaux réalisés à la Maison de la Télédétection sur Montpellier et au
Laboratoire du Génie Environnement Industriel de l'Ecole des Mines d'Alès





Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement les deux tuteurs de cette étude, Christian Puech et Pierre-Alain Ayrat, pour leur disponibilité, leur encouragement et leur rigueur. Chacun, dans son domaine respectif, a essayé de me transmettre son enthousiasme et quelques rudiments pour mener à bien ce travail de recherche.

J'adresse aussi ma reconnaissance à Sophie Sauvagnargues-Lesage pour ses conseils méthodologiques et son regard extérieur sur l'étude.

Pour la partie montpelliéraine de ce travail, je remercierai l'ensemble de l'équipe de l'UMR TETIS, avec une mention particulière pour :

- Sylvie Blin pour son initiation aux outils de recherche bibliographique,
- Laurent Albrech pour son aide dans la prise en main des GPS et du traitement des données,
- Guy Roussin pour les dépannages informatiques,
- et enfin Jean-Stéphane Bailly, Andrés Jacome, Sylvie Durrieu et Sylvain Labbé pour leurs aides ponctuelles dans mon apprentissage des différents logiciels informatiques.

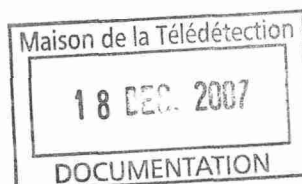
C'est avec joie que j'ai retrouvé le centre LGEI, lieu d'un précédent travail de recherche. Merci pour la sympathie témoignée des personnes de l'équipe Biodiagnostic et Métrologie avec lesquelles j'ai coopéré l'année dernière. Ainsi, j'ai pu assister à la finalisation du projet européen dans lequel mon étude s'est intégrée.

Merci à l'équipe des Risques Naturels et Industriels pour leur accueil, avec une petite dédicace pour la bonne humeur et la disponibilité de mon voisin de box, Vincent Thierion et de Rosario Spinelli.

Au cours de quelques visites de terrain, Claude Martin et Jean-François Didon-Lescot de l'UMR ESPACE de Nice ont partagé leur savoir sur la zone d'étude et répondu à mes questions. Qu'ils en soient remerciés.

Un grand merci aux secrétaires du Master, Josée Ramos et Nadine Peres, qui au cours de ces deux ans, par leur sourire, leur écoute, leur efficacité, ont permis d'humaniser cette formation universitaire et de ne plus être un simple numéro. Si toutes les secrétaires pouvaient leur ressembler, ...

J'envoie, pour terminer, mes dernières pensées de gratitude aux deux responsables de formation, Séverin Pistre et Eric Servat, de m'avoir fait confiance et permis de suivre ce cursus.





Sommaire

1	Introduction	3
2	Les chemins de l'eau	5
2.1	Le fonctionnement hydrologique du bassin versant	5
2.2	L'état de l'art des méthodes d'identification du réseau hydrographique	9
2.3	Les méthodes utilisées par l'IGN	13
2.4	La problématique.....	14
3	L'application sur le bassin versant du Valescure	15
3.1	La description de la zone d'étude	15
3.2	Les données	20
3.3	La méthodologie	21
4	La phase expérimentale	26
4.1	Les résultats avec les images QB.....	26
4.2	Les résultats avec les réseaux MNT	34
4.3	La confrontation aux données terrain	39
5	La synthèse et les perspectives	47
5.1	La synthèse de l'étude.....	47
5.2	Les perspectives de cette étude	48
5.3	La méthodologie proposée permettant le suivi des ravines	49
6	Conclusion.....	51
	Bibliographie.....	52
	Liste des annexes.....	56



Liste des figures	57
Liste des tableaux.....	59
Table des matières	60
Annexes.....	64



1 Introduction

*Le commencement de toutes les sciences,
C'est l'étonnement de ce que les choses sont ce qu'elles sont.*

Aristote

Que devient l'eau des pluies ? [Penman, 1963] D'où provient l'eau des ruisseaux ? [Hewlett, 1961] Voici deux questions pionnières qui à ce jour peuvent résumer les orientations des recherches menées sur le comportement hydrologique des bassins versants. Depuis, d'autres se sont rajoutées, liées aux usages de l'eau et aux aléas hydrologiques, mais elles découlent toujours de ces deux questions pionnières.

En raison de la spécificité géographique et climatique du bassin méditerranéen, le sud-est de la France est régulièrement soumis, en automne, à des précipitations intenses dépassant fréquemment des cumuls journaliers de 200 mm. Ces pluies donnent lieu à des crues violentes et rapides, qualifiées de crues éclair, ayant de très fort impact socio-économique [Delrieu, 2006]. L'amélioration des techniques de prévention et de prévision des crues en général, et des crues éclair méditerranéennes en particulier, doit pouvoir s'appuyer sur une meilleure compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants lors des épisodes de pluies intenses : quelle est la dynamique de réponse des bassins versants aux pluies, quelle est l'influence éventuelle de la géologie, de la pédologie, de l'occupation des sols ou encore de l'aménagement des cours d'eau ? [Gaume *et al.*, 2003]. Au-delà de la représentation spatiale des objets qui implique une meilleure maîtrise des changements d'échelle, une hydrologie nouvelle à base de raisonnements spatiaux doit être développée d'où une importance renouvelée des chemins de l'eau et de la détection des réseaux : Gascuel-Oudoux *et al.* [1999] remarquent que, dans l'espace continu, il existe des objets linéaires qui sont d'une grande importance dans la circulation des eaux, qui sont à la base des discontinuités de l'espace. "Beaucoup de choses sont du linéaire dans le milieu naturel, ce qui nécessite un axe fort pour le caractériser et le développer" [Puech, 2000].

Dans ce contexte, l'Institut Languedocien de recherche sur l'Eau et l'Environnement¹ conduit un projet sur la "Caractérisation multi-échelles des transferts hydriques sur un bassin méditerranéen" [ILEE, 2006]. Il regroupe un éventail pluridisciplinaire d'équipes de recherche : HydroSciences Montpellier, le BRGM, l'UMR TETIS et le LGEI de l'Ecole des Mines d'Alès (EMA).

L'équipe ESPACE UMR 6012, non incluse dans l'ILEE, est également associée à ce projet. Elle assure les expérimentations et le suivi des bassins versants du Valescure [ILEE, 2006]. Les travaux développés dans ce projet entrent également dans le cadre de l'ORE OHM-CV². Par ailleurs, des recherches ont été coordonnées avec les investigations menées parallèlement dans le cadre d'un projet européen INTERREG IIIB : TERRISC (Récupération des paysages de terrasses et prévention des risques naturels) [Martin *et al.*, 2005].

¹ IFR 123 ILEE

² Cet Observatoire de Recherche et Expérimental (ORE) du CNRS, l'Observatoire Hydro-météorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais (OHM-CV), vise à fédérer les compétences de chercheurs de disciplines diverses (météorologie, hydrologie...) pour améliorer les connaissances et les capacités de prévision du risque hydro-météorologique à dynamique rapide. <http://www.lthe.hmg.inpg.fr/OHM-CV/>



L'Association Internationale des Sciences Hydrologiques (AISH) a lancée la "décennie des bassins non-jaugés (2003-2012)" : PUB (Prediction in Ungauged Basin). La finalité affichée de PUB est la réduction des incertitudes dans la prédiction en hydrologie. Elle conduit notamment à une série de réflexions sur l'utilisation de moyens d'observation non conventionnels tels que la télédétection. La télédétection est un moyen de mesure précieux qui donne accès à un large panel d'informations. Le problème posé ici est l'extraction du réseau de drainage ceci à des échelles spatiales pouvant aller jusqu'au micro chevelu (les thalwegs, les fossés, les ruisseaux, ...) qui est le facteur contrôlant l'organisation du chemin de l'eau superficielle. Cette étude a donc été réalisée dans le cadre du programme d'accompagnement du CNES³ du projet ORFEO⁴ pour le développement des systèmes Pléiades⁵, satellites à THRS⁶. Le programme d'accompagnement d'ORFEO a été mis en place afin de préparer, accompagner et promouvoir l'utilisation et l'exploitation des images issues de ces capteurs. Son volet "Thématique" couvre une large gamme d'applications (civiles et défense), et vise à spécifier et valider des produits à valeur ajoutée et services qui pourront être réalisés avec les données ORFEO afin de mieux répondre aux besoins des utilisateurs. Il est composé de huit groupes thématiques, composés d'experts extérieurs au CNES, qui contribuent à une réflexion approfondie sur les produits et services à développer. C'est à ce titre que l'UMR TETIS et le LGEI de l'EMA, équipes co-encadrantes de l'étude⁷, sont mandatés respectivement sur les thématiques "Hydrologie" et "Risques et Aide Humanitaire".

Un réseau de drainage naturel est complexe et l'analyse de son influence sur le ruissellement implique sa description morphologique au travers de paramètres caractéristiques. Cette connaissance suppose implicitement la compréhension de la physique des écoulements. Il s'agit de comprendre et d'analyser l'impact de la structuration superficielle des écoulements afin d'obtenir une bonne estimation des vitesses de ruissellement surfacique donc de la fonction de transfert du bassin versant. Lors des phénomènes météorologiques générateurs de crues éclair sur les bassins versants cévenols, le réseau temporaire semble concentrer les eaux de ruissellement superficiel, ce qui permet d'envisager que certaines ravines contribuent activement à la dynamique des eaux sur le bassin versant. Compte tenu que ce réseau temporaire est mal ou pas cartographié, ce travail de recherche s'attache à améliorer la connaissance spatiale de ces chemins de l'eau par une description du fonctionnement hydrologique du bassin versant et par l'inventaire des méthodes existantes pour l'identification du réseau hydrographique. La méthodologie développée pour répondre à cette problématique est testée sur un sous-bassin versant du Gardon d'Anduze, sensible aux crues éclair méditerranéennes. Plusieurs types de données ont été analysés séparément avant de les fusionner pour évaluer leur apport quant au savoir sur les chemins de l'eau :

- les images satellites QuickBird à THRS du CNES[®],
- un Modèle Numérique de Terrain de l'IGN[®],
- les données recueillies sur le terrain.

Pour finir, les perspectives dégagées de cette étude sont présentées, avec quelques mentions plus détaillées sur le suivi de la mise en eau des ravines.

³ Centre National d'Etudes Spatiales <http://www.cnes.fr>

⁴ ORFEO : Système dual et bilatéral (France - Italie) d'observation de la Terre
http://smc.cnes.fr/PLEIADES/Fr/A_prog_accomp.htm

⁵ Pléiades est la composition optique du système ORFEO développé par le CNES en coopération avec l'Italie. Ce système d'observation optique conçu pour offrir une forte capacité d'acquisition avec un délai de revisite inférieur à 24 heures afin de satisfaire à la fois des besoins civils et militaires. Le système Pléiades est constitué d'une constellation de deux satellites optiques (domaine visible et proche infrarouge) sur une orbite héliosynchrone à 694 km.

⁶ Très Haute Résolution Spatiale

⁷ Un descriptif sommaire de ces deux équipes est mis en annexe A-1.



2 Les chemins de l'eau

Afin de pouvoir introduire la problématique de cette étude, quelques notions relatives aux chemins de l'eau vont être présentées, suivies d'un éventail des méthodes d'extraction du réseau hydrographique pour enfin terminer par celles utilisées par l'IGN.

2.1	Le fonctionnement hydrologique du bassin versant	5
2.2	L'état de l'art des méthodes d'identification du réseau hydrographique .	9
2.3	Les méthodes utilisées par l'IGN	13
2.4	La problématique.....	14

2.1 *Le fonctionnement hydrologique du bassin versant*

Un *bassin versant*⁸ correspond à l'ensemble du territoire qui alimente en eau un cours d'eau. Les limites du territoire d'un bassin versant sont appelées lignes de partage des eaux et sont constituées des sommets qui séparent les directions d'écoulement des eaux de ruissellement [Bédard et Fortin, 1999]. Les eaux souterraines, au même titre que les eaux de surface, font partie intégrante du bassin versant. L'amélioration des techniques de prévention et de prévision des *crues* en général, et des *crues éclair* méditerranéennes en particulier, doit pouvoir s'appuyer sur une meilleure compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants lors des épisodes de pluies intenses [Gaume et al., 2003]. Divers processus élémentaires, éventuellement combinés, peuvent en effet être à l'origine de ces crues. Chacun de ces processus induit une dynamique très différente en ce qui concerne les volumes produits et les temps de réponse, et il importe d'identifier ces processus et leur combinaison pour obtenir une prévision hydrologique de qualité [Petelet-Giraud et al., 2006].

2.1.1 Le réseau hydrographique

Tout d'abord, ce terme clef de l'étude va être précisé. Ensuite son évolution spatio-temporelle sera abordée, ainsi que la phase de son régime hydrologique concernée par l'étude : la genèse des crues.

2.1.1.1 Quelques définitions

Plusieurs définitions sont données dans la littérature. Ci-dessous un petit échantillon de ce que l'on peut trouver :

- [Roche, 1963] : "Ensemble des canaux de drainage naturels, permanents ou temporaires, par où s'écoulent les eaux provenant du ruissellement ou restituées par les nappes souterraines, soit sous forme de sources, soit par restitution continue le long du lit du cours d'eau."
- Trésor de la Langue Française (syn. Réseau de drainage) : "Ensemble des canaux de drainage naturels, permanents ou temporaires, par où s'écoulent les eaux provenant du ruissellement ou restituées par les nappes souterraines."

⁸ Tous les mots en gras et italique sont des termes clefs de l'étude, employés pour la première fois et définis dans l'annexe A-2.



- Glossaire International d'Hydrologie (1992) : "Ensemble des rivières et autres cours d'eau permanents ou temporaires, ainsi que des lacs et des réservoirs, dans une région donnée."
- Le Robert Pas de définition de " réseau hydrographique " mais seulement hydrographie : " ensemble des cours d'eau et des lacs d'une région, d'un bassin fluvial."
- Le Petit Larousse illustré (1994) : "Ensemble de fleuves et de leurs affluents drainant une région."
- Dictionnaire de l'Environnement (1990) : "Ensemble des cours d'eau (fleuves, rivières, ruisseaux...) permanents ou temporaires qui drainent une région plus ou moins vaste."
- M. Dacharry du CNFSH⁹ (1999) : "Ensemble hiérarchisé et structuré des chenaux qui assurent le drainage superficiel, permanent ou temporaire, d'un bassin versant ou d'une région donnée."

La définition retenue pour l'étude est la dernière.

2.1.1.2 La dynamique du réseau hydrographique

L'extension du réseau hydrographique peut varier grandement en fonction de l'état hydrologique du bassin versant, ce qui conduit à distinguer le réseau pérenne du temporaire, plus ou moins fréquemment en eau [Ambroise, 1998]. En dehors des périodes de crue, l'écoulement de base d'un cours d'eau est alimenté par le seul drainage lent des nappes et des sols. En l'absence de toute influence atmosphérique, il suit en tout point une courbe de tarissement caractéristique de son bassin versant [Coutagne, 1948; Hall, 1968]. Cet assèchement du cours d'eau peut s'expliquer par la demande évaporative¹⁰ et/ou l'infiltration sur les versants. Dans les *thalwegs* (lieu concave de convergence du ruissellement [Riazanoff, 1989]), ce sont les échanges nappe-rivière qui sont prédominants. Le sens des échanges nappe-rivière dépend des niveaux relatifs de la nappe et de la rivière. Si le niveau piézométrique est supérieur au niveau du cours d'eau, le débit augmente par drainage de la nappe, qui peut alors présenter un rabattement local. Dans le cas contraire, le débit diminue par infiltration et recharge de la nappe, qui peut alors présenter une intumescence locale. L'intensité de ces échanges est contrôlée par la perméabilité du lit du cours d'eau, plus ou moins colmaté par des sédiments fins [Ambroise, 1998].

2.1.1.3 La genèse des crues

La notion de crue fait référence à une des phases du régime hydrologique d'un cours d'eau, les hautes eaux. Cette notion retranscrit également la réponse d'un bassin versant à une averse ou à un épisode pluvieux [Roche, 1986]. De manière classique, un cours d'eau est considéré en crue si son débit est de 3 à 5 fois supérieur à son débit moyen [Salomon, 1997]. L'élévation du niveau de l'eau peut s'accompagner d'un processus temporaire de stockage dans les berges perméables, dont la vidange contribue à soutenir les débits lors de la récession ultérieure [Ambroise, 1998]. Dans le cas de crues "cévenoles", le rôle de la végétation paraît peu important. Lors de ces événements extrêmes, les précipitations peuvent atteindre un cumul de 400 mm en 24h, le fonctionnement hydrologique des bassins versants est davantage contrôlé par les facteurs climatiques et géomorphologiques que par la végétation [Cosandey, 1993]. Dans ces conditions pluviométriques, les écoulements peuvent emprunter toutes les possibilités offertes à la concentration des eaux : ruisseaux, *ravines*, mais aussi routes, pistes, passages d'animaux... et atteindre une très forte énergie [Didon-Lescot et Martin, 2007].

2.1.2 Les processus hydrologiques

Divers processus hydrologiques peuvent être mis en jeu lors de ces événements extrêmes. En réponse aux précipitations, l'eau a la possibilité de cheminer en zone souterraine et/ou superficielle comme l'illustre la figure 1. Un développement sommaire de ces processus est fait afin de comprendre toute la complexité de l'étude des *chemins de l'eau*.

⁹ Comité National Français des Sciences Hydrologiques

¹⁰ S'intéressant à la dynamique du réseau hydrographique lors des épisodes pluvieux en région méditerranéenne, la demande évaporative est négligeable.

2.1.2.1 Les précipitations

Sont dénommées précipitations, toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre,...). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression. Les précipitations constituent l'unique « entrée » des principaux systèmes hydrologiques continentaux que sont les bassins versants [Musy, 2005].

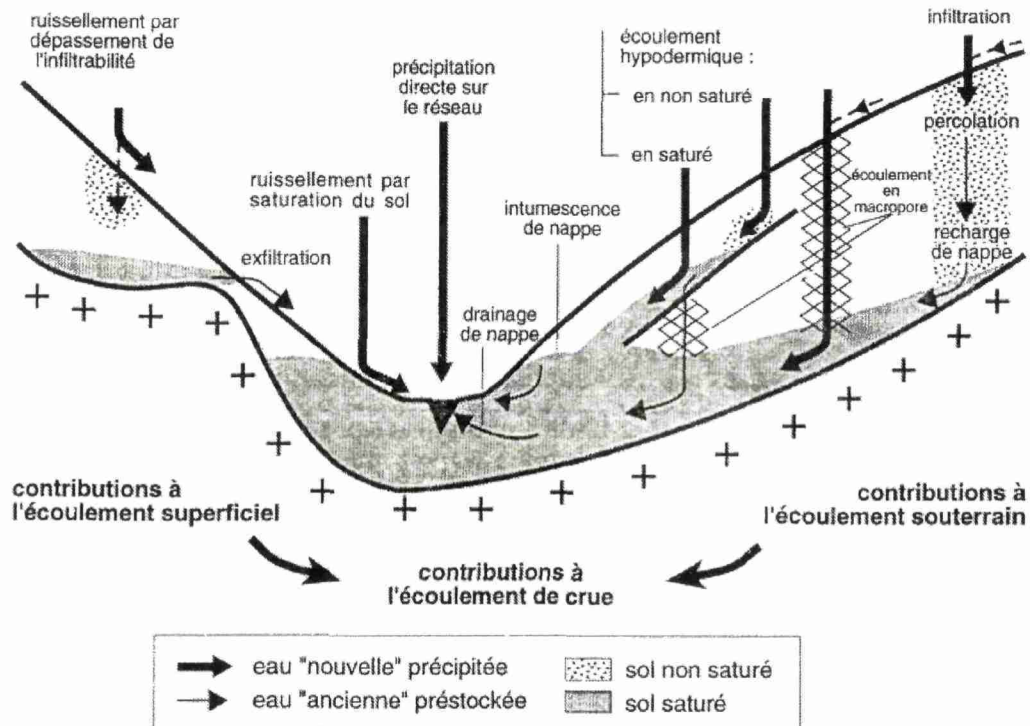


Figure 1 : Principaux processus d'écoulement superficiels et souterrains, et ancienneté relative de l'eau concernée [Ambroise, 1998]

2.1.2.2 Les écoulements dans les versants

Quelle que soit son origine, l'eau disponible à la surface du sol est à la pression atmosphérique, voire même sous pression dans le cas d'une lame d'eau superficielle. Elle tend toujours à pénétrer dans le sol par infiltration, sous l'effet de la gravité et, si le sol n'est pas saturé, du gradient de potentiel matriciel [Philip, 1969].

Une fois dans le sol, l'eau peut être soumise à de phénomènes superficiels de percolation liés à des gradients de potentiels hydriques latéraux : c'est le ruissellement (ou écoulement) hypodermique, communément appelé aussi écoulement de sub-surface [Ayrat, 2005].

Sinon, par la percolation et/ou le ruissellement par écoulement dans les macropores, l'eau continue son évolution dans le sol jusqu'à rencontrer un niveau peu perméable. L'accumulation d'eau au dessus de ce niveau peut conduire à la formation d'une nappe plus ou moins permanente, par saturation du milieu poreux qui le recouvre [Marsily, 1986].

Cette nappe peut être rechargée par l'extension des zones contributives à la surface du bassin versant. Lorsque le profil est saturé jusqu'à la capacité au champ, la moindre averse réalimente la nappe, laquelle va latéralement saturer une surface plus grande de la vallée. Par conséquent, même s'il n'y a pas de ruissellement sur le versant en période humide, l'ensemble du bassin versant va contribuer au volume écoulé par la rivière par extension de la surface saturée, la nappe étant alimentée directement par le drainage de l'ensemble du bassin versant [Roose, 1970].



2.1.2.3 Les écoulements sur les versants

Deux hypothèses s'opposent sur le concept d'apparition du ruissellement superficiel : la saturation de la surface "par le haut" et celle "par le bas".

Dès que, l'intensité des apports d'eau en surface dépasse l'infiltrabilité locale du sol, il y a saturation de la surface "par le haut". Après avoir rempli par rétention en surface les dépressions superficielles, l'eau en excès est évacuée par ruissellement en surface [Horton, 1933]. Ce type de ruissellement peut aussi être interprété comme la résultante de la saturation de l'horizon superficiel du sol par les précipitations [Ayrat, 2005].

L'intumescence d'une nappe souterraine (saturation "par le bas") peut aussi contribuer à la genèse des crues. Les pluies tombant sur ces surfaces saturées ne peuvent que ruisseler ou libérer plus en aval, par "effet piston", un flux équivalent d'eau de nappe : ce ruissellement par saturation du sol [Cappus, 1960] se produit alors quelle que soit l'infiltrabilité de la surface.

Même en l'absence de précipitations, ces ruissellements peuvent être durablement alimentés par l'exfiltration d'eau souterraine [Dunne et Black, 1970]. Deux phénomènes peuvent être à l'origine de ce processus :

- Les écoulements latéraux dans les versants dépassent le flux maximal qui peut y transiter, il y a saturation du profil, et le flux en excès s'écoule en surface ;
- Les écoulements dans les nappes rejoignent le réseau hydrographique de surface là où la topographie recoupe la surface piézométrique.

C'est le cas des sources sur les versants, et plus généralement des zones d'affleurement des nappes [Ambroise, 1998].

L'importante redistribution spatiale de l'eau disponible en surface résulte de cette hiérarchisation progressive du ruissellement le long d'un versant [Ambroise, 1998]. Les processus explicatifs de la genèse du ruissellement sont nombreux, il est donc judicieux d'interpréter la concentration des eaux à l'exutoire comme une combinaison de ces différents types de ruissellement sur des zones spécifiques d'un bassin versant et non d'un même processus [Ayrat, 2005].

2.1.3 Le développement des ravines

L'eau libre disponible pour le ruissellement s'écoule en surface vers l'aval, sous l'effet des gradients de potentiel gravitaire. Sa vitesse tend à augmenter avec la pente du versant, mais est freinée par la rugosité de la surface [Moore et Foster, 1990]. Le ruissellement commence par être diffus, lorsque les filets d'eau contournent les parties hautes (touffes, mottes, cailloux) de la microtopographie et s'évacuent par ses parties basses, ou que la pente est faible. Plus il descend vers l'aval, plus il cherche à se concentrer dans des *drains*, des ravines avant de rejoindre les thalwegs appartenant au réseau hydrographique. Celui-ci va évoluer par un frottement du fond par les sédiments transportés par le fluide et par effondrement des berges et transport du matériau ainsi désorganisé [Roose, 1970]. Ainsi, sur son chemin, l'eau contribue à la dynamique du réseau hydrographique (creusement – comblement). Les facteurs susceptibles d'influencer l'écoulement gravitaire concentré sont :

- Les caractéristiques géométriques (topographie, morphologie),
- L'état d'humectation du sol,
- Les propriétés hydrologiques du milieu : la rugosité et le degré d'imperméabilisation du sol¹¹.

Dans la nature, trois formes particulières de ravines sont répertoriées :

- Les ravines en forme de V,
- Les ravines en forme de U,
- Les ravines en forme de tunnel.

¹¹ Une épaisse couche de feuilles imperméabilisant la couverture superficielle réduit l'infiltration et peut activer le ruissellement [BCEOM, 2000].



2.1.3.1 Les ravines en forme de V

Elles se développent préférentiellement dans un matériau homogène, plus ou moins meuble comme les schistes. Les versants de ces ravines évoluent par altération de la roche : en saison froide par alternance de gelées et de soleil, en saison chaude, par alternance de périodes sèches et d'averses. On observe en milieu méditerranéen une altération des schistes qui peut atteindre 4 à 10 mm par an. L'enfoncement a lieu lors des averses exceptionnelles. Une à deux averses par an suffisent pour dégager toutes les particules accumulées durant l'année au fond de la ravine et pour entailler le fond de la ravine par abrasion des matériaux que le ruissellement charrie [Roose, 1970].

2.1.3.2 Les ravines en forme de U

Ce type de ravines s'observe fréquemment sur des matériaux hétérogènes. Soit elles ont un fond constitué de matériaux très résistants : lors des crues exceptionnelles le canal va donc s'élargir latéralement par effondrement. Soit, la couche de résistance se trouve en surface, le ruissellement creuse alors profondément le matériau jusqu'à atteindre une nappe d'eau temporaire ou permanente qui va exercer une poussée latérale sur le bas du versant jusqu'à ce que celui-ci s'effondre (sapement de berges) [Roose, 1970].

2.1.3.3 Les ravines en forme de tunnel

Les fissures du sol dans lesquelles s'engouffre le ruissellement hypodermique vont se transformer progressivement en tunnels, lesquels s'effondrent et forment des ravines régressives qui peuvent progresser de quelques dizaines de mètres au cours des grosses averses [Roose, 1970]. Cette troisième forme n'étant pas visible en surface, elle sera négligée dans l'étude.

2.2 L'état de l'art des méthodes d'identification du réseau hydrographique

Maintenant que la notion de chemins de l'eau est définie, il importe de connaître les méthodes qui existent pour les obtenir. Deux catégories se distinguent, celles utilisant un MNT et celles basées sur des images satellites.

2.2.1 A partir d'un MNT

Les MNT *raster* sont les premiers qui ont été utilisés pour résoudre des problèmes hydrologiques. Avec les progrès technologiques, le TIN au format *vecteur* émerge, ainsi que le lidar, nouvelle méthode pour constituer les MNT.

2.2.1.1 Les techniques classiques avec le format RASTER

Un MNT raster correspond à une grille régulière où, pour tous ses nœuds, une mesure d'altitude est indiquée, selon un pas planimétrique en XY. À partir d'un MNT raster, il est possible de s'appuyer sur des algorithmes bien connus afin de calculer et ou de représenter le réseau hydrographique dans un bassin versant. Ce sont ces algorithmes qui vont être utilisés pour extraire automatiquement les ravines [Charleux-Demargne et Puech, 2000]. Celui utilisé est l'algorithme D8 de [Jenson et Domingue, 1988], d'après l'approche de [O'Callaghan et Mark, 1984]. Il considère un schéma unidirectionnel en 8-connexité, en prenant en compte les huit cellules voisines du point considéré avec des distances différentes suivant les directions cardinales et diagonales [Charleux-Demargne, 2001].

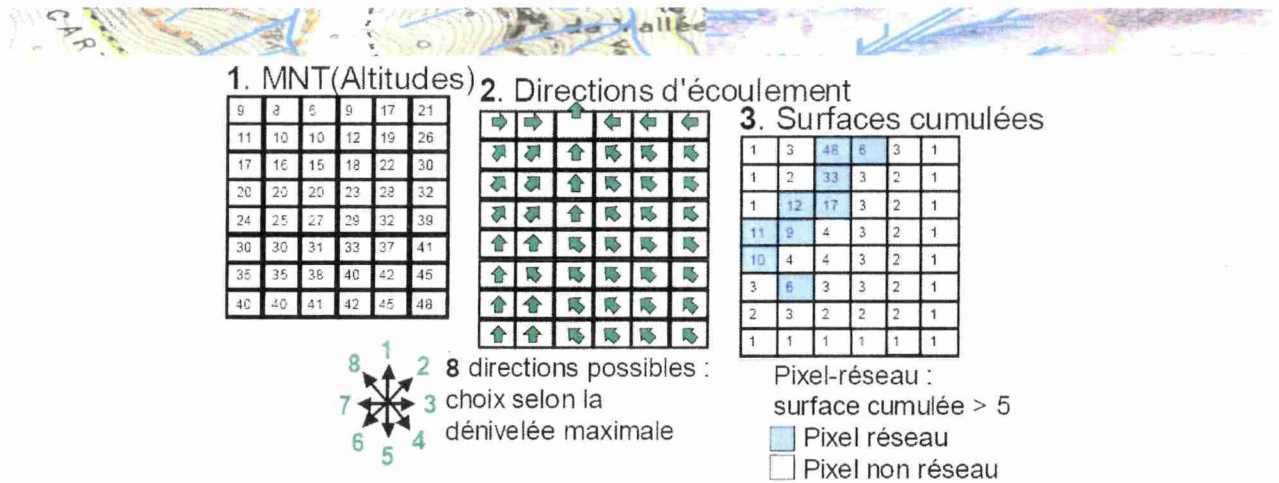


Figure 2 : La méthode de calcul des surfaces drainées (algorithme D8) [Al Ayoubi, 2006]

Comme expliqué dans la figure 2, en se basant sur une maille des altitudes, l'algorithme procède par trois étapes successives :

- 1) Calcul de la direction des flux en comparant la valeur portée par chaque pixel à celles de ses huit pixels voisins. On retient la direction de plus grande pente, en l'occurrence ici celle vers le pixel le plus bas ;
- 2) Calcul des surfaces cumulées par cumul des pixels selon la direction des flux (cumul des surfaces élémentaires drainées amont). Sachant qu'on connaît les dimensions des pixels de la grille, on peut avoir la surface cumulée ;
- 3) Seuillage selon la valeur de surface drainée : pixels "versant" et pixels "réseau"

Cette méthode permet un calcul complet, facile à réaliser et généralisable sur les grands bassins versants. Le réseau hydrographique obtenu est continu et bien hiérarchisé dans les thalwegs. A l'échelle des ravines élémentaires sur les versants, il présente quelques défaillances liées aux effets de grille. Cet algorithme procure des directions arrondies à un multiple de 45°. Dans les zones à variabilité faible de la direction de pente, on obtient des parallélismes de directions et donc des erreurs fortes sur la réelle position des drains, ainsi que sur les surfaces drainées. Enfin, la détermination des chemins d'écoulements par simulation surfacique des écoulements conduit à des difficultés d'extraction pour deux types de zones du MNT : les dépressions et les zones plates. Pour s'affranchir de ces limites, d'autres méthodes ont été développées en gardant le format raster [Charleux-Demargne, 2001]. Le gros problème de ces algorithmes est le choix des seuils de surface drainée pour des ravines élémentaires. De nouvelles perspectives sont envisageables en changeant de format.

2.2.1.2 Le potentiel des réseaux TIN

Le format vectoriel permet aussi de présenter le réseau hydrographique et de calculer les surfaces drainées. Pour cela, l'hypothèse est faite que l'eau circule de triangle en triangle, en suivant la ligne de plus grande pente selon le schéma en Triangular Irregular Network (TIN). Deux types d'écoulement sont différenciables : le long des arêtes drainantes ou bien celui de centre à centre de triangle (figure 3).

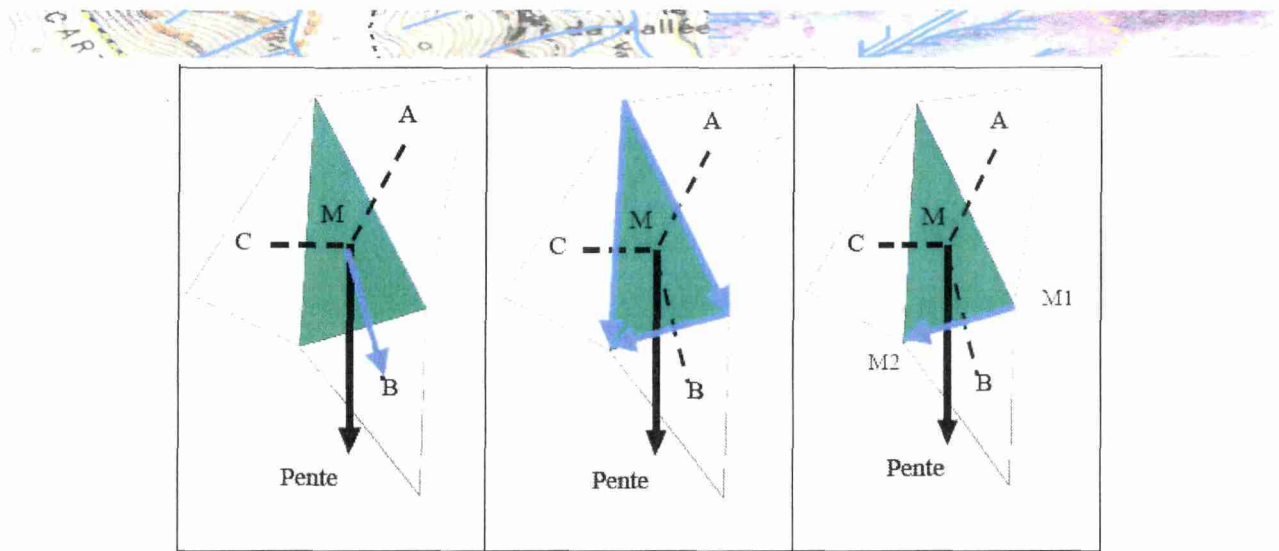


Figure 3 : Types d'écoulement pour les réseaux TIN : méthode de propagation a) de centroïde en centroïde, b) suivant les arêtes, c) en déterminant l'arête drainante [Al Ayoubi, 2006]

Selon une étude menée sur un petit bassin versant du Gardon d'Anduze [Al Ayoubi, 2006], il en ressort qu'une approche double de type centre à centre de triangle (pour les versants) et arêtes drainantes (pour les thalwegs) donne de bons résultats. Le calcul vectoriel semble plus prometteur que le raster pour des études du réseau hydrographique sur de petites zones montagneuses. Des ramifications beaucoup plus proches de la réalité sont établies. Cependant, il perd son avantage pour des surfaces drainées plus grandes car il nécessite des algorithmes plus longs et complexes qui ne se justifient pas pour les zones où le raster donne des résultats corrects. Fort de ces constats, on peut aussi espérer que la combinaison des résultats du réseau TIN et du réseau raster permettrait d'utiliser le point fort de chacune des deux approches.

2.2.1.3 Les perspectives liées à la technologie LIDAR

La technique de la télémétrie laser (ou lidar) adaptée au contexte aérien via un balayage latéral fournit une mesure directe de distance entre un vecteur aérien (avion ou hélicoptère) et la surface terrestre. Une des caractéristiques principales des systèmes lidar aéroporté est de fournir des données 3D précises et robustes. La précision peut atteindre 5 cm en altimétrie et est inférieure à 40 cm en planimétrie [Bretar, 2006]. Les limites de précision correspondent aux ravines mineures observées sur le terrain. Cette technologie permet l'acquisition d'un grand nombre de points par m² (entre 1 et 25 points). Ce niveau de précision est très important car il permet d'éliminer l'hypothèse d'erreurs possibles, dues à des relevés topographiques biaisés et donc facilite l'obtention d'un MNT de qualité [Capra *et al.*, 2006]. Grâce à cette technologie, le MNS¹², le MNT et la hauteur des objets sont accessibles (figure 4). Dès lors que des trouées, même de faible dimension, apparaissent à travers la couche supérieure (ex : feuillages), l'écho laser récupère des points issus tantôt du terrain naturel, tantôt du sursol [Puech, 2000].

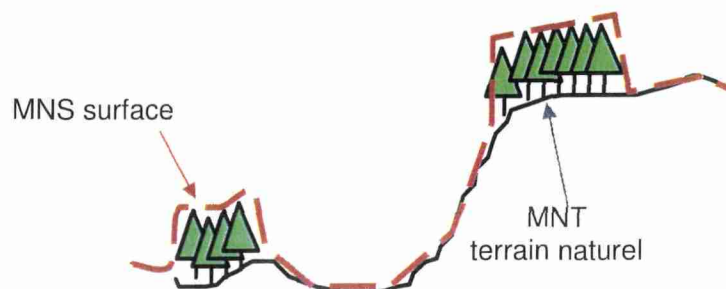


Figure 4 : Différenciation MNT – MNS, due à la présence de "sursol" [Puech, 2000]

¹² Modèle Numérique de Surface



Grâce au lidar, la modélisation hydrodynamique sera sûrement plus aisée et donc favorisera un meilleur diagnostic des chemins potentiels de l'eau (mesures topographiques) et des cours d'eau (mesures bathymétriques). Cependant, quelques questions subsistent quant à la possibilité de détecter les ravines sous une couverture forestière dense et quant à leur réalité physique.

2.2.2 A partir d'images satellites

L'extraction des structures linéaires des images de *télé-détection* est depuis quelques décennies¹³ le sujet de recherches. Les différentes méthodes peuvent se regrouper suivant les trois approches suivantes : la photo-interprétation, les méthodes semi-automatiques et automatiques. La confrontation de ces approches met en évidence celles qui sont privilégiées actuellement.

2.2.2.1 La photo-interprétation

Historiquement, les éléments curvilignes étaient extraits manuellement grâce à l'interprétation d'experts en utilisant des systèmes stéréoscopiques de vision [Yee, 1987]. Présentement les techniques s'appuient encore très largement sur l'opérateur (spécialistes de traitement d'image ou experts en interprétation) pour répondre aux exigences de mise à jour des systèmes d'information géographique [Quackenbush, 2004]. Les images sont directement interprétées sur l'écran à partir des logiciels de PIAO¹⁴ (ErdasIMAGINE & ArcGIS) [Cotteret, 2005]. Cela consiste à tracer en fonction des *ruptures radiométriques* des images des linéaires sensés représenter le réseau hydrographique. Ces linéaires sont stockés sous la forme d'une couche vectorielle, facilement utilisable avec les logiciels *SIG*. La *photo-interprétation* est intéressante pour des zones restreintes, à l'échelle locale ou de petits bassins versants (de l'ordre de quelques km²), car elle permet rapidement (une vingtaine de minutes dans le cadre de l'étude) d'avoir une idée de la structure du réseau hydrographique. Elle ne requiert pas de compétences particulières, même si la précision du document cartographique final dépend de l'expérience du photo-interprète. Les limites de la méthode sont multiples. Il faut faire la topologie du réseau, c'est-à-dire, déterminer le sens d'écoulement dans les *branches*, leurs connections. Enfin, l'extraordinaire quantité de données collectées (capteurs plus nombreux, plus efficaces, à plus haute résolution avec des taux de transfert des données toujours plus grands), rend le traitement manuel de ces dernières quasi impossible en terme de temps de traitement, mais également en termes pécuniaires. Or le maintien des bases de données à jour est essentiel pour de nombreux secteurs [Gibson, 2003]. L'accroissement considérable de la quantité de données à traiter pour des besoins cartographiques oblige à imaginer des techniques d'extraction automatique des éléments de l'image de télé-détection [Yee, 1987].

2.2.2.2 Les méthodes semi-automatiques

Une grande partie des travaux sur l'extraction des réseaux se situent dans une problématique d'aide à la saisie des interprètes d'image. Les méthodes proposées dans ce cadre sont semi-automatiques : un opérateur doit fournir des points de contrôle pour initialiser un algorithme de suivi, une recherche de chemin optimal par programmation dynamique, un contour actif, ou encore un algorithme fondé sur une analyse de profils transversaux. Ces méthodes permettent en général d'effectuer une extraction rapide et d'une grande précision. Il faut néanmoins se poser la question de savoir si le gain de productivité apporté par les techniques semi-automatiques est significatif par rapport au travail d'extraction mené par un expert [Lacoste, 2004].

2.2.2.3 Les méthodes automatiques

L'objectif final des méthodes d'extraction complètement automatique est de remplacer le travail d'extraction mené par un interprète d'image. Les méthodes automatiques sont le plus souvent fondées sur une première détection reposant sur une optimisation locale. Ces premières méthodes ne

¹³ Lancement du premier satellite de télé-détection –américain– LANDSAT-1 le 22 juillet 1972

¹⁴ Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur



fournissent en général qu'une extraction très grossière du réseau et donc sont suivies d'une étape de reconstruction du réseau manuelle ou semi-automatique. L'extraction du réseau peut être aussi guidée par des données cartographiques. Avec l'apparition des images haute résolution, le problème d'extraction s'est complexifié car les réseaux deviennent surfaciques. Dans ce contexte, des approches multi-résolutions sont proposées pour réduire l'effet du bruit tout en fournissant une extraction précise. Récemment, des systèmes d'interprétation très complets, intégrant des informations sémantiques, permettent une extraction de réseau dans des scènes complexes. Enfin il est à signaler que les processus objet fournissent un formalisme rigoureux pour une extraction du réseau sans étape d'initialisation [Lacoste, 2004].

2.2.2.4 Discussion : extraction manuelle vs extraction automatique

Le traitement informatique et le traitement par des humains des données de télédétection ont chacun des avantages et des faiblesses. Un interprète humain peut facilement appréhender des images entières et reconnaître les objets ; de son côté l'informatique est performante dans l'optimisation, la délimitation de détails et la répétitivité des tâches [MvKeown Jr *et al.*, 1996]. L'extraction manuelle utilise les capacités cognitives et l'expérience de la personne qui manipule les images mais est très coûteuse en terme de temps de traitement [Baumgartner *et al.*, 1999]. Il convient donc de souligner que l'atteinte d'un objectif de mise au point de techniques d'extraction semi automatique est plus réaliste qu'un objectif d'automatisation complète, mais que chercher dans cette dernière direction est très pertinent pour l'amélioration des techniques actuelles. Le but est toujours de minimiser le plus possible l'intervention manuelle pour accélérer le temps de traitement de l'image d'une part et pour réduire le temps en ressources humaines d'autre part [Cotteret, 2005].

2.3 Les méthodes utilisées par l'IGN

Actuellement, toutes les données de l'IGN sont stockées en format numérique dans des bases de données géographiques. Les ajouts, suppressions, et modifications coûtent seulement quelques clics de souris. Dans la plupart des cas, des jeux de données différents sont maintenus pour chaque échelle de représentation, car on ne peut pas produire une carte à, disons, une échelle de 1:50000^{ème} tout simplement en prenant une carte plus détaillée au 1:25000^{ème} et la réduisant géométriquement : il y a des problèmes concernant le niveau de détail acceptable à chaque échelle, et la manière dont l'information doit être simplifiée. Dans d'autres cas, sont stockées seulement les données pour l'échelle la plus précise, et des algorithmes de simplification ou généralisation automatiques convertissent ces données dans des échelles moins fines. Cependant, ces données sont encore ajoutées dans la base de données, et mises à jour, de façon manuelle. Des photo-interprètes, qui sont des personnes expertes à comprendre le terrain à partir d'images prises d'un avion ou d'un satellite, examinent des images de la zone d'intérêt et, à l'aide de rapports des topographes sur le terrain, mettent à jour la base de données. Ce procédé est très cher et lent. Ainsi, les cartes topographiques au 1:25000^{ème} de l'IGN ont, en moyenne, dix ans.

Il y a beaucoup de projets de recherche à l'IGN et ailleurs qui visent à automatiser totalement ou partiellement l'interprétation des images de télédétection pour, dans un premier temps, remplir les bases de données géographiques, et, plus tard, les maintenir à jour au fur et à mesure que des nouvelles prises de vues de chaque zone deviennent disponibles. Cette recherche a un but clairement applicatif : l'accélération de la production de cartes. Au final, l'IGN préfère avoir une classification automatique sur seulement une partie du territoire, mais de très haute qualité et qui n'aura pas à être révisée, que d'avoir une classification automatique sur tout le territoire, mais d'une qualité moindre. Dans le premier cas, les photo-interprètes peuvent concentrer leur temps dans les zones que le système a préféré laisser sans classification (parce qu'il les a jugées trop difficiles). Dans le deuxième cas, ils auraient à vérifier, et corriger, tout le territoire, à grand coût.

Les méthodes de classification développées sont du type supervisé. C'est-à-dire que le système doit passer par une phase d'apprentissage dans laquelle est fournie une vérité terrain, une référence qui contient des images avec des régions de type de terrain connu, ce qui lui permet de reconnaître les caractéristiques discriminantes pour chaque type de terrain, pour que, dans la phase de classification, le



système puisse indiquer le type de terrain d'une nouvelle zone, différente des zones de la référence, mais suffisamment similaire [Trias-Sanz, 2006].

2.4 La problématique

L'amélioration de la connaissance des transferts de l'eau dans un bassin versant est nécessaire pour la prévention et la prévision des crues. La réponse à des épisodes pluvieux intenses est rapide sur les bassins versants méditerranéens. Une des explications avancées est que le réseau temporaire concentre les eaux de ruissellement superficiel. Le problème est qu'il est insuffisamment cartographié. Cette étude a donc pour but d'essayer d'affiner la représentation du réseau hydrographique à partir des diverses sources de données mises à disposition : deux images satellites à Très Haute Résolution Spatiale (THRS) du CNES[®] et un MNT de l'IGN[®] avec un pas de 25 m. A partir de là, diverses méthodes vont être mises en œuvre afin d'avoir quelques éléments de réponse, via les logiciels SIG.

Pour pouvoir comparer, commenter les différents résultats de cette étude, un réseau hydrographique a été choisi comme référence. Le choix s'est porté sur celui qui décrit le plus précisément le réseau de drainage du bassin versant.

La première partie de cette étude est consacrée à l'extraction du réseau hydrographique à partir des images satellites. Chaque image apporte une vision différente de la zone d'étude. Par une analyse quantitative basée sur des longueurs et le nombre de branches du réseau hydrologique, plusieurs critères vont être testés afin d'évaluer les conditions favorables à l'extraction de réseau hydrographique, la robustesse de la méthode et in fine leur gain en relation avec la thématique de l'étude. Par ailleurs, une approche qualitative des réseaux vient compléter les résultats précédents. Cette comparaison visuelle a pour but de distinguer et de localiser les différences entre les réseaux générés et celui pris comme référence.

La seconde partie de l'étude porte sur les réseaux hydrographiques générés à l'aide d'un MNT. De nombreuses recherches ont déjà été menées jusqu'à présent sur l'utilisation des MNT au format raster. Même si tous les avantages et les inconvénients sont connus par la communauté scientifique, cette étape est essentielle pour la suite de l'étude, car c'est à partir de ces limites que va être dégagée certaines perspectives comme l'utilisation des MNT au format vectoriel ou des MNT issus d'une technologie émergente : le lidar. L'analyse quantitative et qualitative est similaire à celle réalisée dans la première partie.

A ce niveau de l'étude, les deux méthodes se rejoignent dans le sens où les réseaux hydrographiques sont hypothétiques. Chacun comporte potentiellement des erreurs par rapport au *réseau hydrographique réel* (branches manquantes, mauvais emplacement des branches). Afin de les évaluer en partie, des campagnes de repérage de drains sur le bassin versant pilote ont été mises en place à l'aide d'un GPS. D'une part, ces relevés ponctuels permettent localement d'ajuster le positionnement des branches du réseau hydrographique et d'autre part, dans la zone visitée, de supprimer les branches aberrantes. En parallèle, une caractérisation du drain observé et de son environnement a été réalisée selon un *protocole expérimental*. Ce dernier assure une analyse rigoureuse des drains et offre la possibilité de confronter des données de campagnes différentes afin d'examiner l'évolution spatiale des drains et de classer les drains suivant leur importance.

Enfin, une combinaison de toutes les données est proposée pour tenter de retirer les atouts de chaque type de données. Le réseau hydrographique produit est censé résumer tout le savoir résultant de ce travail de recherche, avec ses certitudes et ses déductions. Pour finir, quelques idées sont exposées pour le suivi de la partie temporaire de ce réseau.



3 L'application sur le bassin versant du Valescure

La mise en situation de la problématique s'est effectuée sur une zone soumise aux crues éclair en région méditerranéenne. Elle va être présentée, ainsi que les données à disposition pour l'étude. La méthodologie mise en œuvre sera par ailleurs exposée.

3.1	La description de la zone d'étude	15
3.2	Les données	20
3.3	La méthodologie	21

3.1 La description de la zone d'étude

Le bassin versant du Valescure est un sous-bassin versant du Gardon d'Anduze. Dans un premier temps, les particularités de ce dernier vont être abordées, puis une présentation sommaire de la zone d'étude sera produite, suivie de celle du réseau hydrographique, objet de cette étude.

3.1.1 Le bassin versant du Gardon d'Anduze

3.1.1.1 Le Gardon

Dans la littérature, trois termes désignent le dernier affluent rive droite du Rhône : le Gard, le Gardon et les Gardons. Ce réseau hydrographique, essentiellement situé sur le département du Gard draine un bassin versant de 2100 km². L'ensemble du bassin est générateur de crues très rapides et situées dans des gammes de débits très élevées. Il est composé de deux sous bassins amont majeurs : le Gardon d'Anduze (630 km²) et le Gardon d'Alès (450 km²) (cf figure), eux-mêmes composés de plusieurs sous bassins de taille significative formant le réseau des gardons cévenols [Préfecture du Gard, 2006].



Figure 5 : Schéma du bassin versant des Gardons [Gard, 2006]

3.1.1.2 Le régime pluviométrique et hydrologique

Le bassin d'Anduze, typique de la zone cévenole, est sujet à des crues dont les temps de montée sont très rapides [ILEE, 2006]. Couplé à de nombreuses zones de lieux habités, ce bassin a une sensibilité certaine aux inondations. Ci-dessous quelques crues historiques des Gardons [Préfecture du Gard, 2006] :

- 21 septembre 1890 : on retrouve sur les bassins gardois une trace historique d'une crue majeure comme pour les bassins ardéchois, mais la faiblesse des informations chiffrées ne permet pas d'en reconstituer précisément les débits.
- 16 octobre 1907 : crue très importante sur les hauts bassins cévenols et sur l'aval (5300 m³/s à Remoulins).
- 30 septembre 1958 : très forte crue cévenole qui a largement marqué les deux sous bassins d'Anduze et d'Alès. Cet événement constitue la crue de référence pour ces deux bassins amont. Cote maxi relevée à l'échelle d'Anduze : 7,60 m. Pour le tronçon des gardons réunis, cette crue a été largement dépassée par celle de septembre 2002.
- 12 septembre 1976 : crue moyenne sur les bassins cévenols, devenant plus forte sur les Gardons réunis, avec 6,90 m (> 4000 m³/s) à Ners et 3000 m³/s à Remoulins (crue environ décennale).
- 9 septembre 2002 : crue majeure pour l'ensemble du bassin ; atteignant 7,50 m à Anduze (3200 m³/s), 9,15 m à Ners (7000 m³/s) et 8,75 m à Remoulins (6700 m³/s). Cet événement constitue la crue de référence pour le tronçon des Gardons réunis.

3.1.1.3 Le bassin du Gardon d'Anduze

Le bassin du Gardon d'Anduze est situé dans la partie Nord-Ouest du département du Gard. En amont d'Anduze, sa superficie totale est de 545 km² et il se subdivise en deux cours d'eau : le Gardon de Mialet et celui de Saint-Jean. Morphologiquement, son faciès est caractérisé par un profil de moyennes montagnes formé de vallées étroites où s'écoulent des rivières à réaction rapide [Préfecture du Gard, 2006]. Il semble, sans que l'on puisse conclure de manière certaine, que l'on observe sur ces bassins situés à l'épicentre de l'épisode pluvieux, comme dans le cas du bassin du Gardon d'Anduze, un plafonnement du coefficient d'écoulement en cours de crue, mais avec une reprise de son évolution en fin d'événement en raison des cumuls pluviométriques très importants reçus par ces bassins. Bien plus que son intensité, le cumul de pluie s'avère contrôler la valeur du coefficient moyen d'écoulement des bassins versants : tous les bassins réagissent progressivement et avec un certain retard aux pluies [Gaume *et al.*, 2003]. Fort de



ces constatations, des questions émergent : Comment les écoulements sont mis en vitesse au sein du bassin ? Quels sont les processus dominants qui gouvernent la formation des crues ? Quelles sont les caractéristiques du bassin qui expliquent ces processus ? A ces fins, depuis plus d'une vingtaine d'années, il est donc l'objet de différents travaux de modélisation [ILEE, 2006].

3.1.2 La zone d'étude

Après une courte introduction sur la zone d'étude, le bassin versant du Valescure va être caractérisé. C'est sur ce dernier que l'extraction du réseau hydrographique de la Vallée Obscure a été réalisée. Pour tenter de valider les résultats obtenus, des visites ont été organisées sur un de ses sous-bassins, présenté à la suite.

3.1.2.1 Le contexte géographique

Les travaux de recherche liés à cette étude ont été menés sur le bassin versant du Valescure¹⁵, sur la commune de Peyrolles (cf pointillés rouges, figure 6). Son réseau hydrographique rejoint le Gardon de Saint-Jean dans la Vallée Borgne. Ce dernier s'écoule en totalité dans le massif des Cévennes. La surface de son bassin versant est de 265 km². La vallée est très homogène sur tout son parcours, nous sommes en présence d'une morphologie fluviale en gorges profondes surplombées par des massifs aux crêtes aiguës. La plaine alluviale est particulièrement étroite et atteint moins de 100 m de large. Le cours d'eau a gardé son caractère naturel de rivière de montagne. Le Gardon traverse peu de zones urbanisées, dont les principales sont : St-André de Valborgne, la plus en amont ; Saumane, l'Estrechure sur la section intermédiaire et enfin St-Jean-du-Gard en aval [Diren, 2003].

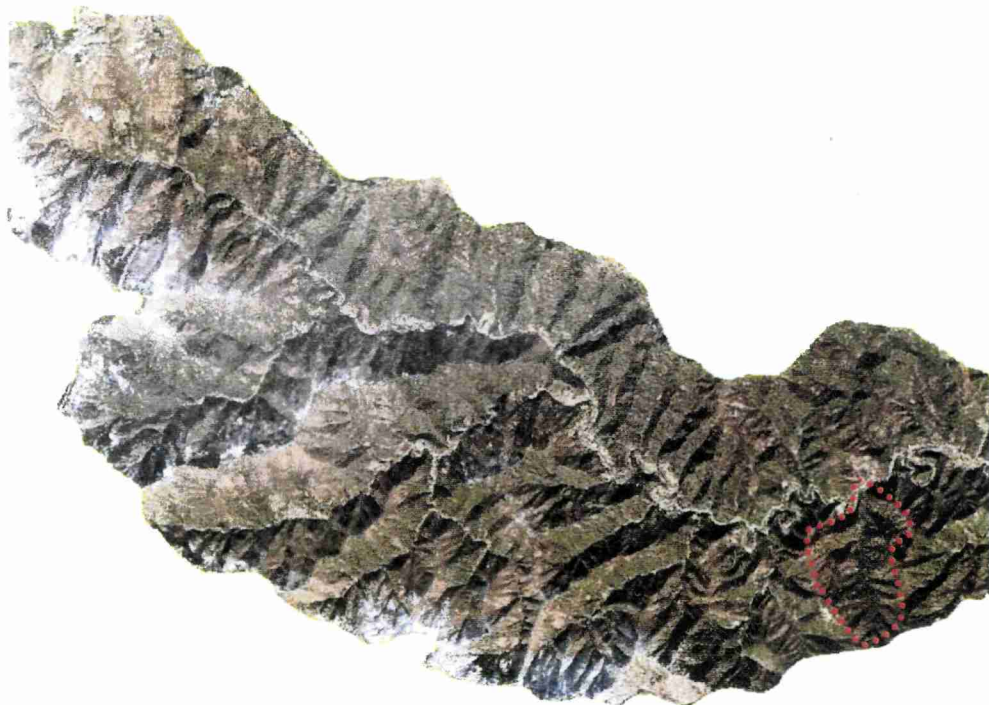


Figure 6 : Image QB d'une partie du Gardon en amont de Saint Jean en février 2006 (CNES®)

¹⁵ Le nom donné à la rivière qui coule en fond de vallée est le Valescure. Selon certaines recherches dans les archives [Ponce, 2006] son origine est attribuée au nom d'une famille noble qui vécut du XIV^{ème} au XVI^{ème} siècle dans la zone.



3.1.2.2 Le bassin versant du Valescure

Sa superficie est de 3,95 km², dont les $\frac{3}{4}$ de terrain granitique et le reste de schistes et de gneiss d'après la carte géologique au 1:80000^{ème}. L'épaisseur des sols varie de 0 à 15 m. Les sols superficiels sont constitués d'une couche importante de matériaux d'altération : arène granitique et schistes altérés sous forme de sols bruns [BCEOM, 2000]. Ces sols sont très filtrants : 480 à 2760 mm/h¹⁶ [Martin *et al.*, 2007]. La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle exprime ainsi la superficie du bassin au-delà d'une certaine altitude [Musy, 2005]. L'altitude moyenne du bassin versant est 509 m (en vert, figure 7).

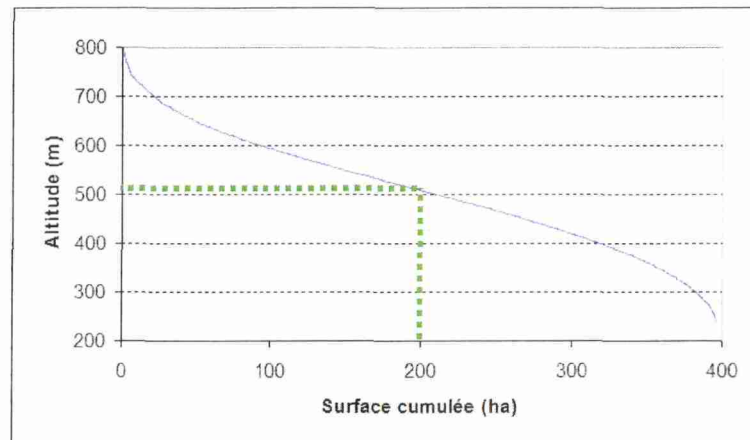


Figure 7 : Courbe hypsométrique du bassin versant du Valescure

Depuis 2002, l'UMR ESPACE suit ce bassin afin de caractériser les sols, le fonctionnement hydrologique, ainsi que les processus de transfert aux échelles parcelle et versant. Les équipements mis en place sont des stations hydrométriques, des pluviographes, une station TDR de mesure de l'humidité des sols (12 sondes réparties sur 4 profils, avec une profondeur maximale atteignant 140 cm) et deux piézographes [ILEE, 2006]. Ils ont réalisé une carte de l'occupation du sol en 2001, donnée en annexe C-1.

3.1.2.3 Le sous bassin versant du Cartaou

Dans le cadre de l'étude, la collecte d'informations sur les ravines s'est effectuée sur une zone restreinte. Une piste DFCI¹⁷ serpente le sous bassin versant du Cartaou¹⁸ (figure 8). C'est pour cela qu'il a été préféré aux autres sous bassins versants car le suivi des ravines en est facilité. Pour les observations hors piste, un petit sentier a été emprunté pour la majorité des points relevés.

¹⁶ Ces valeurs sont obtenues pour huit essais au double anneau.

¹⁷ Défense Forestière Contre les Incendies

¹⁸ Ethymologiquement, le Cartaou est la phonétisation de cartaux pluriel de cartal. Le cartal étant connu pour être une mesure gardoise pour le vin, on peut penser que de la vigne y fût cultivée, au Moyen Âge.

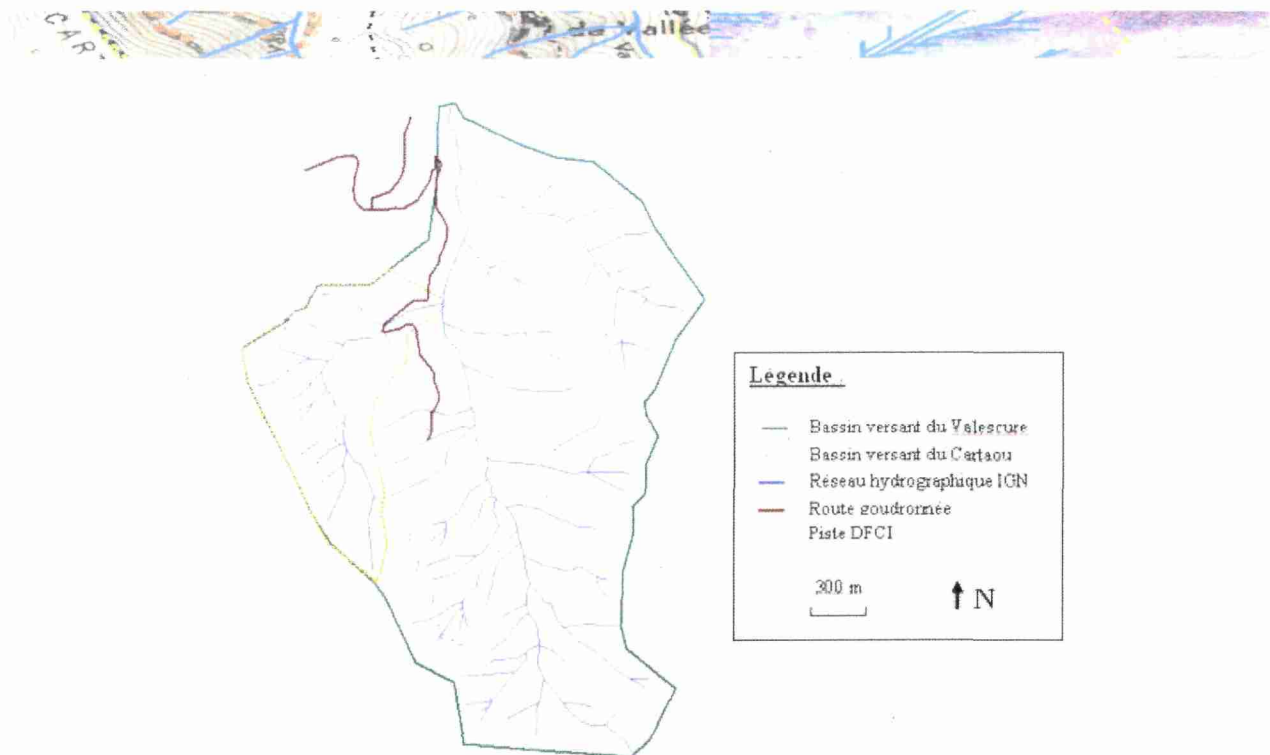


Figure 8 : Carte du bassin versant du Valescure

3.1.3 Le réseau hydrographique IGN

En ce qui concerne le réseau cartographié par l'IGN sur la zone, il est composé de trois cours d'eau : le Valescure et ses deux affluents le Valat des Abrits et le Valat du Cartaou¹⁹. Seul le Valescure, en fond de vallée, est considéré comme permanent. Tout le reste du réseau est classé en temporaire. Le réseau cartographié ne reprend pas la totalité des ravines définies par les courbes de niveau. Cette remarque soulève quelques questions : Pourquoi ces ravines ne sont pas représentées ? Est-ce un problème d'échelle de représentation ? Est-ce qu'elles coulent ? Ce travail de recherche va tenter d'y répondre en analysant différents types de données.

Les caractéristiques physiographiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage. Le temps de concentration²⁰ est influencé par diverses caractéristiques morphologiques comme la taille du bassin (sa surface), sa forme, sa pente et par aussi les caractéristiques du réseau hydrographique (tableau 1).

Cours d'eau	Valescure	Valescure amont	Valat des Abrits	Valat du Cartaou
Long réseau TTL (km)	24,22	14,53	3,62	4,45
Long cours d'eau principal (km)	3,49	2,52	1,47	1,74
Nb de tronçons	139	77	25	27
Perimètre BV (km)	8,88	6,30	3,61	3,94
Surface BV (km ²)	3,96	2,27	0,70	0,68
Pente moyenne réseau (%)		21	25	25
Indice de Gravelius	1,25	1,17	1,21	1,33
Densité de drainage (km/km ²)	6,12	6,40	5,17	6,53
Densité hydrographique (km ⁻²)	35,13	33,92	35,71	39,57

Tableau 1 : Caractéristiques physiographiques du bassin versant du Valescure

¹⁹ Pour la suite du mémoire, l'appellation du Valat du Cartaou sera simplifiée : le Cartaou.

²⁰ Le temps de concentration t_c des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce dernier.



Une densité de drainage²¹ élevée ainsi que des pentes moyennes importantes du réseau hydrographique en font un bassin versant à réaction rapide. L'analyse de sa forme, exprimée par l'indice de Gravelius²², conforte ces remarques. Une forme circulaire favorise, pour une même pluie, les débits de pointe de crue élevés, ceci en raison des temps courts d'acheminement de l'eau à l'exutoire. Des précisions sur les caractéristiques physiographiques sont données en annexe A-2.

3.2 Les données

Plusieurs données sont utilisées dans le cadre de cette étude. Elles vont à présent être présentées, en commençant par celles liées au réseau hydrographique, puis le MNT de l'IGN, suivi par les images QB et enfin les données contextuelles.

3.2.1 Sur le réseau hydrographique

3.2.1.1 La BD Carthage²³

Cette base de données constitue un référentiel hydrographique couvrant l'ensemble du territoire métropolitain à l'échelle 1:50000^{ème} afin de décrire une densité moyenne de 1 km de cours d'eau par km². Elle est réalisée à partir de la couche hydrographie de la BD CARTO[®] enrichie par le MEDD²⁴ et les agences de l'Eau avec le découpage du territoire en zones hydrographiques d'une part et la codification de ces zones et du réseau hydrographique. Sa mise à jour est effectuée conjointement par les agences de l'eau et l'IGN. Son but est la gestion de la ressource en eau à l'échelle départementale. A l'échelle de cette étude, la description du réseau hydrographique est trop grossière. Seuls les trois cours d'eau principaux du bassin versant du Valescure sont représentés.

3.2.1.2 La BD Topo

Le réseau hydrographique est à la fois constitué du réseau défini avec la photogrammétrie et le scannage des cartes au 1:25000^{ème}. La précision moyenne des cours d'eau issus de la photogrammétrie est de l'ordre de 2,5 m. Pour les zones non visibles sur les images aériennes, elle peut être de 5 m et plus. Le réseau permanent est considéré comme exhaustif à 98 %. Or comme dans le cadre de l'étude, c'est le réseau temporaire que l'on cherche à définir, les infos de cette BD ne sont donc pas suffisantes [IGN, 2006a].

3.2.1.3 Le scan25 IGN

Le scan des cartes IGN[®] à l'échelle 1:25000^{ème} est la description cartographique la plus détaillée que l'on puisse avoir sur le territoire à ce jour. Sa précision (taille terrain du pixel) est de 2,5 mètres, pour une résolution de 254 dpi [IGN, 2006b].

3.2.2 Le MNT IGN

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) fournit une description de l'environnement en trois dimensions. C'est un fichier altimétrique constitué par un réseau maillé régulier d'altitudes avec un pas de 25 m, extrait de la BD ALTI[®] [IGN, 1998]. Il décrit le profil du sol et peut être calculé de différentes manières :

- à partir de courbes de niveaux vectorisées,
- à partir de couples stéréoscopiques d'images aériennes ou satellitaires, par corrélation automatique ou par restitution,

²¹ Longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant.

²² Il est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée.

²³ Base de Données sur la CARTographie THématiques des AGences de l'eau et du ministère de l'Environnement

²⁴ Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable



- à partir de couples d'images radar.

Il est indispensable dans le domaine de l'hydrologie pour définir l'écoulement, la pente, l'ombre portée, les bassins versants,... Il peut également être utilisé pour la rectification des images aériennes ou satellitaires et donc la production d'orthophotographies. La qualité du MNT et sa précision dépendent de la méthode employée pour sa fabrication.

3.2.3 Les images QuickBird

Le satellite QuickBird, lancé en octobre 2001, acquiert des images noir et blanc (panchromatiques) à 60 cm de résolution et des images couleurs (multispectrales à 4 bandes) à 2,44 m de résolution couvrant une surface de 16,5 km x 16,5 km. Deux images satellites du Gardon d'Anduze sont à disposition de l'UMR TETIS : l'une en février et l'autre en juin 2006. L'angle nadir²⁵ est de 23°.

Les images QB sont au niveau 1B (radiométrie égalisée). Le CNES a passé ces données au niveau 3 : orthorectification avec utilisation de points d'appui et utilisation d'un MNT. Lors de ce passage au niveau 3, les données sont rééchantillonnées à une dimension de pixel de 60 cm. Pour la génération du produit fusionné, c'est la géométrie du canal panchromatique qui est utilisée pour fournir le produit fusionné. Il est livré en quatre canaux c1, c2, c3, c4 correspondant respectivement aux canaux Bleu, Vert, Rouge, Proche InfraRouge, donc dans l'ordre croissant du spectre.

3.2.4 Les données contextuelles

Des données complémentaires ont été utilisées afin de caractériser la zone d'étude.

La carte géologique au 1:80000^{ème} est homogène. Or dans la réalité, c'est plutôt hétérogène. Elle permet cependant de déterminer les caractéristiques géologiques du site. La classification de l'Inventaire Forestier National a été utilisée pour déterminer l'occupation du sol sur le bassin versant. Enfin les données recueillies au cours de visites sur la zone d'étude ont conduit à la création d'une BD sur les ravines. Les relevés ponctuels réalisés avec le GPS représentent une source d'information très utilisée dans cette étude. La création de la BD sur les ravines a permis l'intégration de ces données contextuelles sous SIG.

3.3 La méthodologie

La méthodologie mise en place dans cette étude s'articule autour de deux approches : une approche géomatique et une approche terrain.

Dans la première approche, les réseaux hydrographiques générés à l'aide des images satellites et du MNT sont analysés de façon similaire quantitativement et qualitativement. La seconde approche est basée quant à elle sur les données de terrain.

3.3.1 L'approche géomatique

3.3.1.1 Le choix de la référence

Pour toute analyse, il est important de choisir une référence pour pouvoir confronter les différents résultats entre eux. Différentes sources ont été testées. Au final, il apparaît que le scan 25 de l'IGN[®] donne une information plus complète des chemins de l'eau. Dans la suite du mémoire, dans un souci de simplification d'écriture, le réseau hydrographique issu du scan 25 de l'IGN[®] sera nommé "*référence IGN*". Pour le réseau hydrographique issu de la photo-interprétation des images QuickBird du CNES[®], l'appellation utilisée sera "*réseau QB*" et pour le celui issu d'un MNT de l'IGN[®], ce sera "*réseau MNT*".

²⁵ Angle droit vers le bas verticalement par rapport au tour de l'horizon de l'observateur.



3.3.1.2 L'analyse des réseaux photo-interprétés à partir des images QB

Un des objectifs de cette étude est d'évaluer l'intérêt des images QuickBird pour la caractérisation du réseau hydrographique. Comme la zone d'étude est restreinte, le choix s'est porté sur la photo-interprétation. En fonction des ruptures radiométriques s'apparentant à des ravines, des linéaires ont été tracés. La composition colorée utilisée est celle dite "en fausse couleur"²⁶. L'impact de différents critères a été évalué sur le traçage de ces linéaires :

- le changement d'opérateur,
- le zoom de visualisation,
- l'angle de vision,
- la date d'acquisition.

A ces fins, plusieurs interprétations des images QuickBird ont été réalisées (dix réseaux QB). L'analyse est basée sur la *longueur totale* du réseau hydrographique et ensuite sur le nombre de tronçons²⁷. Les lignes tracées manuellement peuvent représenter la même chose, sans pour autant se superposer (figure 9). Afin de s'affranchir de ces décalages, trois seuils de *zone tampon* ont été appliqués sur la référence IGN (5, 10, 20 mètres).

- En interceptant les différentes couches (référence IGN + *buffer* et réseau QB), la *partie commune* est calculée (réseau QB compris dans la zone tampon de la référence IGN).
- Ensuite la *partie en moins* (référence IGN – partie commune) et la *partie en plus* (réseau QB – partie commune) sont déterminées (figure 10).

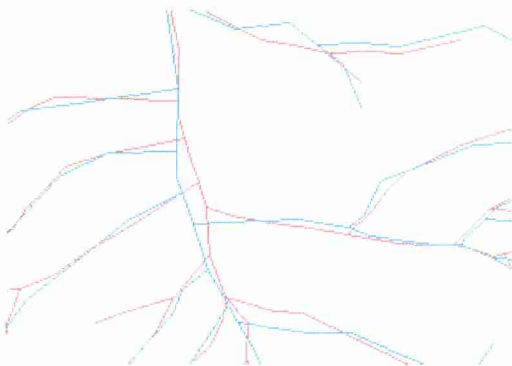


Figure 9 : Zoom sur deux réseaux QB

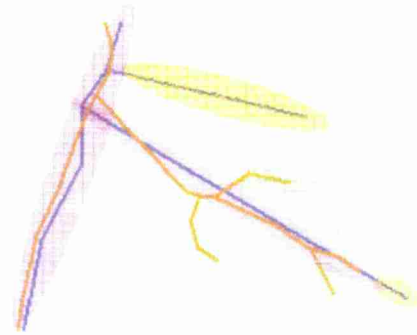


Figure 10 : Définition des différentes longueurs (en violet : partie commune, en vert : partie en moins, en orange : partie en plus)

La hiérarchisation des réseaux hydrographiques (IGN, QB) a été étudiée suivant la classification de Strahler [Strahler, 1957]. Elle décrit le développement du réseau hydrographique d'un BV de l'amont vers l'aval :

- Tout cours d'eau dépourvu de tributaires est d'ordre un.
- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau d'ordres différents prend l'ordre du plus élevé des deux.
- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau du même ordre est augmenté de un.

La classification de Shreve [Shreve, 1966] a été utilisée pour le contrôle de la topologie. Une de ses propriétés est que l'ordre du tronçon à l'exutoire correspond au nombre de tronçons d'ordre un connecté au réseau.

²⁶ C'est-à-dire que sur l'image QB, le Rouge correspond au Proche InfraRouge, le Vert au Rouge et le Bleu au Vert.

²⁷ Dans la littérature relative aux classifications, on trouve plusieurs appellations pour définir une portion du réseau hydrographique comprise entre deux nœuds : bief, branche, segment, tronçon. Normalement, un bief est plus en relation avec un réseau chenalisé, anthropisé comme des fossés ou des canalisations. Une branche correspond plus à une notion d'un cumul de portions afin de décrire un cours d'eau ou un affluent. Géométriquement parlant, les portions sont composées des fois de plusieurs segments. Il reste donc la notion de tronçon de réseau hydrographique qui semble plus en accord pour décrire les chemins de l'eau permanents et temporaires.



Pour terminer, une comparaison visuelle est effectuée entre sur les réseaux QB. La première analyse faite en superposant les réseaux QB avec la référence IGN pour visualiser et localiser les décalages et les apports éventuels des réseaux QB par rapport à la référence IGN. Puis, dans un second temps, les réseaux QB sont comparés deux à deux afin d'évaluer les changements potentiels entre deux réseaux.

3.3.1.3 L'analyse des réseaux obtenus avec le MNT IGN

Le réseau hydrographique est obtenu en fonction d'un seuillage de la surface drainée. La longueur totale ainsi que le nombre de branches ont été évalués en fonction du seuil de pixels drainant par rapport à la référence IGN. Sept réseaux ont ainsi été générés (réseaux MNT). Les différents seuils choisis pour le nombre de pixels drainant sont : 2 5 10 25 50 100 250 ce qui correspond respectivement à des superficies de 0,13 0,31 0,63 1,56 3,13 6,25 15,63 exprimées en hectares.

La même comparaison que pour les réseaux QB avec la référence IGN a été réalisée, aussi bien sur la longueur totale, commune, en plus et en moins que sur la structure des réseaux. Une analyse visuelle a également été menée sur les réseaux MNT dans l'objectif de voir s'ils se superposent dans leur partie commune.

3.3.2 L'approche terrain

3.3.2.1 La constitution de la BD ravines

Le but final de l'étude est de contribuer à l'amélioration des connaissances des transferts de l'eau dans le bassin et donc notamment d'obtenir une meilleure représentation des chemins de l'eau. La recherche de ce but ne peut être atteinte par une seule approche informatique, d'où la nécessité d'aller sur le terrain. Plusieurs visites, d'une journée, ont été consacrées à l'étude de la diversité et de la complexité du réseau hydrographique dans son milieu naturel. Une analyse multicritère a été menée afin de comprendre le fonctionnement des ravines et leurs interactions avec l'environnement. Un protocole expérimental a été mis en place, détaillé ci-après. La fiche terrain utilisée pour les relevés sur le terrain est reproduite en annexe.

Afin de valoriser au mieux la richesse de ces données, elles ont été compilées dans une base de données nommée **BD ravines**. Les coordonnées XY acquises avec le GPS permettent la spatialisation de ces données dans le bassin versant lorsqu'elles sont visualisées avec un logiciel SIG. Ainsi elles peuvent être confrontées à d'autres couches d'information (réseaux QB et réseaux MNT). Dans le cadre de l'étude, cette BD ravines a permis, in fine, d'évaluer les apports de chaque type de données pour améliorer la connaissance du réseau hydrographique réel (car observé sur le terrain) et d'élaborer une référence regroupant toutes les connaissances acquises au cours de l'étude. Par ailleurs, l'intégration dans le logiciel SIG de ces données pourra par la suite aider au suivi et à l'analyse du réseau hydrographique. Par l'exemple, l'étude de l'évolution spatio-temporelle du réseau pérenne sera rendue possible avec l'ajout de données issues de nouvelles campagnes de mesures sur le terrain.

3.3.2.2 L'élaboration du protocole expérimental

Sur les versants, les chemins de l'eau sont plus ou moins incisés par les processus hydriques selon leur localisation sur le versant. Face à cette variété, il importe de caractériser géomorphologiquement les drains observés suivant leur importance. La classification proposée est basée sur une caractérisation de la forme des drains à deux niveaux d'échelle : le premier indice ("Morphologie") détermine la forme du relief à sur une cinquantaine de mètres. Plus local, le second indice ("Ravine") indique la morphologie du relief à une échelle métrique (figure 11). Pour aller plus loin dans la caractérisation du second indice, des mesures de largeur et de profondeur ont été effectuées. Morphologiquement, les ravines peuvent être identiques (même indice) mais ne pas avoir la même largeur et la même profondeur. Le rapport profondeur/largeur est donc préféré pour caractériser le second indice car il met en avant une notion de proportion.

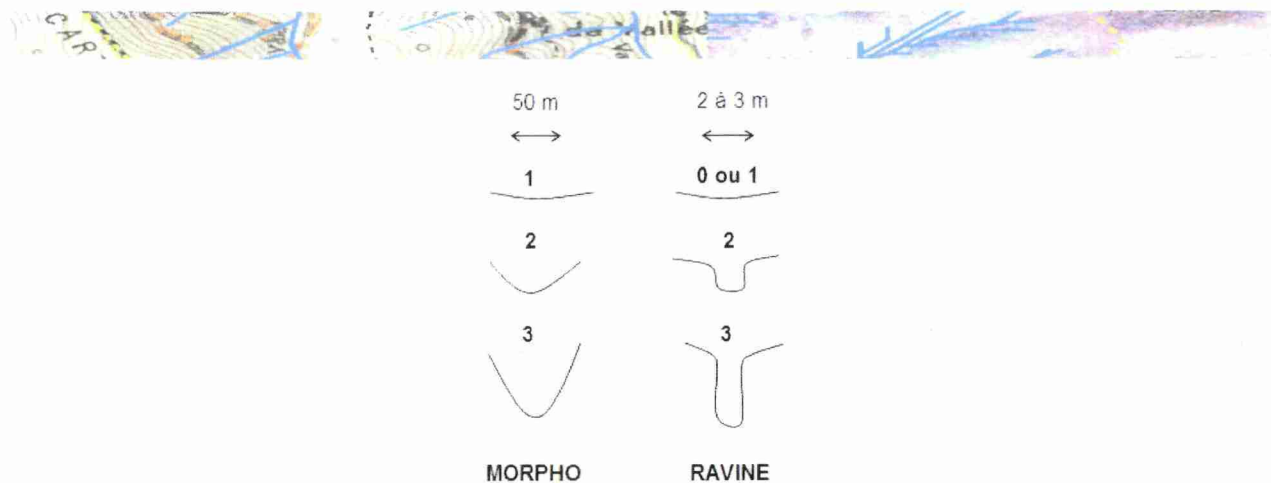


Figure 11 : Classification géomorphologique des drains

L'hydrologie du drain a été évaluée suivant un indice allant de 0 à 4, et avec des mesures volumétriques lorsque le débit le permet.

Afin d'avoir une idée de l'érosion, le charriage a été noté lorsqu'il est visible (laisses de crues dans les arbres, blocs de pierre à l'exutoire des ravines).

Le couvert végétal a été aussi pris en compte. Cela permet de faire le lien, en partie, avec la présence ou non des traces d'érosion. Par exemple, sous une forêt de châtaignier, les traces éventuelles de ruissellement superficiel sont cachées par les feuilles.

Des photos ont été prises en amont et en aval du point d'observation. Elles ont pour objectif d'illustrer les données et d'aider à la localisation des ravines sur le terrain. Par ailleurs, un schéma du réseau de drains a été réalisé, si nécessaire, pour faciliter la compréhension de la zone après coup.

Des observations complémentaires, pouvant aider à la compréhension de la dynamique des processus superficiels, sont relevées comme les impacts de blocs de pierre sur le tronc des arbres, l'érosion du talus, la présence d'une buse...

3.3.2.3 La création d'une référence terrain

Jusqu'à présent, toute l'analyse s'est basée sur la référence IGN. Grâce à la BD ravines, une *référence terrain* va être élaborée. Les données de base sont les relevés ponctuels GPS et la référence IGN. Cependant il se pose un problème : Comment tracer un réseau hydrographique cohérent à partir de points ? Pour cette étape, il est utile de coupler ces points avec un réseau existant (QB ou MNT). Ainsi la référence IGN est mise à jour à partir des données de terrain.

3.3.3 Le couplage des diverses sources d'information

Dans la partie bibliographique, il a été souligné qu'une méthode semi-automatique est préférée à une entièrement automatique pour extraire le réseau hydrographique. Dans le même dessein, il est préférable d'utiliser plusieurs sources d'informations qu'une seule afin d'obtenir un réseau hydrographique au plus proche de la réalité. Ce couplage d'informations permet de dégager les avantages de chaque source d'informations.

3.3.3.1 Le gain des images QB

Les images de télédétection couvrent instantanément de grandes zones, permettent de s'affranchir des contraintes du terrain (accessibilité, fiabilité de l'instrumentation, coût en personnel) et apportent une connaissance sur le contexte hydrographique d'un bassin versant. La précision géométrique des images QB peut éventuellement servir à une meilleure présentation planimétrique du réseau hydrographique.



3.3.3.2 L'apport du MNT IGN

Le MNT est incapable, à lui tout seul, de définir correctement la structure des écoulements en tout point du bassin versant (rivières et limites). Il est donc impératif de lui associer des données extérieures pour obtenir un MNT cohérent [Puech, 2000]. Dans cet esprit, il peut être utilisé comme élément de validation lorsqu'il se superpose avec une autre couche d'information (référence IGN), ou aussi comme élément descriptif morphologique pour les zones où le réseau hydrographique est non visible sur les images QB (nuages, neige, ombres, fermeture du couvert forestier).

3.3.3.3 La nécessité du terrain

Les données de télédétection et les MNT sont porteurs d'une connaissance structurale du réseau hydrographique. Cependant les hydrologues ne peuvent que lancer des avertissements : attention au tout informatique... [Beven, 1989]. Les résultats obtenus sont entachés d'erreurs et ne concordent pas systématiquement entre eux. Dans le but de clarifier certaines zones confuses (densité élevée du réseau de drainage, zones non visibles) l'approche terrain est nécessaire. En plus de vérifier les résultats obtenus par l'approche SIG, les données de terrain ajoutent une connaissance morphologique et spatio-temporelle sur le réseau hydrographique.



4 La phase expérimentale

La réalisation réside dans la pratique.

Bouddha.

Dans cette partie, les premiers résultats examinés vont être ceux relatifs aux images QB. Dans un second temps, ce seront ceux liés aux réseaux MNT. La confrontation de ces deux réseaux aux données de terrain donne la possibilité de définir un réseau référence. L'objectif de ce dernier réseau est de résumer au mieux toutes les connaissances acquises au cours de ce travail de recherche.

4.1	Les résultats avec les images QB.....	26
4.2	Les résultats avec les réseaux MNT	34
4.3	La confrontation aux données terrain	39

4.1 Les résultats avec les images QB

Un descriptif sommaire des tâches préliminaires est fait. L'analyse des réseaux QB est plus longuement développée afin d'en extraire leurs apports, leurs limites et les perspectives qui en découlent pour l'identification du réseau hydrographique.

4.1.1 Les tâches préliminaires

Afin d'analyser les réseaux QB, quelques tâches ont été effectuées.

- Etape 1 : Superposition des canaux et leur géoréférencement. Les différents canaux ont été superposés pour obtenir une image multispectrale (plusieurs bandes). Il y a un décalage entre les images QB et le scan25 IGN. Les coordonnées de dix points ont été prises sur les deux dans le but d'effectuer le calage de l'*image QB* sur le scan25 (Erdas Imagine).
- Etape 2 : Traçage du réseau hydrographique. Deux zooms de visualisation ont été choisis arbitrairement pour interpréter les images²⁸. Les tracés sont stockés sous forme vecteur directement utilisables avec les logiciels SIG. Aucun traitement (géométrique ou radiométrique) a été réalisé sur ces images pour mettre plus en évidence les ruptures radiométriques (Erdas Imagine).
- Etape 3 : Création de la typologie du réseau. Les tracés de l'étape précédente sont de simples linéaires. Pour les transformer en un réseau hydrographique, il faut faire la topologie du réseau, c'est-à-dire connecter chaque linéaire entre eux, segmenter le réseau en tronçons²⁹ et enfin déterminer le sens d'écoulement à l'intérieur de ces tronçons. Pour contrôler la topologie, les deux classifications (Strahler et Shreve) ont été utilisées. La topologie est considérée bonne

²⁸ Zoom grossier (1:14500^{ème}) et zoom fin (1:4000^{ème})

²⁹ Portion du réseau hydrographique comprise entre deux nœuds

lorsque le nombre de tronçons d'ordre 1 (Strahler) soit égal à l'ordre du tronçon à l'exutoire selon la classification de Shreve (ArcGIS).

4.1.2 L'analyse des réseaux QB

Dans un premier temps, les réseaux QB vont être comparés quantitativement à la référence IGN afin d'évaluer les différents critères testés lors de la phase d'extraction du réseau hydrographique à partir des images satellites. Ensuite, les critères seront aussi étudiés par une analyse visuelle des réseaux.

4.1.2.1 La comparaison des réseaux QB avec la référence IGN

4.1.2.1.1 *Les effets de la date d'acquisition*

Une première approche visuelle des images révèle que l'image de février semble plus intéressante pour extraire manuellement le réseau hydrographique grâce aux ombres. Le relief de celle du mois de juin semble plus écrasé (figure 12).

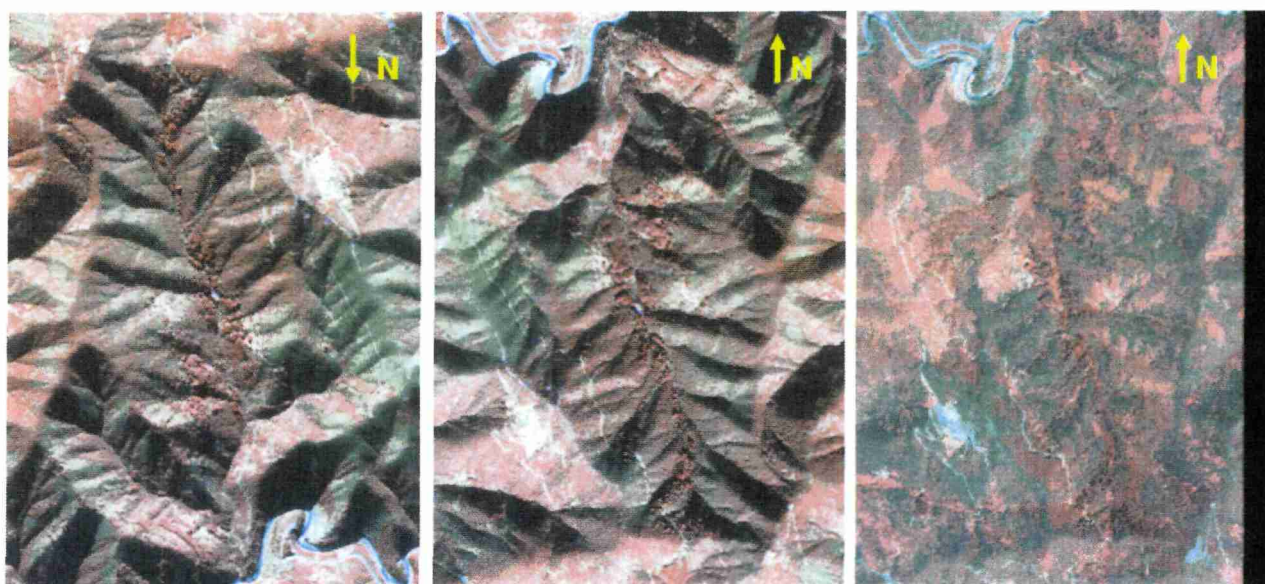


Figure 12 : Images QuickBird du bassin versant du Valescure en 2006 (a et b en février, c en juin)

En effet, en étudiant les longueurs totales des réseaux QB, seuls ceux relatifs à février dépassent la longueur totale de la référence IGN, tandis qu'à l'inverse pour le mois de juin, c'est inférieur (tableau 2). Le tableau 3 donne la signification des codes utilisés pour le nom des réseaux QB.

Globalement, le gain par rapport à la référence IGN est égal à l'écart-type calculé à partir des réseaux QB, soit 2,8 km. En mesurant les ruptures radiométriques sur les images QB, il semble qu'il soit possible d'estimer la largeur des ravines. A titre indicatif, dans la partie haute des versants, en zone dégagée, la largeur minimum observable serait de 5 m. Au vu de la difficulté d'interprétation, ce résultat permet juste de fixer un ordre de grandeur pour les réseaux QB. Cela induirait que les réseaux QB ont une largeur minimale de 5 m. Sur la figure 13, deux ravines se rejoignent après leur intersection avec la piste DFCI (largeur de 4 m). Les deux ravines en amont de la piste DFCI ont une largeur de 5 m (R1 et R2) et en aval une fois unifiées, la largeur serait de 10 m (R3)³⁰.

³⁰ Ces mesures corroborent les données recueillies dans la BD ravines.

Réseaux QB	Longueur totale (m)
juin_reseau4000	20876
juin_reseau4000-180	12376
juin_reseau14500	12565
juin_reseau14500-180	14549
fev_reseau4000	30313
fev_reseau4000_op2	28705
fev_reseau4000-180	28026
fev_reseau14500	24399
fev_reseau14500_op2	24429
fev_reseau14500-180	23351
Référence IGN	24224

Tableau 2 : Longueur totale des réseaux QB et de la référence IGN

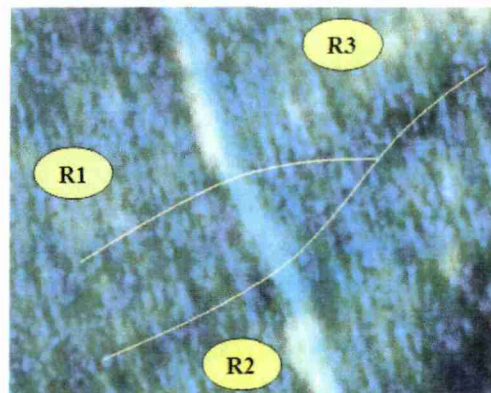


Figure 13 : Extrait de l'image QB de février 2006

Code	Signification
4000	zoom fin
14500	zoom grossier
180	le Nord vers le bas
op2	second opérateur
fev	image de février
juin	image de juin

Tableau 3 : Correspondance des codes aux critères testés

4.1.2.1.2 *L'impact des conditions d'observation*

◆ Les angles de visualisation

En observant les images QB suivant deux angles de vision différents, il apparaît que la vue retournée une meilleure impression du relief, donc un confort de détection³¹ (figure 12). Pour vérifier si cet effet visuel a un impact sur la photo-interprétation, l'analyse se portera sur la longueur totale, la partie commune, en moins et en plus des réseaux QB avec la référence IGN.

Comme il vient de l'être démontré précédemment, les images de février sont plus intéressantes. En effet, en ce qui concerne la partie commune, les pourcentages du mois de février sont supérieurs à ceux de juin³². Par conséquent, dans le reste de l'analyse, les réseaux QB relatifs au mois de juin ne seront pas examinés. On constate qu'il y a des écarts entre les réseaux QB issus des deux angles de visualisation pour la partie commune et une similitude pour les parties en moins et en plus.

◆ Les zooms de visualisation

Les réseaux QB apportent un gain d'information plus conséquent lorsque le zoom est fin. En effet, les longueurs totales sont augmentées de plus de quatre kilomètres par rapport au zoom grossier, donc par extension à la référence car les longueurs totales des réseaux QB (zoom grossier) sont égales à la référence. Pour un buffer de 20 m avec un zoom fin, 84%³³ des réseaux QB expliquent la référence IGN contre 67% pour un zoom grossier (figure 14). Le pourcentage d'écart entre les deux zooms est de l'ordre de la taille du buffer, soit pour l'exemple un écart de 17%³⁴ pour un buffer de 20 m. La partie en plus est supérieure à celle en moins pour le zoom fin, soit un gain d'informations supérieur aux oublis (figure 15). Le zoom grossier ne permet pas de caractériser un gain significatif car les parties en plus et en moins sont quasiment égales.

³¹ Suivant l'orientation de l'image, avec le jeu des ombres, on peut avoir l'impression que le fond de thalweg correspond à des crêtes (image de gauche, avec le nord vers le haut), alors qu'à l'inverse (image de droite, avec le nord vers le bas), on observe bien le réseau hydrographique en fond de thalweg.

³² Il convient de rappeler que plus le buffer est grand, plus les chances d'observer un tronçon à l'intérieur de la zone tampon sont grandes, ce qui explique les pourcentages élevés obtenus.

³³ Valeur moyenne des trois zooms fins pour le mois de février.

³⁴ Valeur moyenne des trois zooms grossiers pour le mois de février.

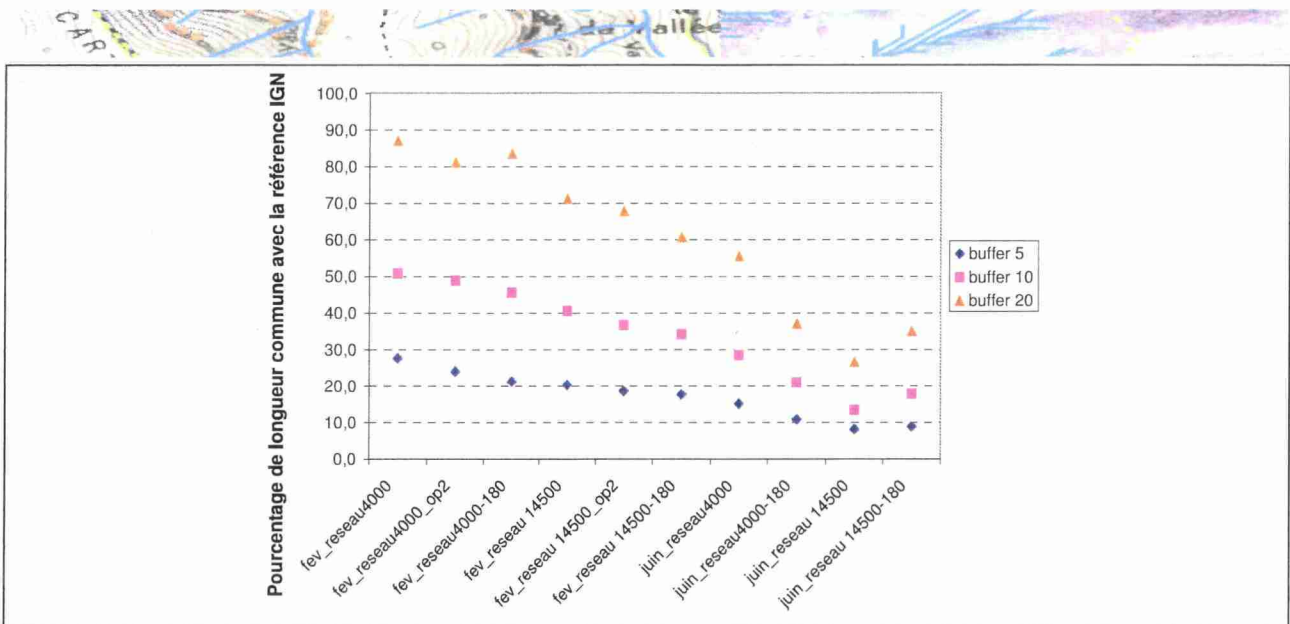


Figure 14 : Pourcentage de longueur commune entre les réseaux QB et la référence IGN

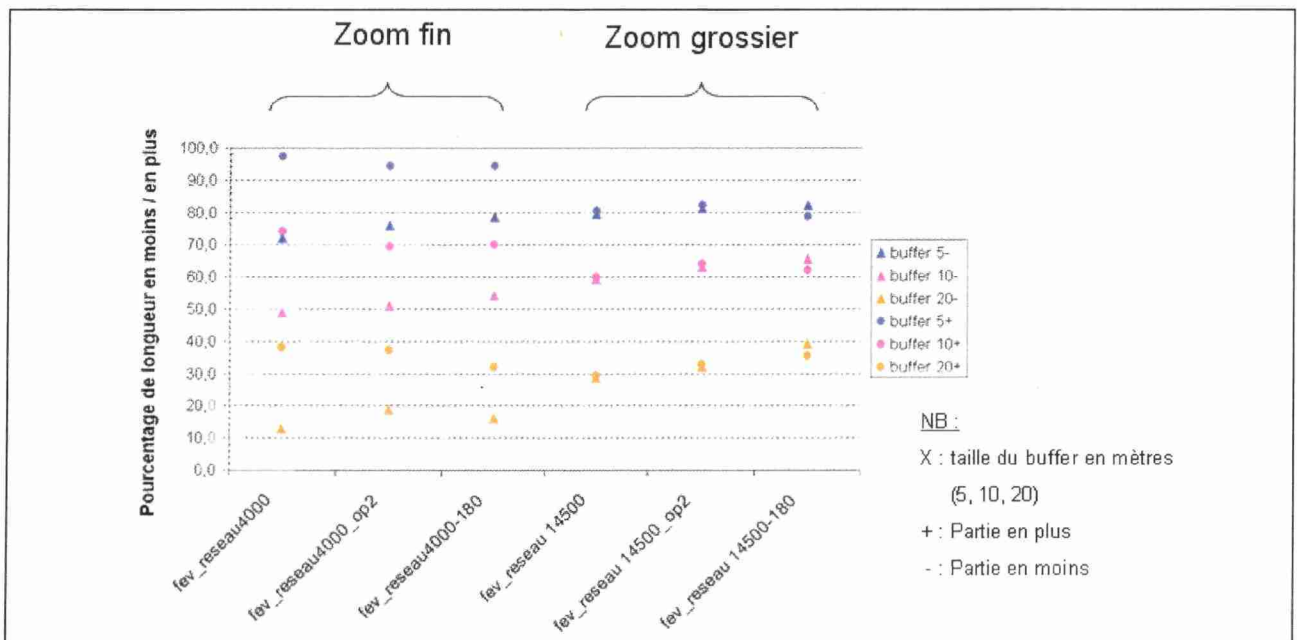


Figure 15 : Pourcentage de longueur en moins / en plus entre les réseaux QB et la référence IGN

4.1.2.1.3 La comparaison des photo-interprétations des deux opérateurs

La qualité de la photo-interprétation dépend de l'opérateur. En mode opérationnel, seuls des spécialistes se consacrent à ce travail. A ce titre, deux opérateurs ont analysé les images QB de février suivant deux zooms de visualisation afin d'évaluer l'influence de l'opérateur sur le réseau QB créé. En comparant les réseaux QB deux à deux, il semble ne pas y avoir de différence significative du point de vue des longueurs totales, communes (figure 14), en moins et en plus (figure 15).

4.1.2.2 La comparaison qualitative des réseaux QB deux à deux

4.1.2.2.1 L'impact des conditions d'observation

◆ Les angles de visualisation

L'analyse visuelle corrobore l'analyse quantitative. Les réseaux QB se superposent bien, quelque que soit le zoom, excepté une zone (cf anneau rouge, figures 16 et 17).



En comparant avec les photo-interprétations du second opérateur, il apparaît que cette zone pose des problèmes pour l'identification du réseau hydrographique. Les images QB ont permis d'expliquer la complexité de cette zone par la présence d'une piste DFCI et un changement de végétation. Le linéaire aberrant suit la limite entre les feuillus (en vert sur l'image QB de février) et les résineux (en rouge sur l'image QB de février)³⁵ (cf fl, annexe B-1).

◆ Les zooms de visualisation

En examinant les deux figures, il ressort que la densité hydrographique des réseaux QB est plus importante pour le zoom fin comme le laissait présager l'analyse quantitative. Les tronçons sont moins rectilignes pour le zoom fin (figure 16).

4.1.2.2 La comparaison des photo-interprétations des deux opérateurs

Si du point de vue de l'analyse quantitative les réseaux QB sont similaires, géométriquement, il apparaît des différences. Chaque opérateur ne voit pas les mêmes choses. Les ravines ne commencent pas au même endroit (cf disque rose, figure 16a). Le réseau hydrographique diffère soit pour des zones où l'interprétation est difficile (cf étoile orange, figure 16a), soit pour des zones où la densité hydrographique est élevée (cf triangle orange, figure 16a).

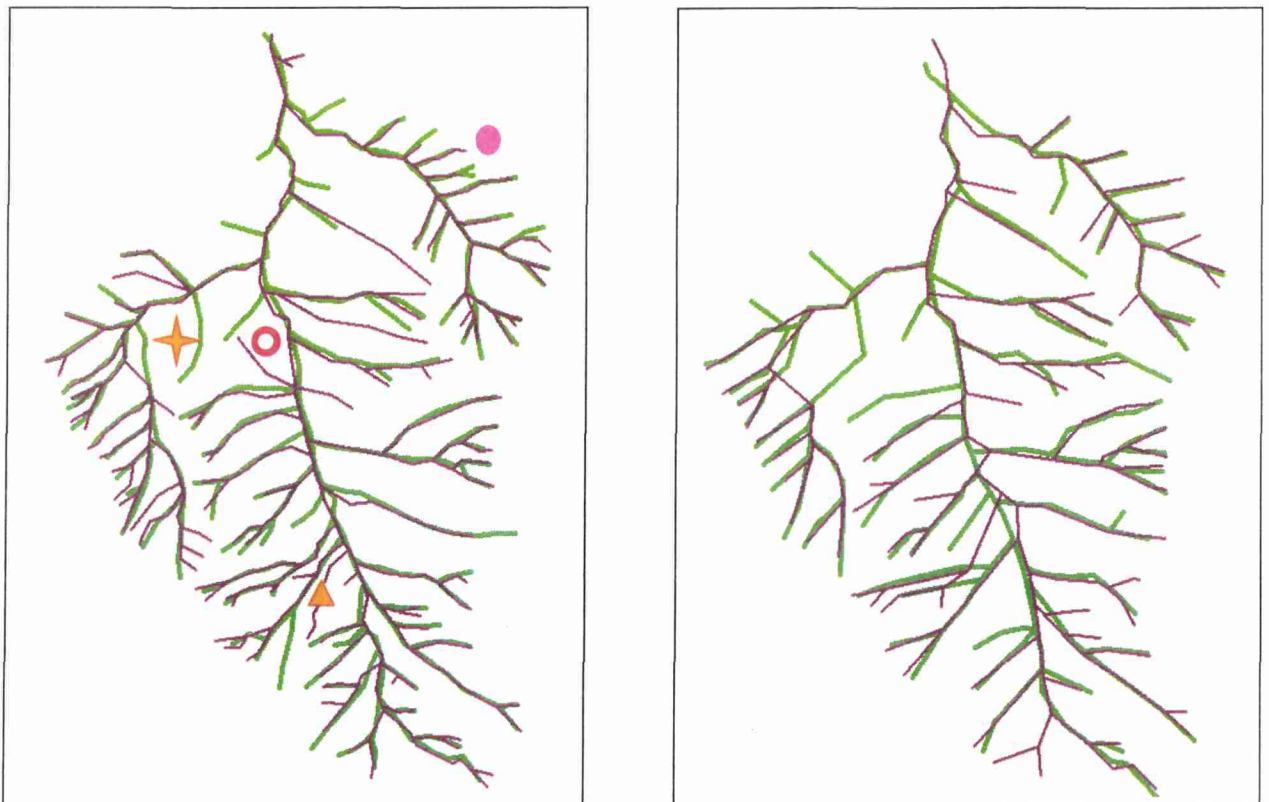


Figure 16 : Superposition des réseaux QB en février a) pour un zoom fin et b) pour un zoom grossier (en violet : premier opérateur, en vert : second opérateur)

³⁵ Le PIR est sensible à l'activité chlorophyllienne. S'il y a une réponse dans le PIR (couleur rouge), c'est que les arbres ont des feuilles. Or en hiver, seuls les résineux et les chênes verts gardent leurs feuilles (ou aiguilles).

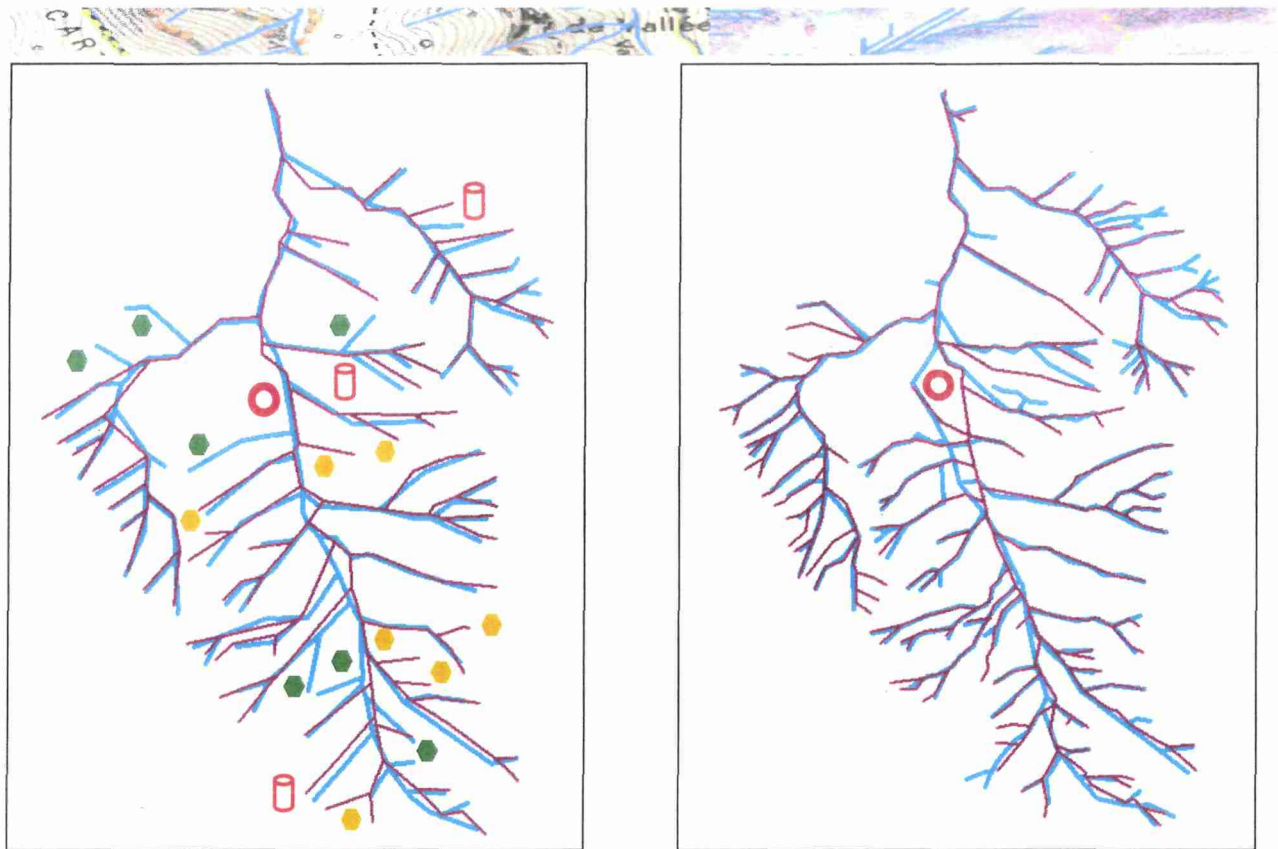


Figure 17 : Superposition des réseaux QB en février a) pour un zoom fin et b) pour un zoom grossier (en violet : vue normale, en bleu : vue retournée)

4.1.2.2.3 *La quantification du gain et de l'oubli*

Un tronçon est considéré **singulier** lorsqu'il n'est présent que dans un seul réseau. Il traduit soit un gain, soit un oubli pour une comparaison deux à deux des réseaux QB. En utilisant un buffer, il est difficile de distinguer ces tronçons singuliers. En revanche visuellement, cela prend quelques secondes pour les repérer. Il suffit de choisir un des deux réseaux QB comme référence, de compter combien ce réseau référence possède de tronçons singuliers par rapport à l'autre (gain), et ensuite, de compter inversement combien l'autre réseau possède de tronçons singuliers (oubli). Enfin, il ne reste plus qu'à diviser les deux nombres par leur nombre total de tronçons respectifs. Ainsi, il est mis en évidence que les oublis et les gains sont quasiment égaux, de l'ordre de 6%³⁶. Ce test a été effectué sur les figures 16 et 17. Cette approche visuelle a l'avantage de pallier aux décalages pour un même drain, lors du traçage des linéaires (cf cylindre rouge, figure 17a).

4.1.3 Discussions et perspectives

4.1.3.1 L'apport des images QB pour l'extraction du réseau hydrographique

Les images QB offrent une connaissance de l'espace intéressante pour la thématique de cette étude. Dans cette première analyse, plusieurs critères ont été étudiés. Cela a permis de définir les conditions optimales pour photo-interpréter les images QB :

- un zoom fin,
- une image à la fin de l'hiver, avant la reprise printanière de la végétation,
- un angle de visualisation qui permet un meilleur confort de lecture pour le photo-interprète.

Chaque réseau QB diffère, ce qui signifie qu'il est difficile d'avoir des interprétations rigoureusement exactes. Les résultats peuvent laisser présager, avec une forte probabilité, que même deux réseaux QB construits dans les mêmes conditions, par le même opérateur, diffèreraient aussi. Dans le cas de l'étude

³⁶ Exemple : le nombre d'hexagone jaune et vert est de 7 (figure 19). Le nombre total de tronçons est de 123.



les réseaux QB sont volontairement un premier jet, c'est-à-dire qu'une fois l'image traitée, les réseaux QB n'ont pas été modifiés même si des erreurs étaient avérées. Donc après coup, une analyse plus approfondie des images QB aurait sûrement tendu à uniformiser les différents réseaux QB. Cependant, des réserves peuvent être émises sur le temps passé à améliorer l'exactitude du réseau et le gain réel, à l'heure où l'on cherche à minimiser les coûts en personnel [Trias-Sanz, 2006] et compte tenu des faibles écarts obtenus entre deux interprétations (de l'ordre de 6% dans le cas de l'étude).

4.1.3.2 Les limites de la méthode

4.1.3.2.1 *Les zones tampons*

Les zones tampons ont été utilisées dans cette étude afin de pallier à une différence de positionnement de deux tronçons voisins dans le plan XY. Les différentes zones tampons utilisées ont pour but de minimiser les différences dues au tracé des ruptures radiométriques lors de la photo-interprétation des images QB en englobant dans une certaine enveloppe les tracés (cf ovale rouge, figure 18).

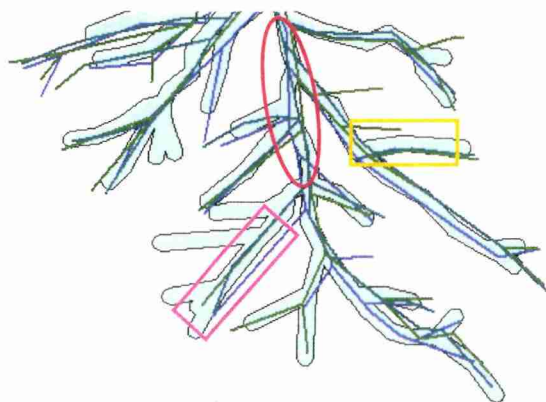


Figure 18 : Les limites des zones tampons (référence IGN_20 avec trois réseaux QB de février)

Au delà du troisième seuil (20 m), le tracé de deux branches successives peut être regroupé en une seule entité (cf rectangle orange, figure 18). Le réseau hydrographique devient alors grossier. Toutefois, dans certains cas, le seuil appliqué ne suffit pas (cf rectangle rose, figure 18). Une solution serait donc d'utiliser une zone tampon variable suivant la hiérarchisation du réseau (Strahler, Shreve), sa morphologie (largeur, profondeur), la topographie. Par exemple, pour un tronçon d'ordre 1 (Strahler), le buffer serait de 10 m, pour l'ordre 2, 15 m, pour l'ordre 3, 20 m, pour l'ordre 4, 25 m et pour l'ordre 5, 30 m. Le réseau devrait être moins parasité.

Enfin utiliser une zone tampon n'est pas forcément idéal sachant qu'il y a déjà des décalages dus au géoréférencement des images QB.

4.1.3.2.2 *La classification de Strahler*

Les nœuds à 3-4 tronçons amont perturbent la classification de Strahler. Selon la connexion ou la simplification de ces nœuds le résultat est partiellement modifié. Dans le cas de la figure 19 (à gauche), les deux branches d'ordre 1 (Strahler, en marron, petit anneau rouge, figure 19) rejoignent un tronçon d'ordre 2 directement. La classification ne change pas. Si les deux tronçons d'ordre 1 se rejoignent avant la confluence avec celui d'ordre 2, la classification change (figure 19, à droite).

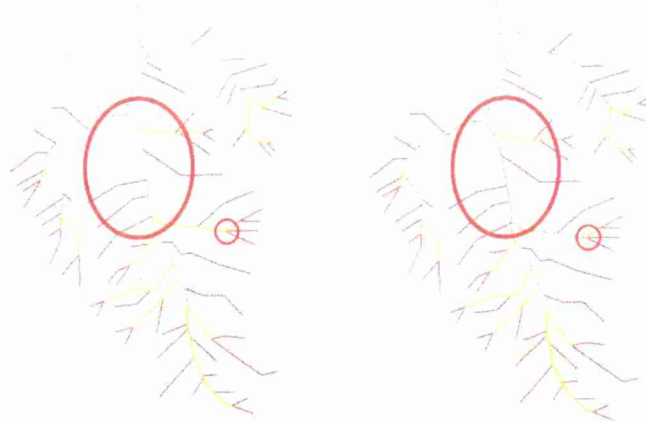


Figure 19 : Une limite de la classification de Strahler

4.1.3.2.3 *La signification des tronçons*

Si un réseau QB seul ne définit pas dans sa globalité la référence IGN, la superposition de tous les réseaux permet de recouvrir la quasi-totalité de la référence IGN (figure 21). Cependant, ce gain en information suscite des questions :

- Est ce que la modification des longueurs des branches est due à un simple allongement des branches ? ou à un drain plus fouillé ? (cf cercle rose, figure 20)
- Dans quelle mesure les nouvelles branches isolées constituent-elles un drain réel ? (cf triangles jaunes, figure 20)

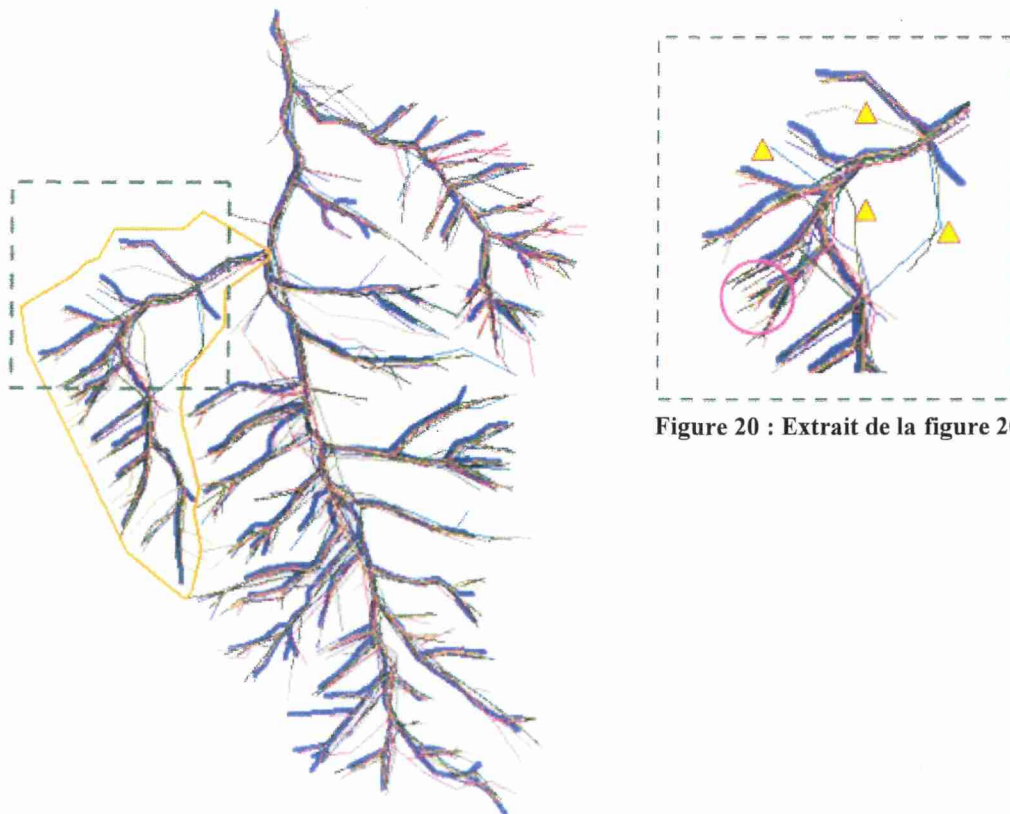


Figure 20 : Extrait de la figure 20

Figure 21 : Superposition de plusieurs réseaux hydrographiques (en trait bleu épais : buffer de 20 m sur la référence IGN, en traits fins : tous les réseaux QB)



La référence IGN n'est plus suffisante pour tenter d'y répondre. Plusieurs campagnes de caractérisation in situ des chemins de l'eau ont donc été menées sur un sous-bassin du BV du Valescure (le Cartaou, cf polygone orange) afin de caractériser l'information.

L'intégration de la BD ravines sous le SIG apporte un gain d'informations dans les zones fermées par le couvert végétal et sur les ravines légèrement incisées. Elle permet par ailleurs d'affiner le choix du seuil haut et l'exactitude du réseau MNT. Cette BD permet aussi de différencier les ravines principales des ravines élémentaires.

4.1.3.3 Les perspectives d'une référence issue de toutes les photo-interprétations

Comme il a été souligné auparavant, la superposition des réseaux QB recouvre la quasi-totalité de la référence IGN (figure 21). Chaque réseau QB apporte un gain d'informations. Suivant les différents critères, un nouveau tronçon peut être mis en évidence. Etant singulier, il importe de se poser la question si ce linéaire correspond ou non réellement à un tronçon du réseau hydrographique. Le croisement avec les informations contextuelles permet d'effectuer cette vérification.

Néanmoins, créer une référence issue de toutes les photo-interprétations n'est pas évident. Les réseaux QB ne se superposent pas parfaitement entre eux. Ces décalages sont dus aux tracés réalisés par les opérateurs. Par conséquent, devant la multitude des réseaux QB, quelques règles d'usage ont été définies pour l'élaboration de la *référence QB* : le tronçon de la référence QB correspond soit au tronçon moyen³⁷ des réseaux QB, soit à un tronçon singulier. La référence QB est le réseau moyen de deux réseaux intermédiaires : le premier correspond au réseau moyen des trois zooms grossiers pour février et le second aux trois zooms fins pour février.

Cette méthode offre la possibilité d'avoir une connaissance satisfaisante de l'ossature du réseau hydrographique et des longueurs des ravines compte tenu de leurs écart-types faibles. Cependant, les règles d'usage utilisées la rendent moins fiable pour la localisation précise des ravines. Pour remédier à cet inconvénient, une autre voie peut être explorée : celle de rechercher les deux réseaux QB comportant le plus de tronçons singuliers l'un vis-à-vis de l'autre, tout en gardant une certaine cohérence pour le réseau principal, pour élaborer cette référence QB. Déterminer une référence QB à partir de deux réseaux QB est plus simple qu'avec six au vu des écarts entre tous les réseaux QB. Les branches de la référence QB correspondraient alors :

- soit à la superposition des deux branches,
- soit à la moyenne des deux autres (branches passant entre les deux)
- soit une branche singulière.

4.2 Les résultats avec les réseaux MNT

Afin de pouvoir étudier les réseaux MNT, quelques étapes au préalable sont nécessaires. Elles seront rapidement citées. Ensuite, comme pour les réseaux QB, les réseaux MNT vont être analysés quantitativement et qualitativement afin de dégager leurs apports pour la connaissance du réseau hydrographique.

4.2.1 Les tâches préliminaires

Le MNT est sous format ASCII. Par conséquent, via les logiciels SIG, il a été importé et transformé au format GRID. Ensuite, la procédure utilisée pour l'extraction d'un réseau hydrographique à partir d'un MNT est la suivante (avec l'extension Hydrologic Modeling sous Arview3.2) :

³⁷ Le tronçon passe au milieu de tous les réseaux QB.



- Etape 1 : requête Fill Sinks : Cet outil permet de remplir les trous issus d'artefacts de calcul, se situant dans le MNT et susceptibles de ne pas assurer une continuité d'écoulement de l'amont vers l'aval lorsque l'algorithme D8 est utilisé. Les cellules avoisinantes s'écouleraient toutes dans ce trou comme si c'était un puits. Il est donc important de les éliminer avec cette fonction.
- Etape 2 : requête Flow Direction : Les directions de flux sont déterminées en trouvant la direction de plus grande pente de chaque cellule. Ainsi est déterminé vers quelles cellules l'eau va s'écouler sur tout le bassin versant.
- Etape 3 : requête Flow Accumulation : Pour créer un réseau hydrographique, il faut utiliser cette requête qui calcule le nombre de cellule amont s'écoulant dans un lieu précis.
- Etape 4 : requête Stream Network : Le nombre minimum X de cellules faisant partie du réseau hydrographique doit être indiqué. Toutes les cellules qui récoltent l'écoulement de X cellules font partie du réseau hydrographique.

4.2.2 L'analyse des réseaux MNT

4.2.2.1 La comparaison quantitative des réseaux MNT avec la référence IGN

Cette première analyse est la même que pour les réseaux QB. Elle a pour but de déterminer le *seuil bas*, seuil pour lequel la longueur totale du réseau hydrographique du réseau MNT est supérieure à celle de la référence IGN. A l'opposé, le *seuil haut*³⁸ correspond à la surface amont drainée nécessaire pour avoir une localisation précise du commencement des drains sur le versant. Autrement dit, c'est le seuil à partir duquel la longueur des drains devient aberrante.

L'analyse porte sur trois longueurs en fonction de la référence IGN :

- la partie commune entre le réseau MNT et la référence IGN,
- la partie en moins (référence IGN – partie commune),
- la partie en plus (réseau MNT – partie commune).

Trois seuils de zone tampon (buffer) ont été appliqués sur la référence IGN (5, 10, 20 mètres).

Deux variables sont analysées : la taille du buffer et le seuil de pixels drainant. Plus la taille du buffer est grande, plus la partie en commun est grande aussi. Plus le seuil de pixels drainant est faible, plus la superficie totale drainée est importante.

Les parties en plus et en moins sont égales pour un réseau MNT_15 (avec un seuil de pixels drainant de 15³⁹) soit 0,94 ha⁴⁰, quelque soit la taille du buffer utilisé (cf ovale en pointillé vert, figure 22). Cette surface seuil de 1 ha a été retrouvée par Adam (1996) sur les sous-bassins du Réal Collobrier⁴¹. Au-delà de cette limite, la partie en moins est supérieure à celle en plus, ce qui ne présente donc plus d'intérêts car le but recherché est d'avoir un gain d'informations.

³⁸ Montgomery et Dietrich (1988) le dénomme "surface drainée critique".

³⁹ Ce point est déterminé :

- en traçant les pourcentages en moins et en plus en fonction de la surface drainée,
- en regardant l'intersection des deux courbes pour chaque buffer.

⁴⁰ La taille du pixel étant de 25 m, la surface drainée est obtenue en multipliant le nombre de pixels drainant par 25².

⁴¹ Les onze sous-bassins versants du Réal Collobrier ont une surface qui varie de 0.7 à 70,2 km².

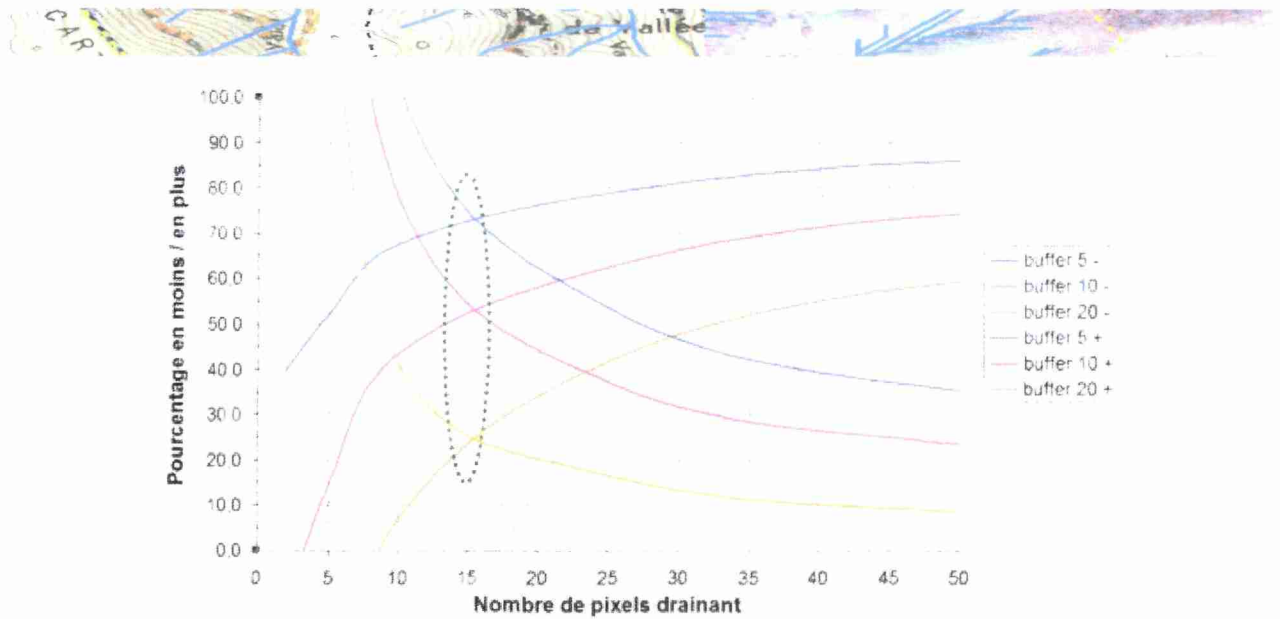


Figure 22 : Pourcentage de la partie en moins / en plus des réseaux MNT en fonction du nombre de pixels drainant

La longueur totale du réseau MNT s'approche au mieux de la référence IGN pour un seuil de 15 pixels (soit 0,94 ha). Avec un buffer de 20 m appliqué sur la référence IGN, la longueur commune serait égale pour un réseau MNT_8 soit 0,50 ha, et avec un buffer de 10 m, pour un réseau MNT_3 soit 0,19 ha. En revanche, avec un buffer de 5 m, la longueur totale de la référence IGN n'est pas dépassée (figure 23).

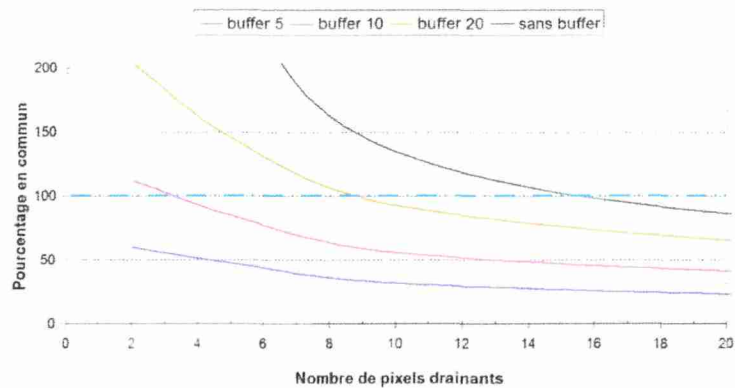


Figure 23 : Pourcentage de la longueur commune entre les réseaux MNT avec la référence IGN en fonction du nombre de pixels drainant

Le nombre total de branches de la référence IGN est approché pour un réseau MNT_23, soit 1,44 ha (figure 24). Ce seuil est vérifié en regardant le nombre de branches par ordre de Strahler. Pour les seuils inférieurs, la *magnitude* du réseau MNT est égale à 5 selon la classification de Strahler (annexe D-3).

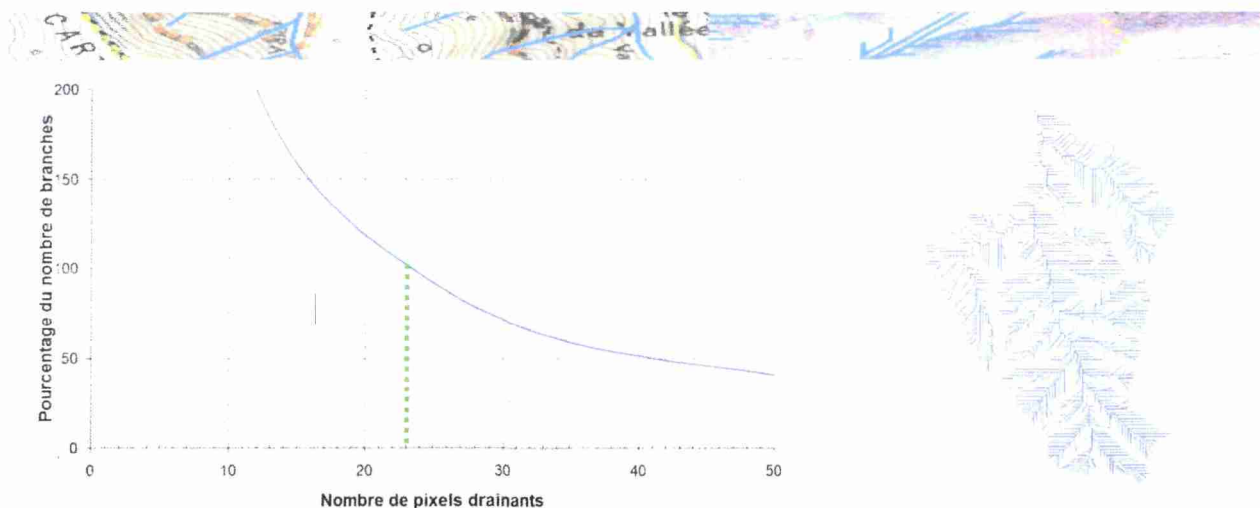


Figure 24 : Pourcentage du nombre de branches d'un réseau MNT en fonction du nombre de pixels drainant

Figure 25 : Réseau MNT_2

Il semble donc que la longueur totale soit plus intéressante comme critère car son seuil est inférieur à celui du nombre de branches. Cependant, le but étant d'avoir un réseau hydrographique plus détaillé que la référence IGN, le seuil de 15 pixels drainant n'est pas suffisant. Il faut en choisir un inférieur, tout en restant cohérent. Or ce choix arbitraire d'un seuil haut (Sh) unique peut être une gêne pour l'étude de l'amont des bassins versants, puisque le tracé calculé s'éloigne du tracé réel. Le chevelu s'étoffe quand Sh diminue (figure 25), jusqu'à remplir tout le bassin versant quand $Sh=0$. En conséquence la notion de "rivière" est incertaine donc également celle de "distance à la rivière". Pour s'affranchir de ces questions sur la véracité du réseau MNT, Puech (2000) fait état des techniques qui existent. Elles se regroupent selon deux axes de recherche avec chacun leurs avantages et leurs inconvénients. Le premier axe est de conserver au mieux la précision initiale sans altérer le fichier des altitudes, le MNT. Le second, à défaut d'être conservateur, est de modifier directement le fichier des altitudes MNA avec des algorithmes de type bouche-trous (étape 1 des tâches préliminaires), puis par incrustation d'un réseau hydrographique d'origine externe au MNT. Dans tous les cas, pour définir une solution correcte, il faut revenir aux questions de fond : qu'est ce qu'un réseau ? Où commence t-il ? [Montgomery et Dietrich, 1988].

4.2.2.2 La comparaison qualitative des réseaux MNT deux à deux

L'analyse visuelle des réseaux MNT révèle que les tronçons se superposent de façon satisfaisante avec le cours d'eau principal et ses deux affluents de la référence IGN. Les écarts constatés sont de l'ordre de la vingtaine de mètres tout au long des branches principales du réseau hydrographique (cf ovale en pointillé rose, figure 26). En revanche, pour la connexion des ravines majeures⁴² avec ce dernier, des décalages sont décelés pouvant aller jusqu'à 130 m (cf cercle en pointillé vert, figure 26).

En superposant deux réseaux MNT, il apparaît aussi un décalage analogue à celui constaté pour les branches principales, de l'ordre de la quinzaine de mètres (cf ovale en pointillé orange, figure 27).

⁴² Compte tenu du nombre de pixels considérés dans la figure, l'hypothèse est faite que les tronçons du réseau MNT_100 correspondent à des ravines majeures.

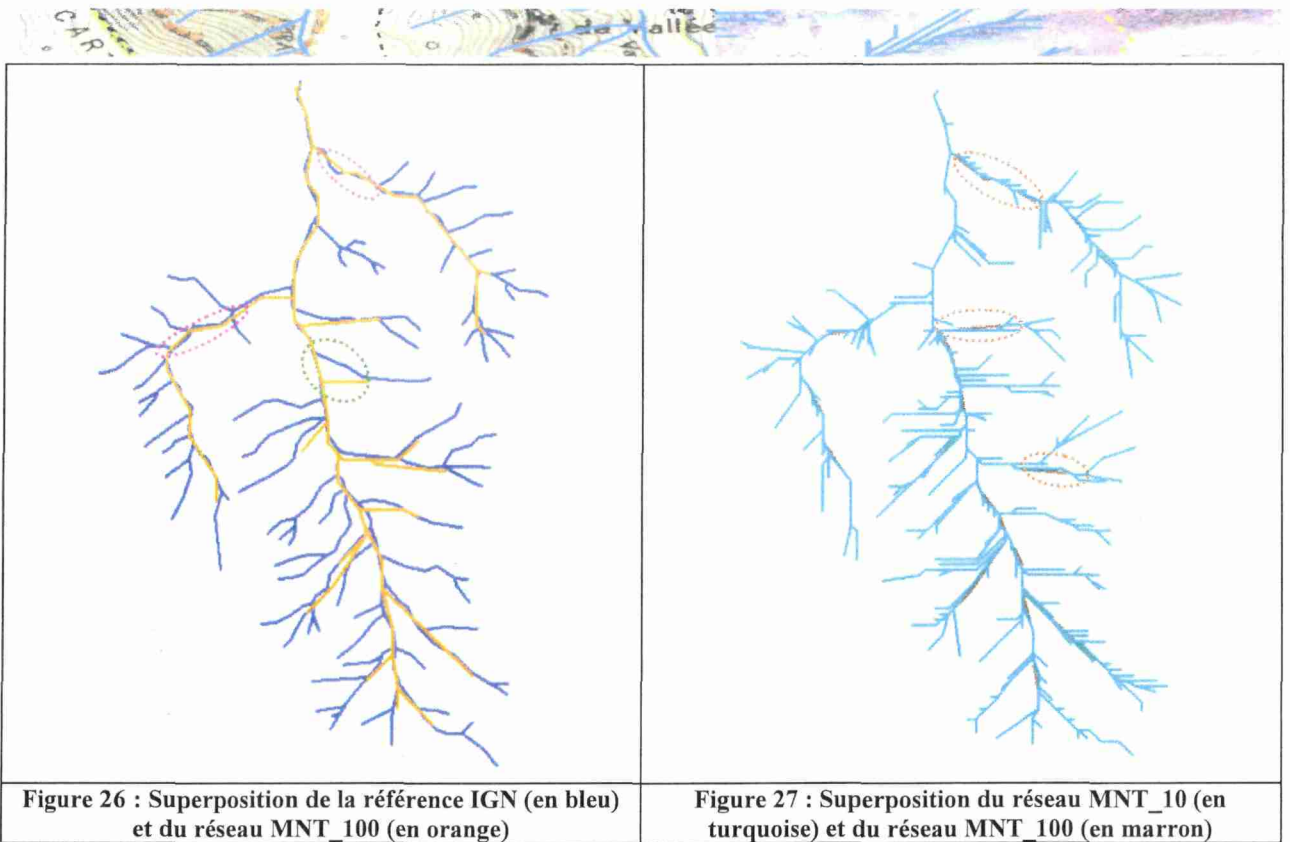


Figure 26 : Superposition de la référence IGN (en bleu) et du réseau MNT_100 (en orange)

Figure 27 : Superposition du réseau MNT_10 (en turquoise) et du réseau MNT_100 (en marron)

Quantitativement, le seuil bas déterminé est de 15 pixels drainant (soit 0,94 ha). Or la comparaison du réseau MNT_10 avec la référence IGN révèle qu'un seuil bas de 10 pixels drainant (soit 0,63 ha) n'est pas suffisant pour reproduire la référence IGN (cf ovale rose, figure 28).

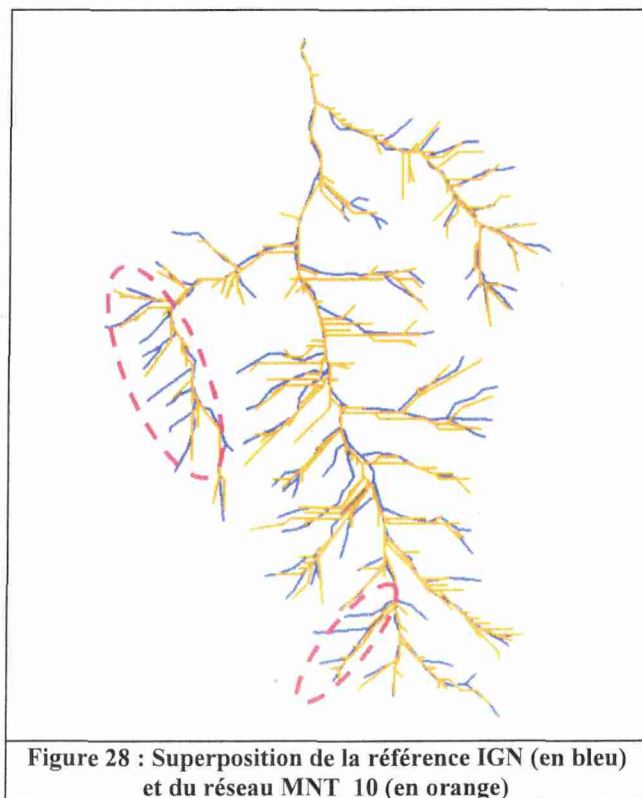


Figure 28 : Superposition de la référence IGN (en bleu) et du réseau MNT_10 (en orange)



4.2.3 Discussions et perspectives

Les réseaux MNT ont l'avantage de pouvoir définir un réseau hydrographique sur l'ensemble du bassin versant. Au-delà d'un seuil bas, le réseau MNT devient plus important que la référence IGN. Le chevelu des réseaux MNT est très développé pour de petites surfaces drainées. Il reste donc à contraindre ce chevelu par un seuil haut, qui correspondrait, en théorie, aux zones d'apparition des écoulements concentrés à la surface du sol. Cependant, il est difficile de déterminer ce seuil haut sans passer par une approche terrain.

Très peu d'études de terrain ont été effectuées afin de savoir quelles étaient les variables définissant le démarrage des drains. Montgomery et Dietrich (1988) ont mis en évidence une corrélation entre la surface drainée et la pente locale sur les points sources de trois bassins versants expérimentaux. En mesurant ces deux variables topographiques à l'amont et à l'aval des points sources et en les représentant dans un graphe où la surface drainée est une fonction de la pente, ils ont obtenu deux populations de points de part et d'autre d'une courbe définie par les points sources. Cette courbe serait donc une transition de l'état de versant à l'état de drain. D'après leur étude, ce seraient des variables topographiques qui contrôlèrent le début de l'écoulement. Ils obtiennent ce qu'ils appellent une surface drainée critique (seuil haut) qui correspond aux points source [Adam, 1996].

Néanmoins, deux cas de figure peuvent se présenter et ne pas donner des résultats si nets [Kirkby, 1988] :

- soit le début de l'écoulement provient d'un effondrement local et dans ce cas, le début de l'écoulement est facilement repérable géographiquement.
- soit le début d'écoulement commence sous la forme de surfaces saturées diffuses. Dans ce cas, il est impossible de définir un point ponctuel comme début d'écoulement.

Face à cette vision très simpliste, Crave (1995) pense que l'état hydrique du sol est un facteur important dans la détermination du début d'écoulement. Ainsi, la pédologie, la végétation ou la rugosité du sol sont autant de pouvoir de diffusion de l'écoulement. L'échelle étant pour lui également très importante, il propose, pour bien comprendre l'évolution dans le temps et dans l'espace du réseau, un suivi de celui-ci à l'échelle d'un versant pendant et entre chaque précipitation.

A ces fins, Adam (1996) a privilégié une approche terrain. Il met en évidence une instabilité du seuil haut tant d'un bassin à l'autre qu'à l'intérieur d'un même bassin. Sur la carte IGN 1:25000^{ème}, le seuil haut varie de 0,75 ha à 2,5 ha et sur les données de terrain, de 1 ha à 10 ha.

Dans le cadre de l'étude, la recherche du seuil haut fait l'objet des paragraphes suivants.

4.3 La confrontation aux données terrain

Comme il vient de l'être souligné, pour aller plus loin dans la connaissance du réseau hydrographique, il est nécessaire d'aller sur le terrain. Cette phase expérimentale nécessite d'être réfléchie, préparée. Quels critères permettraient d'améliorer ce savoir sur le réseau hydrographique ? Afin d'être efficace dans la collecte des données terrain, un protocole est mis en place pour chaque point, ce qui facilite la construction de la BD ravines et l'analyse spatiale des données par la suite. Après avoir été exposé, une comparaison sera faite avec les autres réseaux avant de présenter la création de la référence terrain.

4.3.1 Le protocole expérimental utilisé pour l'observation des chemins de l'eau

4.3.1.1 La mise en situation du protocole expérimental

La présence d'une piste DFCI parcourant le bassin versant du Cartaou et recoupant une multitude de ravines en facilite l'accessibilité.



Plusieurs instruments sont utilisés pour la collecte des données sur le terrain. Pour la localisation dans l'espace, un GPS Trumble a été utilisé. Pour chaque relevé ponctuel, cinq à six enregistrements sont pris pour réduire les erreurs de positionnement. La mesure volumétrique du débit s'est faite avec des récipients de différents volumes et un chronomètre, voire une gouttière pour concentrer l'eau. Le temps mis pour remplir le volume est noté. La largeur et la profondeur ont été mesurées soit avec un mètre, soit avec un laser et une mire. Des photos amont aval de la ravine ont aussi été prises. Pour le reste des critères, ils ont été évalués visuellement par une même personne. Par conséquent, la classification peut évoluer surtout pour les indices de morphologie et de ravine où une notion d'échelle d'observation est liée. Si la personne se trouve dans une ravine d'une vingtaine de mètres de large, son appréciation sera différente de celle qu'elle aurait pu faire si elle avait été au bord de la ravine.

Cette partie enrichissante pour l'étude a mobilisé trois personnes en moyenne pendant une journée à chaque fois. A titre indicatif, le temps moyen mis pour les mesures et la prise de note est de l'ordre de 5 à 10 minutes par point. Il comprend le temps du trajet pour aller au point suivant. Ce temps moyen peut être un indicateur de la faisabilité des prochaines campagnes de mesures sur le terrain. Dans le cas de l'étude, ce "faible" temps moyen peut être aussi un indicateur de la forte densité hydrographique du bassin versant. Si le trajet entre deux points successifs est court, cela révèle la présence de nombreux drains dans l'espace.

Des traces de ruissellement et d'érosion de l'évènement météorologique d'octobre 2006 ont été observées. Cet épisode est détaillé à l'annexe E-3.

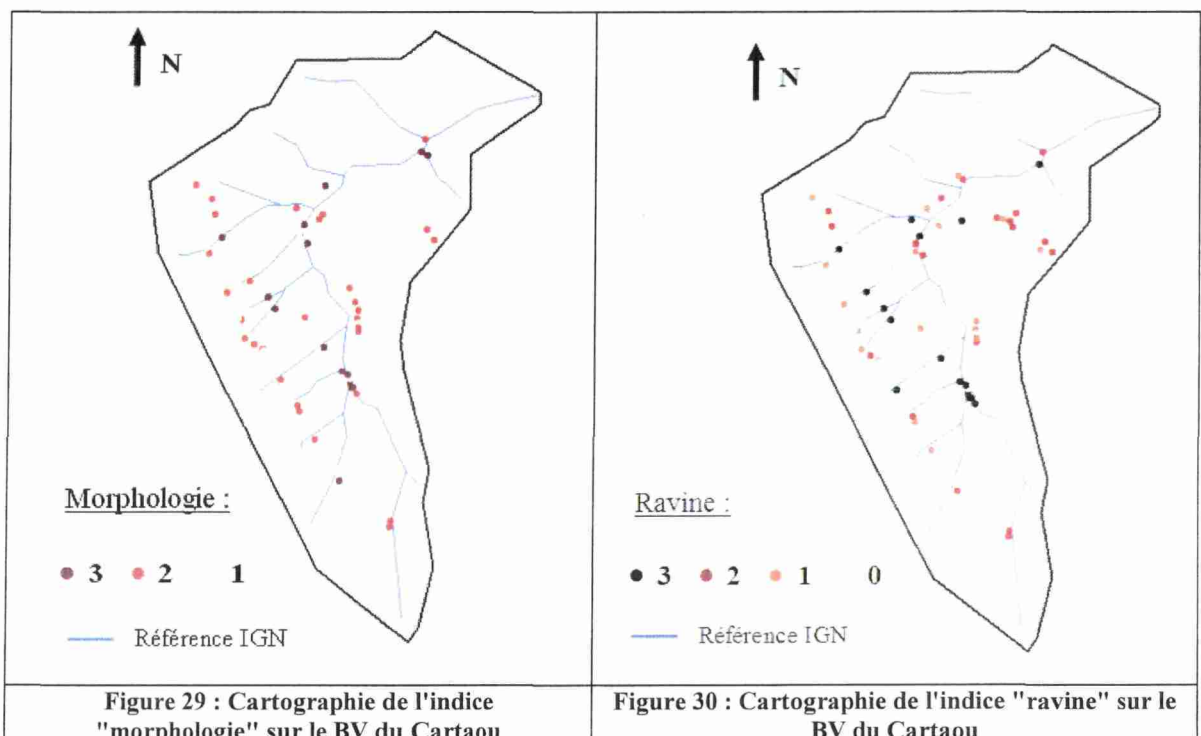
Sur deux campagnes de mesure, soixante dix huit points ont été étudiés. Les données recueillies ont été répertoriées dans la BD ravines qui reprend les différentes rubriques du protocole expérimental.

4.3.1.2 L'analyse spatiale des données de la BD ravines

Grâce au GPS, les coordonnées XY des points sont connues, ce qui permet une analyse spatiale des données recueillies sur le terrain. Trois indices vont être étudiés afin de voir leur évolution spatiale dans le bassin versant : "morphologie", "ravine" et "hydrologie".

4.3.1.2.1 *Les indices "morphologie" et "ravine"*

Il apparaît que 80% des drains ont un indice "morphologie" égal ou supérieur à 2 (figure 29). Cela prouve que le relief est bien marqué et que les eaux peuvent se concentrer rapidement en surface.





En analysant l'indice "ravine" (figure 30), des différences paraissent avec la figure 29. Le réseau hydrographique peut être bien incrusté dans le sol à une échelle locale (indice "ravine" égal à 2 ou 3), alors que le relief est faiblement marqué (indice "morphologie" égal à 1). Et inversement, à l'échelle d'une cinquantaine de mètres, le relief peut être prononcé et le fond de la ravine plate. Il n'y a pas forcément de cause à effet. Cependant, sur le BV du Cartaou, dans la majorité des cas, les deux sont liés (si l'un est élevé, l'autre aussi).

4.3.1.2.2 L'indice "hydrologie"

Grâce à cet indice, il est possible de suivre l'évolution spatiale du réseau hydrographique pérenne pour une date. En multipliant les sorties sur le terrain, il est possible d'ajouter une composante temporelle à l'analyse.

Lors de la sortie du 14 février 2007, il a été constaté que les ¾ des points relevés sont à sec (figure 31). Il semble donc que le réseau hydrographique est dans une phase de basses eaux.

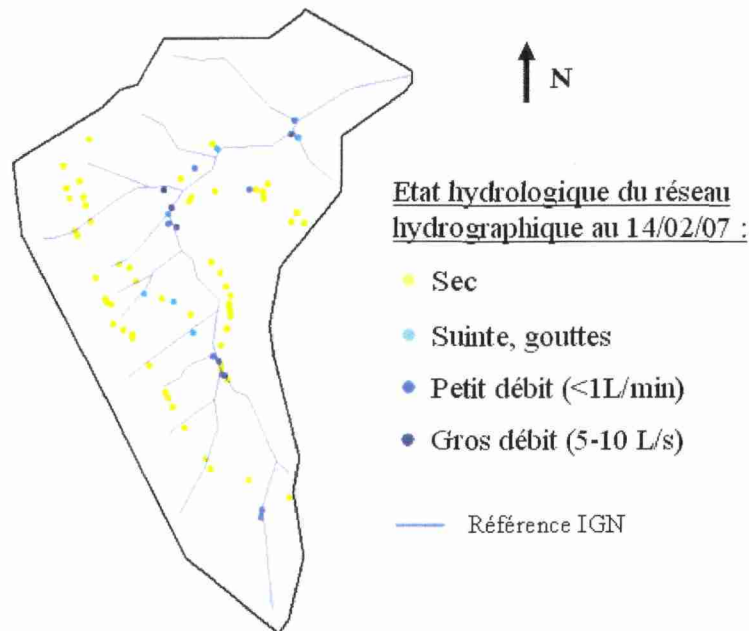


Figure 31 : Cartographie de l'indice "hydrologie" sur le BV du Cartaou

4.3.1.3 Le bilan sur le protocole expérimental

Ce protocole expérimental a été éprouvé et affiné au cours des campagnes de mesures. Il a été conçu dans un esprit de tirer les bénéfices de chaque sortie, tout en étant le garant des tâches effectuées auparavant afin de pouvoir comparer les données entre elles.

4.3.1.3.1 Les limites

Une limite évidente est le problème de l'accessibilité. Dans le cas de l'étude, la zone a été délibérément choisie pour la présence de la piste DFCI. Ce protocole expérimental a donc été éprouvé dans des conditions privilégiées. Il serait bon de mener de nouvelles campagnes dans des bassins versants non aménagés où le relief est pentu, où la végétation est dense (ronces, ...).

Un autre inconvénient est que la classification est sujette à l'appréciation d'une seule personne. En effet, lorsqu'il est question d'échelle d'observation pour les critères de "morphologie" et de "ravine", il peut y avoir des divergences. Par conséquent, cette classification n'est pas robuste. La codification des indices dépend de l'opérateur.

Si pour la codification des indices, le nombre croissant de personnes mobilisées peut être la source d'une multitude d'interprétations, donc de débats, en revanche, pour le reste, cela peut s'avérer très intéressant. Les campagnes de mesures exécutées avec un nombre variable de personnes (2 à 4)



laissent présager que dans une optique d'efficacité et de rendement⁴³, le nombre optimum est 4. Or pour des raisons réelles de disponibilité, cela n'est pas toujours possible. Dans le cas où la zone à couvrir est étendue, faut-il privilégier le coût humain en envoyant deux personnes ou alors la rapidité d'exécution avec quatre personnes ?

La batterie du GPS Trumble, utilisé majoritairement, a une autonomie d'environ 5h30. Cette limite technique a été un des paramètres restrictifs pour le champ d'investigations sur le terrain.

La qualité des données dépend de la précision des instruments utilisés pour la collecte des informations. Cela a pu être mis en évidence pour la mesure des sections des drains avec l'emploi d'un laser et d'une mire ou d'un mètre. C'est encore plus vrai pour la localisation des drains avec les GPS. Le GPS Trumble est récent. En mode autonome⁴⁴, il offre une précision de 10 mètres. Deux autres GPS Garmin, plus anciens, ont été utilisés pour pallier aux faiblesses de la batterie du premier. Des résultats comparatifs entre les points des GPS Trumble et Garmin révèlent des écarts de l'ordre de la cinquantaine de mètres.

Pour terminer avec les GPS, la précision de la position enregistrée pour chaque point dépend notamment du relief et du couvert végétal. En effet, en fond de thalweg, avec une fermeture totale du couvert végétale, la communication avec la constellation des satellites est parasitée, ce qui empêche l'enregistrement précis de la position. C'est pour cela que cinq-six enregistrements sont préconisés au minimum.

4.3.1.3.2 *Les perspectives*

Ce protocole a été expérimenté sur un autre petit bassin versant du bassin d'Anduze, qui fait l'objet de travaux de recherche par les deux équipes encadrantes de l'étude : le bassin versant de Tourgueille⁴⁵. Une piste DFCI serpente également le bassin versant. Grâce aux caractéristiques différentes entre les deux bassins versants, ce protocole s'est enrichi et standardisé afin d'être applicable sur d'autres sites. C'est aussi sur la base des mesures de largeur et de profondeur de ce site que la classification des ravines suivant le rapport profondeur/largeur a été faite. Une trentaine de données ont été utilisées pour réaliser cette classification (tableau 4).

Ravine	Profondeur / Largeur
0	0 à 0,09
1	0,1 à 0,22
⊕ 2	0,23 à 0,35
3	0,36<

Tableau 4 : Classification proposée pour l'indice "ravine"

Par exemple, l'indice "ravine" est égal à 0 lorsque la profondeur de la ravine est dix fois plus petite, au maximum, que la largeur.

Faute de données, les bornes des classes n'ont pu être éprouvées. Cependant, cette classification pourrait représenter une solution complémentaire, voire une alternative aux problèmes liés à l'interprétation de l'indice "ravine". D'une part, en cas de litige, la mesure de la largeur et de la profondeur pourrait définitivement lever toute ambiguïté sur la codification de la ravine. D'autre part, dans le cas où les bornes sont bien définies, la mesure physique ne serait plus forcément légitime, d'où un gain de temps.

⁴³ Recueillir le maximum de données sur la plus grande superficie possible en une seule journée.

⁴⁴ En mode autonome, le GPS fonctionne avec une constellation de satellites. A l'inverse, en mode différentiel, il communique avec une borne qui corrige les erreurs de position avec une précision pouvant être centimétrique.

⁴⁵ Ce bassin versant est présenté de façon détaillée dans [Ayrat, 2005].



4.3.2 La comparaison avec les autres données

La précision du GPS Trumble offre la possibilité de considérer les relevés GPS comme référence, c'est-à-dire qu'ils sont censés caractériser le plus précisément le réseau hydrographique réel. Chaque type de réseaux va être comparé aux données de la BD ravines.

4.3.2.1 Avec la référence IGN

En les comparant avec la référence IGN, il apparaît que la BD ravines ne passe pas par l'ensemble des points relevés sur le terrain. En revanche, la majorité des points recoupe la référence IGN. Il est à noter quand même pour une ravine majeure un décalage d'une cinquantaine de mètres. Dans ce cas se pose la question si cela vient du GPS ou d'une erreur de l'IGN dans la cartographie du réseau hydrographique.

4.3.2.2 Avec la référence QB

Malgré leur très haute résolution spatiale (60 cm), les images QB sans aucun traitement semblent ne permettre que la détection des ravines les plus marquées morphologiquement (indice "Morphologie" = 2 ou 3). Les ravines bien incisées localement (indice "Ravine" = 2 ou 3) mais faiblement marquées morphologiquement (indice "Morphologie" = 1) ne sont pas détectées. Plusieurs explications sont possibles : la forêt couvre la ravine ; l'environnement immédiat du pixel parasite la réponse spectrale et donc atténue la rupture radiométrique.

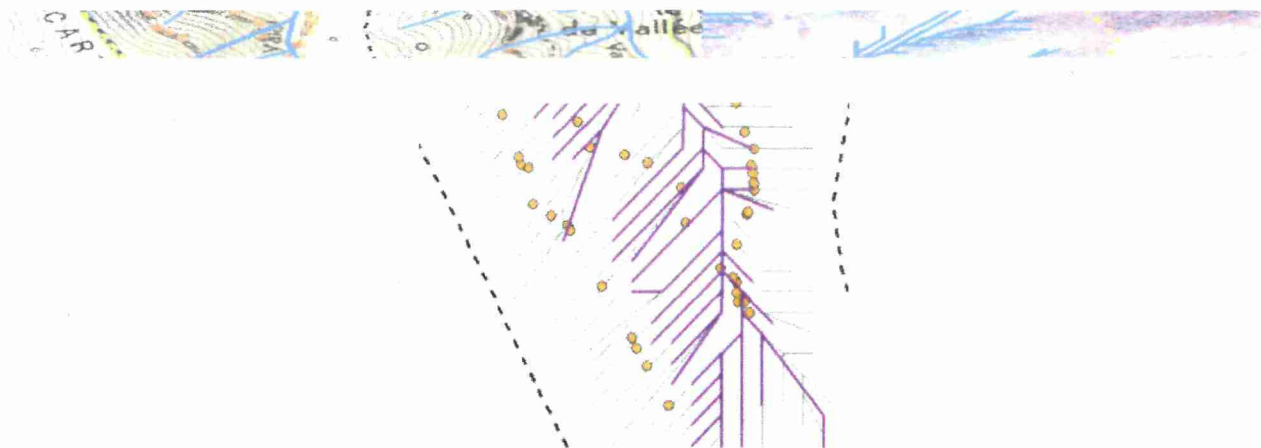
4.3.2.3 Avec les réseaux MNT

Dans le temps, les écoulements à la surface des versants varient en fonction des événements observés : il ne peut donc y avoir un tracé absolu et unique du réseau hydrographique. Dans l'espace les surfaces drainées critiques varient en fonction du contexte géologique et morphologique [Puech, 2000]. Des liens avec le climat, la géologie et la perméabilité sont probables [Crave, 1995]. Dans le cas de l'étude, l'altitude est mise en avant. En fond de thalweg, un réseau MNT_5 suffit pour définir tous les points GPS. En revanche, dans la partie haute des versants, ce seuil n'est pas satisfaisant. Le réseau MNT_2 recoupe tous les points GPS. Cependant, des drains sont rajoutés, le chevelu du réseau hydrographique remonte trop haut. Il est probable qu'un réseau MNT avec un seuil intermédiaire donnerait de meilleurs résultats pour le démarrage des drains. Néanmoins, il resterait toujours le problème des tronçons aberrants.

4.3.3 La création d'une référence terrain

Afin d'exploiter au mieux tous les résultats de cette étude, un dernier réseau a été créé : la référence terrain. Son but est de mettre en valeur toutes les données recueillies jusqu'à présent et de donner un indice de confiance aux nouveaux drains du réseau hydrographique. Les nouveaux drains viennent compléter la référence IGN.

Les points GPS sont considérés comme indiscutables dans le sens où ils traduisent les ravines détectées sur le terrain. Pour tracer les linéaires s'ajoutant au réseau, le réseau MNT_2 (en vert, figure 32) a été utilisé car c'est le seul des réseaux générés qui passe par tous les points GPS.



**Figure 32 : Vue partielle de deux réseaux MNT et des points GPS sur le bassin versant du Cartau
(en violet : réseau MNT_5, en vert : réseau MNT_2, en orange : points GPS)**

Les tronçons du réseau MNT_2 sont redimensionnés, déplacés et/ou supprimés afin de décrire l'ensemble des drains repérés sur le terrain. Localement, la référence terrain a été complétée grâce aux schémas détaillant des zones complexes. Enfin, les tronçons singuliers de la référence QB par rapport à cette référence terrain⁴⁶ ont été ajoutés.

Cette référence terrain regroupe des tronçons avec des degrés différents de certitude. Ce degré de confiance est défini selon les données qui sont utilisées (tableau 5).

Données utilisées	Indice de confiance
IGN + GPS	Très bon
IGN	Bon
GPS + MNT (réel)	Bon
MNT (réel)	Faible
DESSIN	Bon
GPS + MNT (potentiel)	Moyen
MNT (potentiel)	Faible
GPS + QB	Bon
QB	Moyen

Tableau 5 : Indice de confiance des tronçons selon les données utilisées

Lorsque la référence IGN recoupe des points GPS, les tronçons sont considérés comme très bons.

Plusieurs combinaisons de données permettent de qualifier le réseau comme bon :

- les branches de la référence IGN non vérifiées par une mesure ponctuelle,
- les tronçons issus de la combinaison du réseau MNT_2 et des points GPS pour des ravines bien incrustées dans le sol,
- les tronçons restitués à l'aide d'un dessin et de points GPS,
- les tronçons singuliers de la référence QB couplés aux points GPS.

L'indice de confiance moyen correspond :

- aux ravines diffuses repérées par un point GPS et le MNT,
- aux tronçons singuliers de la référence QB par rapport à la référence terrain.

Parcourir chaque branche du réseau en entier semble difficilement concevable. Par conséquent, lorsque la vision de la ravine n'est plus possible in-situ, la structure du réseau hydrographique est déduite du réseau MNT_2. Ces tronçons hypothétiques sont alors classés avec un indice de confiance faible.

La carte résultante de cette classification du réseau hydrographique est l'objet de la figure suivante.

⁴⁶ C'est-à-dire les tronçons des images QB qui ne sont pas déjà représentés sur la référence terrain.

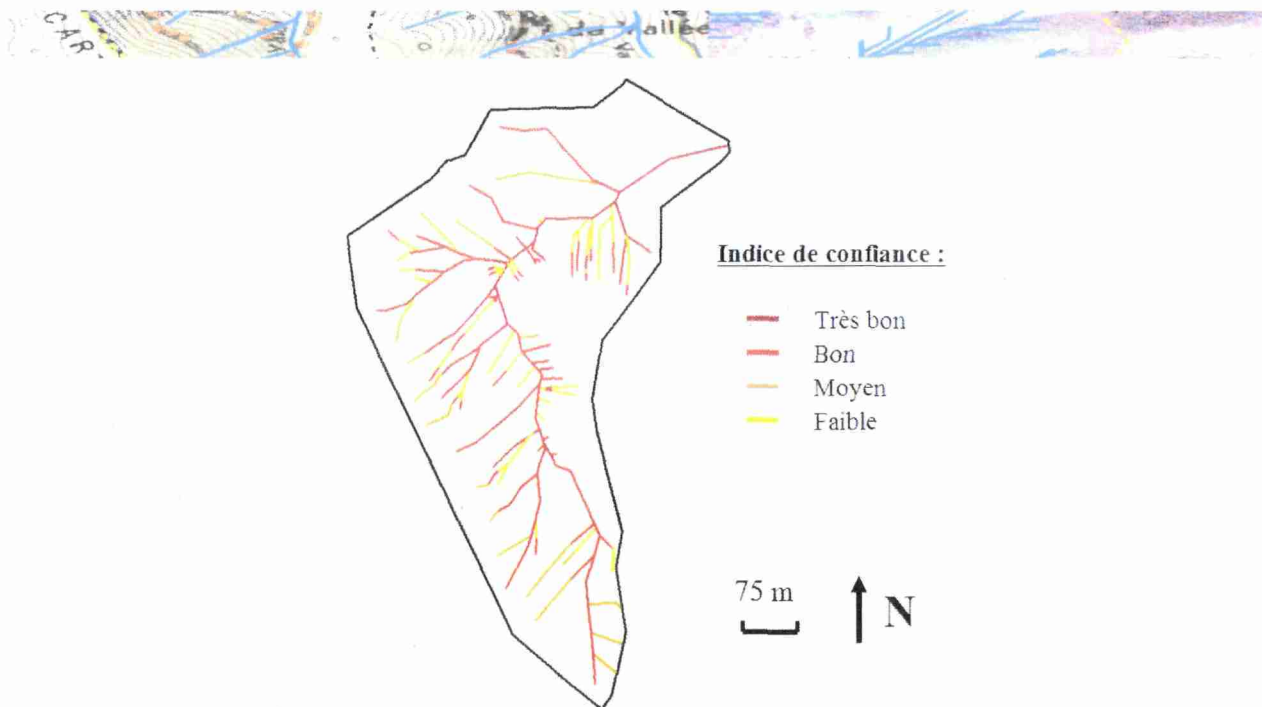


Figure 33 : Cartographie du réseau hydrographique du BV du Valescure en fonction de l'indice de confiance

4.3.4 Discussions sur la référence terrain

Le réseau hydrographique de la référence terrain est plus développé que ceux de la référence IGN (figure 34) et de la référence QB (figure 35). De part sa construction, la référence terrain diffère de la référence QB lorsque la densité hydrographique augmente. Ces écarts correspondent aux différences qui peuvent exister entre les réseaux QB et MNT (cf ovale orange, figure 35).

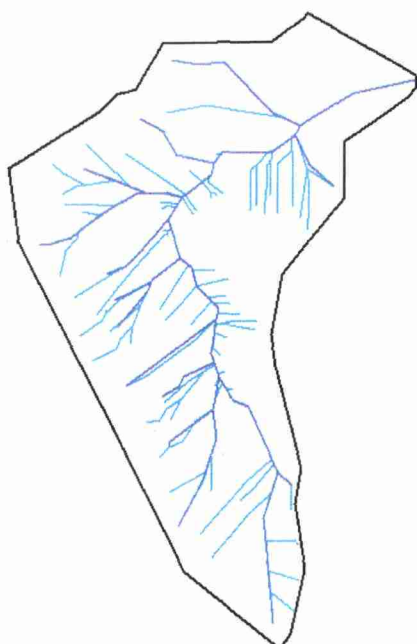


Figure 34 : Comparaison de la référence IGN (bleu) avec la référence terrain (bleu ciel)

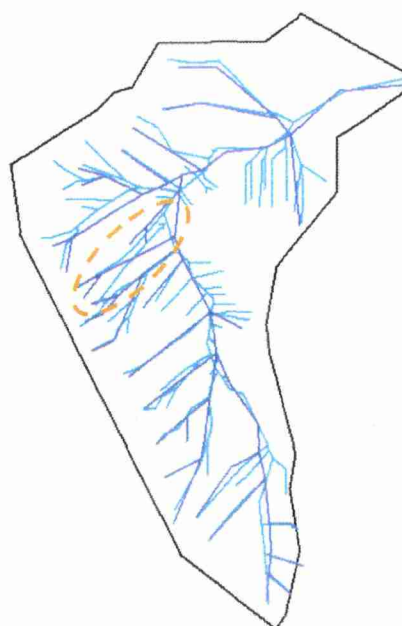


Figure 35 : Comparaison de la référence QB (bleu) avec la référence terrain (bleu ciel)



La densification importante des drains élémentaires⁴⁷ des réseaux MNT pour de faibles seuils de surface drainée rend difficile l'identification du réseau hydrographique. Dans les zones planes, le chevelu du réseau hydrographique a tendance à s'étendre (figures 36 et 37).

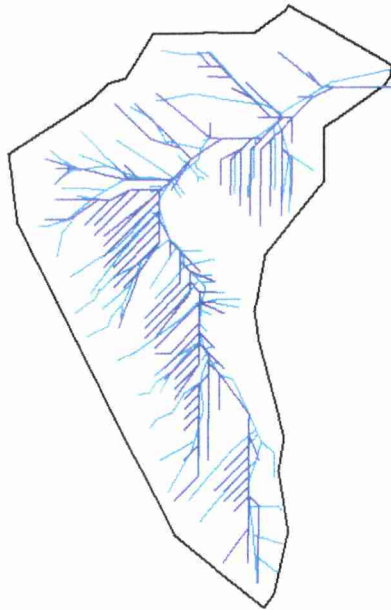


Figure 36 : Comparaison du réseau MNT_5 (bleu) avec la référence terrain (bleu ciel)

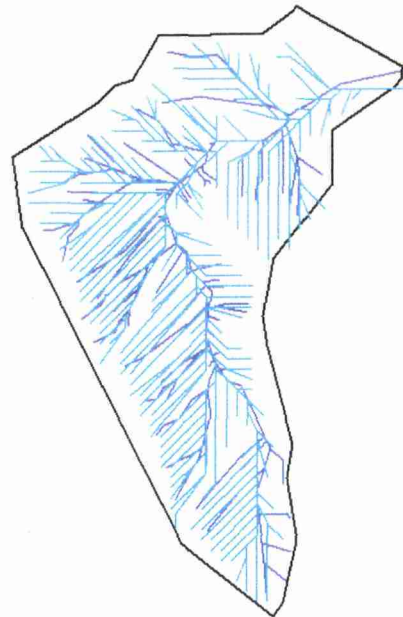


Figure 37 : Comparaison du réseau MNT_2 (bleu ciel) avec la référence terrain (bleu)

Or selon les données de la BD ravines (figures 29 et 30), le réseau hydrographique est incrusté localement dans le sol. Par conséquent, les réseaux MNT seuls ne permettent pas de définir précisément le réseau hydrographique dans les zones où le relief est faiblement accentué.

Cette référence terrain est tributaire des données de terrain. Plus il y a de repérages *in-situ* du réseau hydrographique, meilleure en sera sa connaissance. Cependant, ce n'est pas parce que il y a un grand nombre de relevés que la cartographie du réseau hydrographique sera plus précise. Plusieurs chemins peuvent être envisageables pour relier deux points entre eux. Suivant les données utilisées, il peut y avoir des modifications de la hiérarchie du réseau hydrographique pour les zones denses (cf ovale orange, figure 35).

⁴⁷ Ce sont les drains qui sont classés ordre 1 selon la classification de Strahler.



5 La synthèse et les perspectives

True genius resides in the capacity for evaluation of uncertain, hazardous, and conflicting information.

Winston Churchill.

Au cours de cette étude, plusieurs méthodes ont été examinées pour définir le réseau hydrographique. Une synthèse des résultats obtenus va être réalisée, suivie de quelques perspectives pour les travaux de recherche qui seront menés ultérieurement. Pour finir, une petite réflexion est proposée pour le suivi des écoulements dans les ravines.

5.1	La synthèse de l'étude.....	47
5.2	Les perspectives de cette étude	48
5.3	La méthodologie proposée permettant le suivi des ravines	49

5.1 La synthèse de l'étude

Toutes les méthodes examinées dans cette étude apportent un gain d'informations par rapport à la référence IGN. Les réseaux QB et MNT permettent rapidement d'obtenir des gains au niveau des densités hydrographique et de drainage sur l'ensemble du bassin versant de Valescure (tableau 6).

Cours d'eau	Référence IGN	Référence QB	Réseau MNT_5	Réseau MNT_2	Référence terrain
Longueur réseau Cartaou (km)	4,45	6,77	11,44	23,17	9,88
Nombre de tronçons	27	56	147	276	175
Densité de drainage (km/km ²)	6,53	9,92	16,77	33,96	14,48
Densité hydrographique (km ⁻²)	39,57	82,07	215,44	404,50	256,48
Longueur réseau Valescure (km)	24,22	39,40	67,62	131,75	
Nombre tronçons Valescure	139	307	865	1622	
% Longueur Cartaou / BV	18	17	17	18	
% Nb tronçons Cartaou / BV	19	18	17	17	

Tableau 6 : Comparaison des différents réseaux

Cependant, des écarts assez conséquents sont mis en avant entre les deux méthodes. Il est donc difficile de définir lequel des réseaux se rapproche de la réalité. La référence QB semble minorer l'extension du réseau hydrographique alors qu'à l'opposé, les réseaux MNT ont tendance à la majorer. Grâce à ces derniers, la longueur totale peut être approchée sans pour autant que le réseau hydrographique corresponde. C'est pour cela que l'analyse qualitative est nécessaire, afin de s'assurer que les réseaux se superposent et que les drains commencent au même endroit.



La référence terrain alliant les deux types de réseaux précédents (QB et MNT) aux données de terrain, se situe entre les deux au niveau de la longueur du réseau. La localisation exacte des tronçons, ainsi que leur raccordement entre eux, ne sont pas garantis. Ne pouvant parcourir le réseau dans sa globalité, le réseau hydrographique a été estimé à partir des données disponibles, ce qui laisse place à quelques déductions. Il est donc difficile de conclure que la référence terrain est la meilleure représentation du réseau hydrographique réel du bassin versant du Cartaou, même si elle est fondée sur des relevés de terrain.

Enfin, quelque soit la méthode utilisée, la proportion du réseau hydrographique du sous-bassin versant du Cartaou (18%) par rapport à l'ensemble de la Vallée Obscure reste constante. Par conséquent, il semble que les méthodes utilisées sont équivalentes, elles ne favorisent pas l'apparition de nouveaux drains sur une partie du bassin versant. Pour la référence terrain, le pourcentage n'a pas pu être évalué car il aurait fallu étendre la référence terrain à l'ensemble du bassin versant du Valescure. Il est juste à noter qu'il dépendra en partie de l'importance de la phase terrain (nombre de relevés effectués).

5.2 Les perspectives de cette étude

Tout d'abord, il serait intéressant de reproduire cette étude sur un autre bassin versant de recherche expérimentale pour évaluer sa robustesse⁴⁸, ou de l'étendre à une zone plus vaste, comme le bassin versant d'Anduze, afin de déterminer ses limites d'applications.

La photo-interprétation des images QB est basée sur la capacité cognitive du cerveau humain à combiner deux critères, une rupture radiométrique linéaire avec le relief⁴⁹. Le développement d'un algorithme tenant compte de ces deux critères permettrait d'éliminer quelques tracés. A ce moment-là, les mesures de terrain auraient pour seul but de vérifier les résultats.

Toute la partie sur les traitements d'images et les classifications n'a pas été abordée dans cette étude. Il serait judicieux, avec ces images QB à THRS, d'estimer le potentiel des logiciels informatiques ou des algorithmes pour extraire le réseau hydrographique.

Dans le cas où la largeur des ruptures radiométriques correspond à celle de la morphologie⁵⁰, une perspective serait de classer directement les tronçons d'un réseau QB suivant l'indice "ravine". Même chose pour les réseaux MNT si le pas du MNT est de l'ordre métrique. Si cela s'avère concluant, l'étude des bassins non jaugés en serait enrichie. Les campagnes de mesures sur le terrain se réduiraient à une phase de contrôle.

Prochainement, un MNT lidar devrait être disponible pour le Gardon d'Anduze. Il serait intéressant de comparer les réseaux générés au cours de cette étude au MNT lidar afin d'évaluer son potentiel pour la représentation fine du réseau hydrographique. Le remplacement du MNT raster par le MNT lidar devrait permettre d'attribuer un indice de confiance plus élevé aux tronçons déduits par le réseau MNT pour la référence terrain compte tenu de sa précision.

Les réseaux TIN n'ont pas été étudiés au cours de cette étude. Or ils semblent prometteurs pour la détermination du réseau hydrographique. Par conséquent, il serait bien de reprendre cette étude en utilisant ces réseaux TIN.

⁴⁸ Capacité d'une méthode à donner des résultats répétables malgré de faibles variations du mode opératoire ou de l'environnement.

⁴⁹ Le relief permet d'éliminer les ruptures radiométriques non linéaires, ne correspondant pas à un drain potentiel.

⁵⁰ Largeur de la forme de la ravine, de l'ordre décimétrique



Dans la continuité de l'apprentissage de la connaissance des chemins de l'eau, la modélisation hydrologique semble l'étape suivante. En quoi cette meilleure connaissance du réseau hydrographique peut-elle être intéressante pour la modélisation pluie-débit ?

La collecte de toutes ces données sur le terrain a conduit à l'élaboration de la BD ravines. Ainsi, les données peuvent être spatialisées via un logiciel SIG. Dans le même esprit, une fiche caractéristique par ravines a été créée au format html (annexe E-2). De cette façon, il sera possible de savoir ce qui a été réalisé sur cette ravine et ce qu'il faudra faire lors de la prochaine visite. Elles pourront, en outre, peut être servir à coordonner les campagnes de mesures sur le terrain des différents partenaires de recherche en attendant, un jour, la mise en place d'un SIG sur le bassin versant d'Anduze par exemple.

5.3 La méthodologie proposée permettant le suivi des ravines

Ce travail de recherche a permis une caractérisation du réseau hydrographique jusqu'aux ravines élémentaires. Afin de vérifier si elles coulent lors des épisodes cévenols, l'étape suivante serait d'équiper le bassin versant pour suivre la mise en eau de ces ravines. Quelques idées sont avancées à ce sujet afin de passer du drain potentiel (morphologie du relief favorable à la concentration des écoulements en surface) au drain réel.

Des instruments existent sur le marché pour mesurer la hauteur atteinte par les eaux. Parmi eux, il y a les échelles limnimétriques (figure 38). Compte tenu de leur coût, elles sont installées où l'écoulement est avéré. Il est donc envisageable de les placer dans les branches principales du réseau hydrographique, en fond de thalweg.

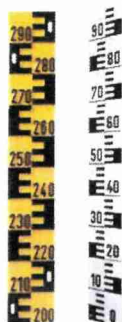


Figure 38 : Une échelle limnimétrique [OTT]



Figure 39 : Une échelle à maximum [OTT]

Pour détecter un hypothétique ruissellement sur les versants, l'objectif est de multiplier au maximum les points de mesures sur le bassin versant, donc recourir à une instrumentation à bas coût, comme les échelles à maximum. Elles servent à enregistrer le niveau d'eau maximum dans les endroits inaccessibles. Elles sont utilisées, par exemple, dans les zones d'inondation des rivières. Celle de la figure 39 possède un ruban encreur autocollant transparent qui se décolore avec l'eau. Ainsi une ligne de démarcation très nette indique le niveau d'eau maximum⁵¹.

Un autre type d'échelles à maximum, plus rudimentaire, peut être utilisé comme les échelles "à bouteille" (figure 40). Plusieurs flacons percés en plastiques se superposent. L'eau vient remplir ces flacons au fur et à mesure de sa montée.

⁵¹ Le remplacement du ruban s'effectue de manière simple en desserrant la vis supérieure à tête cylindrique.

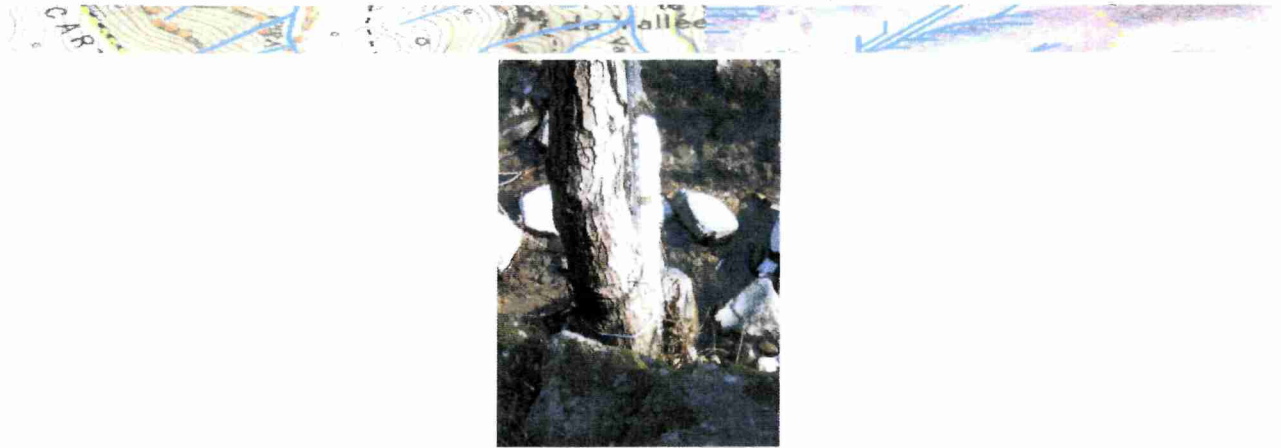


Figure 40 : Une échelle "à bouteille" de l'UMR ESPACE installée sur le Valescure

Des grillages peuvent aussi être mis en place sur les versants, perpendiculairement à la pente. Ainsi, ils constituent des pièges de l'érosion et permettent de déterminer la hauteur de l'eau grâce aux laisses de crues sur le grillage (mousses, feuilles). Il est préférable de les placer sur la partie amont des versants, où le débit ne sera pas élevé.

Tout autre système ingénieux peut faire l'affaire aussi, du moment que la hauteur d'eau maximum est détectable.

L'UMR TETIS, pour sa part, possède des cannes limnimétriques à bas coût (communication personnelle de C. Puech) et compte les utiliser pour équiper les bassins versants qu'il étudie.

L'utilisation des webcams et des appareils photos, à déclenchement automatique, n'est pas à négliger. Un suivi en temps réel serait alors possible de la ravine. Cependant, plusieurs problèmes sont à noter :

- Le coût du matériel,
- Le fait que les épisodes sont en général nocturnes⁵²,
- Le stockage des données,
- La perte ou la détérioration des équipements dues au vandalisme ou aux épisodes orageux⁵³.

⁵² Donc difficilement visibles par de l'imagerie vidéo.

⁵³ Ce dernier problème est valable aussi pour les autres instruments de mesure.



6 Conclusion

*“Au bout de tout savoir et de tout accroissement de notre savoir,
Il n’y a pas un point final, mais un point d’interrogation.”*

Herman Hesse

Ce travail de recherche s’est attaché à définir finement le réseau hydrographique d’un bassin versant soumis à des crues éclair. Les hypothèses de départ étaient que lors des épisodes majeurs, le réseau hydrographique superficiel temporaire concentre les eaux et donc contribue activement à la genèse des crues éclair. Or dans l’étude bibliographique, il ressort que les processus de transfert de pluie en débit du bassin versant sont complexes. Les chemins de l’eau sont multiples, tantôt superficiels, tantôt souterrains. Cette étude s’est intéressée uniquement aux chemins de l’eau visibles à la surface du sol.

A ce jour, plusieurs méthodes existent pour définir le réseau hydrographique. Les méthodes testées donnent des résultats assez différents. La référence QB semble minorer l’extension du réseau hydrographique tandis que les réseaux MNT ont tendance à la majorer. Il apparaît donc que le choix de la méthode dépend de l’utilisation du réseau hydrographique. Dans le cas de l’étude, le but était d’identifier le micro chevelu du réseau hydrographique, les ravines élémentaires aux extrémités amont du réseau hydrographique. Par conséquent, un couplage des données issues des méthodes précédentes a été tenté afin de rassembler l’ensemble des connaissances du réseau hydrographique acquises au cours de l’étude (référence terrain).

Les résultats de cette fusion d’informations se situent entre les deux méthodes. Cependant, il semble difficile de savoir si cette référence terrain est la meilleure cartographie du réseau hydrographique sur la zone d’étude. Cette référence terrain est d’une part tributaire des campagnes de mesures réalisées sur site, ce qui en limite la généralisation pour d’autres bassins versants. D’autre part, ce n’est pas parce qu’il y a un nombre élevé de repérages in-situ que la cartographie en sera meilleure. Il y a plusieurs trajets possibles entre deux points.

Cette recherche a mis en évidence toute la difficulté de déterminer les seuils haut et bas pour extraire un réseau hydrographique à partir d’un MNT raster. Suivant l’approche considérée, le seuil bas varie de 10 à 25 pixels drainant (soit de 0,63 à 1,56 ha). Pour le seuil haut, plusieurs critères entrent en jeu et donc un seuil haut constant en tenant compte que de la surface drainée amont uniquement n’est pas acceptable. Pour cette étude, ce sont les données terrain qui ont permis de le déterminer.

Dans l’optique d’étendre cette méthodologie à des bassins versants non jaugés, il semble donc que les MNT raster ne soient pas satisfaisants. Les réseaux TIN et les réseaux Lidar, abordés dans la partie bibliographique, paraissent plus prometteurs. Couplés aux images satellites à THRS, la phase terrain, indispensable dans l’étude pour une connaissance fine du réseau hydrographique, permettrait juste le contrôle des réseaux obtenus.



Bibliographie

*Avec tout ce que je sais, on pourrait faire un livre ...
Il est vrai qu'avec tout ce que je ne sais pas, on pourrait faire une bibliothèque.*

Sacha Guitry

- Adam A.** (1996): "Extraction du réseau hydrographique d'un mnt et confrontation au terrain - Application au bassin versant du Real Collobrier", Diplôme d'Etudes Approfondies Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental, *Universités de Montpellier I et II*, 50p.
- Al Ayoubi M.** (2006): "L'utilisation des MNT pour l'analyse du réseau hydrographique d'un petit bassin versant de montagne", Mémoire de travail de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de l'ESGT, *Ministère de l'Education Nationale de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche - Conservatoire National des Arts et Métiers, École Supérieure des Géomètres et Topographes*, 73p.
- Ambroise B.** (1998): "La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant - Processus, Facteurs, Modèles", Office Fédéral de l'Education et de la Science Suisse, HGA Bucarest, 206p.
- Andréassian V.** (2002): "Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants", Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6, *Ecole Doctorale : Géosciences et Ressources Naturelles - Spécialité : Hydrologie*, Ingénieur du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, 276p.
- Ayral P.-A.** (2005): "Contribution à la spatialisation du modèle opérationnel de prévision des crues éclair ALHTAÏR - Approches spatiale & expérimentale - Application au bassin versant du Gardon d'Anduze", Thèse de Doctorat, *Biosciences de l'Environnement, Chimie et Santé*, Université de Provence – Aix-Marseille I, 315p.
- Baumgartner A., Steger C., Mayer H., Eckstein W., Ebner H.** (1999): "Automatic road extraction based on multi-scale grouping and context" *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 65(7), pp.777-785
- BCEOM** (2000): "Patrimoine hydraulique de bassin de la Vallée Obscure - Maîtrise traditionnelle des eaux dans les Cévennes", vol 2, Commune de Peyrolles, 25p.
- Bédard A., Fortin D.** (1999): "Le schéma directeur de l'eau et la proposition de financement", Document de consultation publique, Comité de bassin de la rivière Chaudière (COBARIC II), 43p.
- Beven K.** (1989): "Changing ideas in hydrology - the case of physically-based models" *J. Hydrol.* 105, pp.157-172
- Bretar F.** (2006): "Les Systèmes LIDAR aéroportés : Géoréférencement et précision", Atelier REGLIS LIDAR, 7-8 Décembre 2006, Cemagref - UMR TETIS Montpellier, France,



- Cappus P.** (1960): "Bassin expérimental d'Alrance - Etude des lois de l'écoulement - Application au calcul et à la prévision des débits" *La Houille Blanche*, vol No A, pp.493-520
- Capra H., Foulard S., Pella H.** (2006): "Développement d'un MNT du Haut Rhône à partir de relevés bathymétriques réalisés avec un sondeur multi faisceaux", Atelier REGLIS LIDAR, 7-8 Décembre 2006, Cemagref - UMR TETIS Montpellier, France,
- Charleux-Demargne J.** (2001): "Qualité des modèles numériques de terrain pour l'hydrologie - Application à la caractérisation du régime de crues des bassins versants", Thèse de Doctorat Sciences de l'Information Géographique, Université de Marne la Vallée, 275p.
- Charleux-Demargne J., Puech C.** (2000): "Quality assessment for drainage networks and watershed boundaries extraction from a digital elevation model (DEM)", 8th ACM Symposium on Advances in Geographic Information Systems, Washington, USA, 10-11 novembre 2000, pp.89-94
- Cosandey C.** (1993): "Forêts et écoulements : rôle de la forêt sur la formation des crues et le bilan d'écoulement annuel, impact d'une coupe forestière - Rapport sectoriel de contrat CEE", CNRS, 82p.
- Cotteret G.** (2005): "Extraction d'éléments curvilignes guidée par des mécanismes attentionnels pour des images de télédétection : Approche par fusion de données", Thèse de Doctorat, Faculté de foresterie et de géomatique Université, Laval, Québec & Université de Paris-sud XI Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur, Orsay, France, 344p.
- Coutagne A.** (1948): "Météorologie et hydrologie : Étude générale des variations de débit en fonction des facteurs qui les conditionnent" *La Houille Blanche* 3, pp.416-436
- Crave A.** (1995): "Quantification de l'organisation des réseaux hydrographiques", Thèse de Doctorat, Université Rennes 1, 200p.
- Delrieu G.** (2006): "Extrêmes hydrologiques et observation : le cas des pluies intenses et crues-éclair en région méditerranéenne", Colloque Eau et Territoires (Atelier 5 : Climat, phénomènes extrêmes), 9-10 janvier 2006, Lyon,
- Didon-Lescot J.F., Martin C.** (2007): "Épisode cévenol du 18 au 20 octobre 2006 sur la Vallée Obscure", 6p.
- Diren** (2003): "Atlas des zones inondables du bassin versant des Gardons - Méthode hydrogéomorphologique", 37p., http://www.languedoc-roussillon.ecologie.gouv.fr/zi/hydrogeomorphologie/gardons/rapport/3.%20analyse_34.pdf
- Dunne T., Black R.D.** (1970): "An experimental investigation of runoff production in perméable soils" *Water Resour. Res.* 6(2), pp.478-490
- Gascuel-Oudoux C., Merot P., Durand P.** (1999): "Genèse des crues normales dans les petits bassins versants ruraux", Colloque SHF "Crues, de la normale à l'extrême", 10-11 mars 1999, Lyon, pp.25-34
- Gaume E., Payraste O., Silva B.R.d.** (2003): "Analyse hydrologique des crues des 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard", Centre d'Enseignement et de Recherche Eau Ville Environnement, 94p.



- Gibson L.** (2003): "Finding road networks in IKONOS satellite imagery", ASPRS Annual Conference, Anchorage, AK, USA,
- Hall F.R.** (1968): "Base-flow recessions - A review" *Water Resour. Res.* , vol 4(3), pp.973-983
- Hewlett J.D.** (1961): "Watershed Management" *Annual Report 196F*, USDA Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville (NC, USA), pp. 61-66
- Horton R.E.** (1933): "The role of infiltration in the hydrological cycle" *Trans. Amer. Geophys. Union*, vol 14, pp.446-460
- IGN** (1998): "BD ALTI - Descriptif technique", 22p., <http://www.ign.fr>
- IGN** (2006a): "BD TOPO version Pays 1.2 - Descriptif technique", 22p., <http://www.ign.fr>
- IGN** (2006b): "Scan 25 version 2 - Descriptif de contenu et de livraison", 25p., <http://www.ign.fr>
- ILEE** (2006): "Caractérisation multi-échelles des transferts hydriques sur un bassin méditerranéen. - Application à la prévision des crues éclair", 7p.
- Jenson S.K., Domingue J.O.** (1988): "Extracting topography structure from Digital Elevation data for geography information system analysis" *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 54(11), pp.1593-1600
- Kirkby M.** (1988): "Hill slopes and hollows" *Nature* 336, 201p.
- Lacoste C.** (2004): "Extraction de réseaux linéiques à partir d'images satellitaires et aériennes par processus ponctuels marqués", Thèse de Doctorat, *Ecole Doctorale : Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication*, Université de Nice-Sophia Antipolis, 204p.
- Marsily G.D.** (1986): "Quantitative Hydrogeology", Académie Press, San Diego (CA, USA), 440p.
- Martin C., Didon-Lescot J.-F., Jolivet J., Allignol F., Castex J.-M., Fiandino M., Ray D., Usselman P.** (2005): "Observations complémentaires sur les fonctionnements hydrologiques et hydrosédimentaires de la vallée obscure", 65p.
- Martin C., Didon-Lescot J.-F., Jolivet J., Domergue J.-M., Ray D.** (2007): "L'épisode hydrologique du 18 au 20 octobre 2006 dans la Vallée Obscure (Gard)", *Journée d'étude 2007 de l'OHM-CV*, CNRS UMR 6012 ESPACE, 18p.
- Montgomery D.R., Dietrich W.E.** (1988): "Where do channels begin ?" *Nature* 336, pp.232-234
- Moore I.D., Foster G.R.** (1990): "Hydraulics and overland Flow" *Process Studies in Hillslope Hydrology*, Bujt MGAeTP, Wiley, Chichester (UK), pp.215-254
- Musy A.** (2005): "Hydrologie Générale ", <http://sgc.epfl.ch/webdav/site/sgc2/shared/import/migration/chapitre2.pdf>
- MvKeown Jr D.M., McGlone C., Cochran S.D., Hsieh Y.C., Roux M., Shulfelt J.A.** (1996): "Feature extraction and object recognition" *Manual of Photogrammetry Addendum*, Sensing ASfPaR, Bethesda, MA, USA, pp.195-211



- O'Callaghan J.F., Mark D.M.** (1984): "The extraction of drainage networks from digital elevation data" *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 28, pp.323-344
- Penman H.L.** (1963): "Végétation and Hydrology", Technical Communication No 53, Commonwealth Bureau of Soils, Commonwealth Agricultural Bureaux, 124p.
- Petelet-Giraud E., Desprats J.F., Izac J.L., Foucher J.C.** (2006): "Caractérisation géochimique du bassin versant du Gardon d'Anduze - Approche isotopique du phénomène de "crue éclair"", BRGM - ILEE, 54p.
- Philip J.R.** (1969): "The theory of infiltration" *Adv. HydroscL* 5, pp.215-305
- Ponce J.-L.** (2006): "Eléments historiques sur l'occupation du site de Valescure du XIVème siècle au milieu du XIXème siècle", 12p.
- Préfecture du Gard** (2006): "Service de prévision de crues du Grand Delta - Règlement de surveillance de prévision et de transmission de l'information sur les crues", 39p.
- Puech C.** (2000): "Utilisation de la télédétection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes", Habilitation à Diriger des Recherches, INPG Grenoble, 83p.
- Quackenbush L.J.** (2004): "A review of techniques for extracting linear feature from imagery" *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 70(12), pp.1383-1392
- Riazanoff S.** (1989): "Extraction et analyse automatiques de réseaux à partir de Modèles Numériques de Terrain, contribution à l'analyse d'images de télédétection", Thèse de Doctorat, Université de Paris VII, 84p.
- Roche M.** (1963): "Hydrologie de surface ", Gauthier-Villars, Paris, 429p.
- Roche M.F.** (1986): "Dictionnaire français d'hydrologie de surface", Masson, Paris, 288p.
- Roose E.** (1970): "Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES) - Bulletin pédologique de la FAO 70",
<http://www.fao.org/docrep/T1765F/t1765f00.HTM#Contents>
- Salomon J.-L.** (1997): "L'homme face aux crues et aux inondations", Presses Universitaires de Bordeaux, 136p.
- Shreve R.L.** (1966): "Statistical law of stream numbers" *Journal of Geology* 74, pp.17-37
- Strahler** (1957): "Hypsometric (area - altitude) analysis of erosional topography" *Bulletin of the American Geological Society* 63, pp.1117-1142
- Trias-Sanz R.** (2006): "Classification semi-automatique du terrain en zone rurale par télédétection à haute résolution", Thèse de Doctorat, *Discipline des Sciences de la Vie et de la Matière - Spécialité Mathématiques-Informatique*, Université Paris 5 - René Descartes, 374p.
- Yee B.** (1987): "An expert system for planimetric feature extraction", IGARSS'87 Symposium, Ann Arbor, Michigan, USA, pp.321-325



Liste des annexes

Annexes A : Terminologie

<i>A-1 : Descriptif des équipes co-encadrantes de l'étude</i>	I
<i>A-2 : Lexique des termes clefs</i>	II
<i>A-3 : Liste des sigles</i>	IV

Annexes B : Les images QuickBird

<i>B-1 : Image QuickBird de février 2006</i>	V
<i>B-2 : Image QuickBird de juin 2006</i>	VI
<i>B-3 : Image QuickBird de février 2006 avec une photo-interprétation</i>	VII

Annexes C : Les cartes du bassin versant du Valescure

<i>C-1 : Scan IGN® au 1:25000^{ème} du BV du Valescure</i>	VIII
<i>C-2 : Couvert végétal de la Vallée Obscure en 2001</i>	IX
<i>C-3 : Carte de la référence terrain sur le bassin versant du Cartaou : données utilisées pour la construction de chaque tronçon</i>	X

Annexes D : Les tables récapitulatives de l'analyse quantitative

<i>D-1 : Tables récapitulatives de l'analyse des longueurs pour les réseaux QB</i>	XI
<i>D-2 : Tables récapitulatives de l'analyse des longueurs pour les réseaux MNT</i>	XII
<i>D-3 : Tables récapitulatives de l'analyse des réseaux selon la classification de Strahler</i>	XIII

Annexes E : Les données terrain

<i>E-1 : Fiche utilisée pour les relevés sur le terrain</i>	XIV
<i>E-2 : Fiche caractéristique d'une ravine</i>	XV
<i>E-3 : Evènement météorologique d'octobre 2006</i>	XVI
<i>E-4 : Fiche caractéristique du GPS Trumble</i>	XVII



Liste des figures

Figure 1 : Principaux processus d'écoulement superficiels et souterrains, et ancienneté relative de l'eau concernée [Ambroise, 1998].....	7
Figure 2 : La méthode de calcul des surfaces drainées (algorithme D8) [Al Ayoubi, 2006]	10
Figure 3 : Types d'écoulement pour les réseaux TIN : méthode de propagation a) de centroïde en centroïde, b) suivant les arêtes, c) en déterminant l'arête drainante [Al Ayoubi, 2006].....	11
Figure 4 : Différenciation MNT – MNS, due à la présence de "sursol" [Puech, 2000].....	11
Figure 5 : Schéma du bassin versant des Gardons [Gard, 2006]	16
Figure 6 : Image QB d'une partie du Gardon en amont de Saint Jean en février 2006 (CNES®).....	17
Figure 7 : Courbe hypsométrique du bassin versant du Valescure	18
Figure 8 : Carte du bassin versant du Valescure	19
Figure 9 : Zoom sur deux réseaux QB	22
Figure 10 : Définition des différentes longueurs (en violet : partie commune, en vert : partie en moins, en orange : partie en plus).....	22
Figure 11 : Classification géomorphologique des drains.....	24
Figure 12 : Images QuickBird du bassin versant du Valescure en 2006 (a et b en février, c en juin)....	27
Figure 13 : Extrait de l'image QB de février 2006	28
Figure 14 : Pourcentage de longueur commune entre les réseaux QB et la référence IGN.....	29
Figure 15 : Pourcentage de longueur en moins / en plus entre les réseaux QB et la référence IGN	29
Figure 16 : Superposition des réseaux QB en février a) pour un zoom fin et b) pour un zoom grossier (en violet : premier opérateur, en vert : second opérateur).....	30
Figure 17 : Superposition des réseaux QB en février a) pour un zoom fin et b) pour un zoom grossier (en violet : vue normale, en bleu : vue retournée)	31
Figure 18 : Les limites des zones tampons (référence IGN_20 avec trois réseaux QB de février)	32
Figure 19 : Une limite de la classification de Strahler	33
Figure 20 : Extrait de la figure 20	33
Figure 21 : Superposition de plusieurs réseaux hydrographiques (en trait bleu épais : buffer de 20 m sur la référence IGN, en traits fins : tous les réseaux QB).....	33



Figure 22 : Pourcentage de la partie en moins / en plus des réseaux MNT en fonction du nombre de pixels drainant.....	36
Figure 23 : Pourcentage de la longueur commune entre les réseaux MNT avec la référence IGN en fonction du nombre de pixels drainant	36
Figure 24 : Pourcentage du nombre de branches d'un réseau MNT en fonction du nombre de pixels drainant	37
Figure 25 : Réseau MNT_2.....	37
Figure 26 : Superposition de la référence IGN (en bleu) et du réseau MNT_100 (en orange).....	38
Figure 27 : Superposition du réseau MNT_10 (en turquoise) et du réseau MNT_100 (en marron)	38
Figure 28 : Superposition de la référence IGN (en bleu) et du réseau MNT_10 (en orange).....	38
Figure 29 : Cartographie de l'indice "morphologie" sur le BV du Cartaou	40
Figure 30 : Cartographie de l'indice "ravine" sur le BV du Cartaou.....	40
Figure 31 : Cartographie de l'indice "hydrologie" sur le BV du Cartaou	41
Figure 32 : Vue partielle de deux réseaux MNT et des points GPS sur le bassin versant du Cartaou (en violet : réseau MNT_5, en vert : réseau MNT_2, en orange : points GPS).....	44
Figure 33 : Cartographie du réseau hydrographique du BV du Valescure en fonction de l'indice de confiance.....	45
Figure 34 : Comparaison de la référence IGN (bleu) avec la référence terrain (bleu ciel).....	45
Figure 35 : Comparaison de la référence QB (bleu) avec la référence terrain (bleu ciel)	45
Figure 36 : Comparaison du réseau MNT_5 (bleu) avec la référence terrain (bleu ciel)	46
Figure 37 : Comparaison du réseau MNT_2 (bleu ciel) avec la référence terrain (bleu)	46
Figure 38 : Une échelle limnimétrique [OTT]	49
Figure 39 : Une échelle à maximum [OTT].....	49
Figure 40 : Une échelle "à bouteille" de l'UMR ESPACE installée sur le Valescure	50



Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques physiographiques du bassin versant du Valescure	19
Tableau 2 : Longueur totale des réseaux QB	28
Tableau 3 : Correspondance des codes aux critères testés.....	28
Tableau 4 : Classification proposée pour l'indice "ravine"	42
Tableau 5 : Indice de confiance des tronçons selon les données utilisées	44
Tableau 6 : Comparaison des différents réseaux	47




Table des matières


Remerciements	
Sommaire	1
1 Introduction	3
2 Les chemins de l'eau	5
2.1 Le fonctionnement hydrologique du bassin versant	5
2.1.1 <i>Le réseau hydrographique</i>	5
2.1.1.1 Quelques définitions	5
2.1.1.2 La dynamique du réseau hydrographique	6
2.1.1.3 La genèse des crues	6
2.1.2 <i>Les processus hydrologiques</i>	6
2.1.2.1 Les précipitations	7
2.1.2.2 Les écoulements dans les versants	7
2.1.2.3 Les écoulements sur les versants	8
2.1.3 <i>Le développement des ravines</i>	8
2.1.3.1 Les ravines en forme de V	9
2.1.3.2 Les ravines en forme de U	9
2.1.3.3 Les ravines en forme de tunnel	9
2.2 L'état de l'art des méthodes d'identification du réseau hydrographique .	9
2.2.1 <i>A partir d'un MNT</i>	9
2.2.1.1 Les techniques classiques avec le format RASTER	9
2.2.1.2 Le potentiel des réseaux TIN	10
2.2.1.3 Les perspectives liées à la technologie LIDAR	11
2.2.2 <i>A partir d'images satellites</i>	12
2.2.2.1 La photo-interprétation	12
2.2.2.2 Les méthodes semi-automatiques	12
2.2.2.3 Les méthodes automatiques	12
2.2.2.4 Discussion : extraction manuelle vs extraction automatique	13
2.3 Les méthodes utilisées par l'IGN	13
2.4 La problématique	14



3	L'application sur le bassin versant du Valescure.....	15
3.1	La description de la zone d'étude	15
3.1.1	<i>Le bassin versant du Gardon d'Anduze</i>	<i>15</i>
3.1.1.1	Le Gardon	15
3.1.1.2	Le régime pluviométrique et hydrologique.....	16
3.1.1.3	Le bassin du Gardon d'Anduze.....	16
3.1.2	<i>La zone d'étude</i>	<i>17</i>
3.1.2.1	Le contexte géographique	17
3.1.2.2	Le bassin versant du Valescure.....	18
3.1.2.3	Le sous bassin versant du Cartaou	18
3.1.3	<i>Le réseau hydrographique IGN.....</i>	<i>19</i>
3.2	Les données	20
3.2.1	<i>Sur le réseau hydrographique</i>	<i>20</i>
3.2.1.1	La BD Carthage	20
3.2.1.2	La BD Topo	20
3.2.1.3	Le scan25 IGN	20
3.2.2	<i>Le MNT IGN.....</i>	<i>20</i>
3.2.3	<i>Les images QuickBird.....</i>	<i>21</i>
3.2.4	<i>Les données contextuelles.....</i>	<i>21</i>
3.3	La méthodologie	21
3.3.1	<i>L'approche géomatique</i>	<i>21</i>
3.3.1.1	Le choix de la référence.....	21
3.3.1.2	L'analyse des réseaux photo-interprétés à partir des images QB	22
3.3.1.3	L'analyse des réseaux obtenus avec le MNT IGN.....	23
3.3.2	<i>L'approche terrain</i>	<i>23</i>
3.3.2.1	La constitution de la BD ravines.....	23
3.3.2.2	L'élaboration du protocole expérimental	23
3.3.2.3	La création d'une référence terrain	24
3.3.3	<i>Le couplage des diverses sources d'information.....</i>	<i>24</i>
3.3.3.1	Le gain des images QB	24
3.3.3.2	L'apport du MNT IGN.....	25
3.3.3.3	La nécessité du terrain.....	25



4	La phase expérimentale	26
4.1	Les résultats avec les images QB.....	26
4.1.1	<i>Les tâches préliminaires</i>	<i>26</i>
4.1.2	<i>L'analyse des réseaux QB.....</i>	<i>27</i>
4.1.2.1	La comparaison des réseaux QB avec la référence IGN.....	27
4.1.2.1.1	Les effets de la date d'acquisition.....	27
4.1.2.1.2	L'impact des conditions d'observation.....	28
◆	Les angles de visualisation.....	28
◆	Les zooms de visualisation	28
4.1.2.1.3	La comparaison des photo-interprétations des deux opérateurs	29
4.1.2.2	La comparaison qualitative des réseaux QB deux à deux.....	29
4.1.2.2.1	L'impact des conditions d'observation	29
◆	Les angles de visualisation.....	29
◆	Les zooms de visualisation	30
4.1.2.2.2	La comparaison des photo-interprétations des deux opérateurs	30
4.1.2.2.3	La quantification du gain et de l'oubli	31
4.1.3	<i>Discussions et perspectives</i>	<i>31</i>
4.1.3.1	L'apport des images QB pour l'extraction du réseau hydrographique	31
4.1.3.2	Les limites de la méthode.....	32
4.1.3.2.1	Les zones tampons	32
4.1.3.2.2	La classification de Strahler.....	32
4.1.3.2.3	La signification des tronçons	33
4.1.3.3	Les perspectives d'une référence issue de toutes les photo-interprétations	34
4.2	Les résultats avec les réseaux MNT	34
4.2.1	<i>Les tâches préliminaires</i>	<i>34</i>
4.2.2	<i>L'analyse des réseaux MNT</i>	<i>35</i>
4.2.2.1	La comparaison quantitative des réseaux MNT avec la référence IGN	35
4.2.2.2	La comparaison qualitative des réseaux MNT deux à deux	37
4.2.3	<i>Discussions et perspectives</i>	<i>39</i>
4.3	La confrontation aux données terrain	39
4.3.1	<i>Le protocole expérimental utilisé pour l'observation des chemins de l'eau.....</i>	<i>39</i>
4.3.1.1	La mise en situation du protocole expérimental	39
4.3.1.2	L'analyse spatiale des données de la BD ravines	40
4.3.1.2.1	Les indices "morphologie" et "ravine"	40
4.3.1.2.2	L'indice "hydrologie"	41
4.3.1.3	Le bilan sur le protocole expérimental.....	41
4.3.1.3.1	Les limites	41
4.3.1.3.2	Les perspectives	42
4.3.2	<i>La comparaison avec les autres données</i>	<i>43</i>



4.3.2.1	Avec la référence IGN	43
4.3.2.2	Avec la référence QB	43
4.3.2.3	Avec les réseaux MNT	43
4.3.3	<i>La création d'une référence terrain</i>	43
4.3.4	<i>Discussions sur la référence terrain</i>	45
5	La synthèse et les perspectives	47
5.1	La synthèse de l'étude.....	47
5.2	Les perspectives de cette étude	48
5.3	La méthodologie proposée permettant le suivi des ravines	49
6	Conclusion	51
	Bibliographie	52
	Liste des annexes	56
	Liste des figures	57
	Liste des tableaux	59
	Table des matières	60
	Annexes	64



Annexes

Annexes A : Terminologie

<i>A-1 : Descriptif des équipes co-encadrantes de l'étude</i>	I
<i>A-2 : Lexique des termes clefs</i>	II
<i>A-3 : Liste des sigles</i>	IV

Annexes B : Les images QuickBird

<i>B-1 : Image QuickBird de février 2006</i>	V
<i>B-2 : Image QuickBird de juin 2006</i>	VI
<i>B-3 : Image QuickBird de février 2006 avec une photo-interprétation</i>	VII

Annexes C : Les cartes du bassin versant du Valescure

<i>C-1 : Scan IGN® au 1:25000^{ème} du BV du Valescure</i>	VIII
<i>C-2 : Couvert végétal de la Vallée Obscure en 2001</i>	IX
<i>C-3 : Carte de la référence terrain sur le bassin versant du Cartaou : données utilisées pour la construction de chaque tronçon</i>	X

Annexes D : Les tables récapitulatives de l'analyse quantitative

<i>D-1 : Tables récapitulatives de l'analyse des longueurs pour les réseaux QB</i>	XI
<i>D-2 : Tables récapitulatives de l'analyse des longueurs pour les réseaux MNT</i>	XII
<i>D-3 : Tables récapitulatives de l'analyse des réseaux selon la classification de Strahler</i>	XIII

Annexes E : Les données terrain

<i>E-1 : Fiche utilisée pour les relevés sur le terrain</i>	XIV
<i>E-2 : Fiche caractéristique d'une ravine</i>	XV
<i>E-3 : Evènement météorologique d'octobre 2006</i>	XVI
<i>E-4 : Fiche caractéristique du GPS Trumble</i>	XVII



A-1 : Descriptif des équipes co-encadrantes de l'étude

L'UMR TETIS

L'équipe de l'UMR TETIS, au sein de la Maison de la Télédétection⁵⁴, dirigée par M^r Pascal Kosuth, accueille des équipes de différents laboratoires de recherche travaillant sur des problèmes environnementaux et leurs traitements via l'approche télédétection et information géographique. Parmi ces organismes présents à la Maison de Télédétection citons le Cemagref – Engref, le Cirad et l'Ird. Le Cemagref⁵⁵ est un institut public de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement. Le centre de Montpellier travaille plus particulièrement sur les thématiques liées aux zones méditerranéennes, dont l'UMR TETIS (Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiales) qui mène des recherches sur les méthodes d'analyse et représentation spatiale des systèmes agri environnementaux et territoriaux, selon quatre axes :

- L'analyse des structures et dynamiques spatio-temporelles de ces systèmes et de leur perception par les acteurs,
- L'acquisition et le traitement des données spatialisées (télédétection, MNT, GPS...),
- L'ingénierie des systèmes d'information,
- Les démarches de développement territorial et gestion agri-environnementale et la place des systèmes d'Information.

Ces axes sous-tendent le thème de recherche SYNERGIE du Cemagref.

L'UMR (CEMAGREF-CIRAD-ENGREF) consacre une part importante de ses activités à des actions de formation, d'expertise et d'appui aux politiques publiques valorisant les acquis et savoir-faire de l'équipe. L'IRD⁵⁶ travaille lui principalement sur des problématiques liées aux relations entre l'homme et son environnement dans les régions tropicales et méditerranéennes, dans l'idée d'un développement durable.

Le LGEI de l'Ecole des Mines d'Alès

Le développement durable ne peut être envisagé sans projets de recherche industrielle dans le domaine de l'environnement et des risques. Dans ce contexte, le centre de recherche LGEI, dirigé par M^r Miguel Lopez-Ferber, propose notamment de nouvelles approches de la gestion des risques ainsi que de nouveaux procédés et filières de traitement et de recyclage, adaptés à certains types d'effluents industriels, gazeux ou liquides. Il développe également des systèmes de diagnostics et de mesure rapide (capteurs, procédures, modèles...).

Ces travaux sont réalisés dans le cadre de formations doctorales, de partenariats industriels, ou de programmes scientifiques en synergie avec la stratégie entrepreneuriale de l'Ecole des Mines d'Alès, en intégrant également au laboratoire des projets personnels d'élèves et de création d'entreprise.

Quatre équipes se partagent ces travaux de recherche :

- Risques industriels et naturels, dans laquelle s'est déroulé la suite de l'étude ;
- Odeurs et composés organiques volatils ;
- Effluents liquides, traitement et valorisation ;
- Biodiagnostic et métrologie.

⁵⁴ <http://www.teledetection.fr>

⁵⁵ Centre d'Etudes du Machinisme, du Génie Rural, des Eaux et Forêts <http://www.cemagref.fr>

⁵⁶ Institut de Recherche pour le Développement <http://www.ird.fr>



A-2 : Lexique des termes clefs

Bassin versant : Ensemble du territoire qui alimente en eau un cours d'eau.

BD ravines : C'est une base de données regroupant toutes les informations recueillies lors des sorties sur le terrain. L'information est ponctuelle et géoréférencée dans l'espace via des coordonnées (XY) relevées par GPS.

Branche : Somme de tronçons, pouvant constituée un affluent ou un cours d'eau.

Buffer : Aussi appelé zone tampon, c'est une bande décrivant une enveloppe d'une distance constante par rapport à un point ou une ligne.

Chemin de l'eau : Toute dépression du relief favorisant l'écoulement de l'eau à la surface du sol. Cette appellation regroupe le réseau hydrographique pérenne et temporaire.

Crue : Une des phases du régime hydrologique d'un cours d'eau : les hautes eaux.

Crue éclair : Crue générée par une averse brutale, liée au déplacement d'un front orageux qui produit des lames d'eau très importantes dans des délais très brefs. La région méditerranéenne y est particulièrement sujette à l'automne.

Densité de drainage : Longueur totale (en km) du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant (en km²).

Densité hydrographique : Nombre de canaux d'écoulement par unité de surface du bassin versant (en km²).

Données terrain : Toutes les informations notées selon le protocole expérimental mis en place.

Drain : Partie du relief favorisant la concentration et l'écoulement des eaux en surface.

Image QB : Image à THRS issue du satellite QuickBird.

Indice de Gravelius : Rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface. Il est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée.

Longueur totale : Somme des longueurs de tous les tronçons du réseau.

Magnitude : Ordre du tronçon à l'exutoire selon le type de classification (Strahler, Shreve).

Partie commune : Somme des longueurs des tronçons du réseau compris dans la zone tampon de la référence IGN.

Partie en moins : Longueur totale de la référence IGN – la partie commune.

Partie en plus : Longueur totale du réseau – la partie commune.

Pente moyenne réseau : Cette pente moyenne est celle du réseau hydrographique.

Photo-interprétation : Action d'interpréter directement les images satellites sur l'écran à partir des logiciels de PIAO (Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur).



Protocole expérimental : Méthodologie utilisée pour le recueil des données sur le terrain.

Raster : Ce mode de représentation correspond à un quadrillage régulier de l'espace en cellules élémentaires (pixels). La résolution spatiale des données correspond alors à la taille de ce pixel.

Ravine : Zone où les eaux de pluie favorisent la formation de sillons à la surface du sol.

Référence IGN(X) : Réseau hydrographique issu du scan25 de l'IGN. Le X correspond à la taille en mètres de la zone tampon (buffer) appliquée sur la référence IGN afin de déterminer les longueurs commune, en moins et en plus avec les différents réseaux. Dans les tables en annexe, le nom qui lui est attribué est bufX_scan25.

Référence QB : Réseau hydrographique résultant de la superposition de tous les réseaux QB.

Référence terrain : Réseau hydrographique construit à partir de l'ensemble des données à disposition.

Réseau hydrographique : Ensemble hiérarchisé et structuré des chenaux qui assurent le drainage superficiel, permanent ou temporaire, d'un bassin versant.

Réseau (hydrographique) réel : Réseau hydrographique visible sur la zone d'étude.

Réseau MNT(X) : Réseau généré à partir du Modèle Numérique de Terrain de l'IGN avec un pas de 25m. Le X correspond à la valeur seuil du nombre de pixels drainant nécessaire pour qu'un écoulement apparaisse. Pour obtenir la surface drainée équivalente, il suffit de multiplier la valeur X par 25^2 (taille du pixel au sol).

Réseau QB : Réseau hydrographique issu de la photo-interprétation des images QuickBird.

Rupture radiométrique : Changement de couleur sur les images satellites.

Seuil bas : Seuil pour lequel la longueur totale du réseau hydrographique du réseau MNT est supérieure à celle de la référence IGN.

Seuil haut : Seuil correspondant à la surface amont drainée nécessaire pour avoir une localisation précise du commencement des drains sur le versant.

Système d'Information Géographique (SIG) : Il permet l'analyse simultanée et croisée des différentes couches d'information (réseau hydrographique et position des colonies). Un SIG est en fait un outil servant à la collecte, à l'analyse, au traitement et à la représentation graphique de données spatialisées.

Téledétection : C'est l'ensemble des moyens permettant de détecter à distance des informations. Jusque vers 1970, la téledétection était limitée à la photographie aérienne, utilisée pour établir les cartes topographiques ou thématiques. Actuellement, la téledétection est aussi satellitale.

Thalweg : Lieu concave de convergence du ruissellement.

Tronçon singulier : Tronçon présent que dans un seul réseau.

Vecteur : Représentation des objets dans un espace continu par des points, des lignes et des surfaces.

Zone tampon : Cf buffer.



A-3 : Liste des sigles

BD : Base de Données

BV : Bassin Versant

BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière

CEMAGREF : Centre d'Etudes du Machinisme, du Génie Rural, des Eaux et Forêts

CNES : Centre National d'Etudes Spatiales

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

DFCI : Défense Forestière Contre les Incendies

EMA : Ecole nationale supérieure des Mines d'Alès

GPS : Global Positioning System

IGN : Institut de Géographie National

ILEE : Institut Languedocien de recherche sur l'Eau et l'Environnement

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

LGEI : Laboratoire Génie de l'Environnement Industriel

LIDAR : Light Detection And Ranging

MEDD : Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

MNS : Modèle Numérique de Surface

MNT : Modèle Numérique de Terrain

OHM-CV : Observatoire Hydro-météorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais

ORE : Observatoire de Recherche et Expérimental

QB : QuickBird

SIG : Système d'Information Géographique

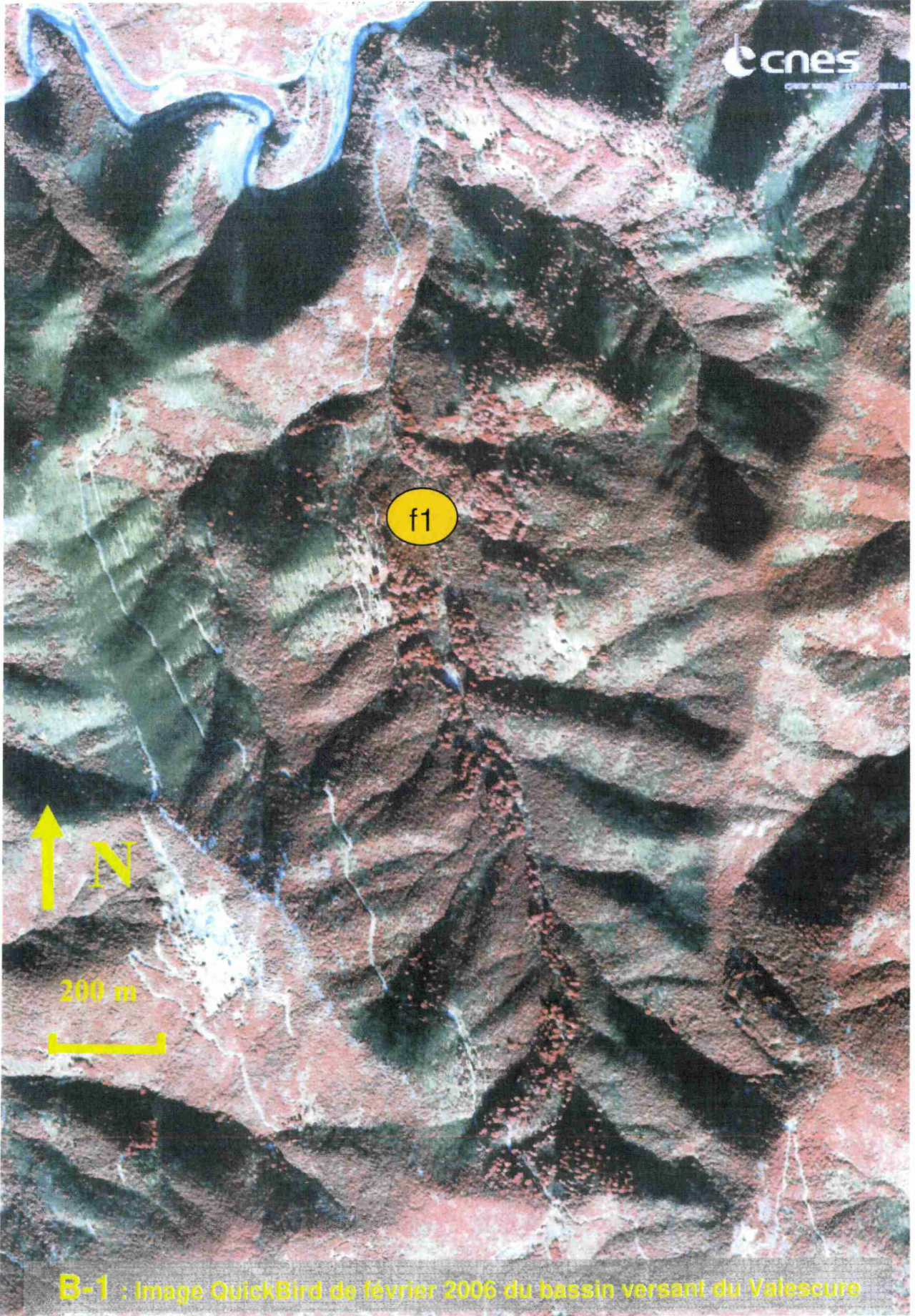
SMAGE : Syndicat Mixte d'Aménagement et de Gestion Equilibrée

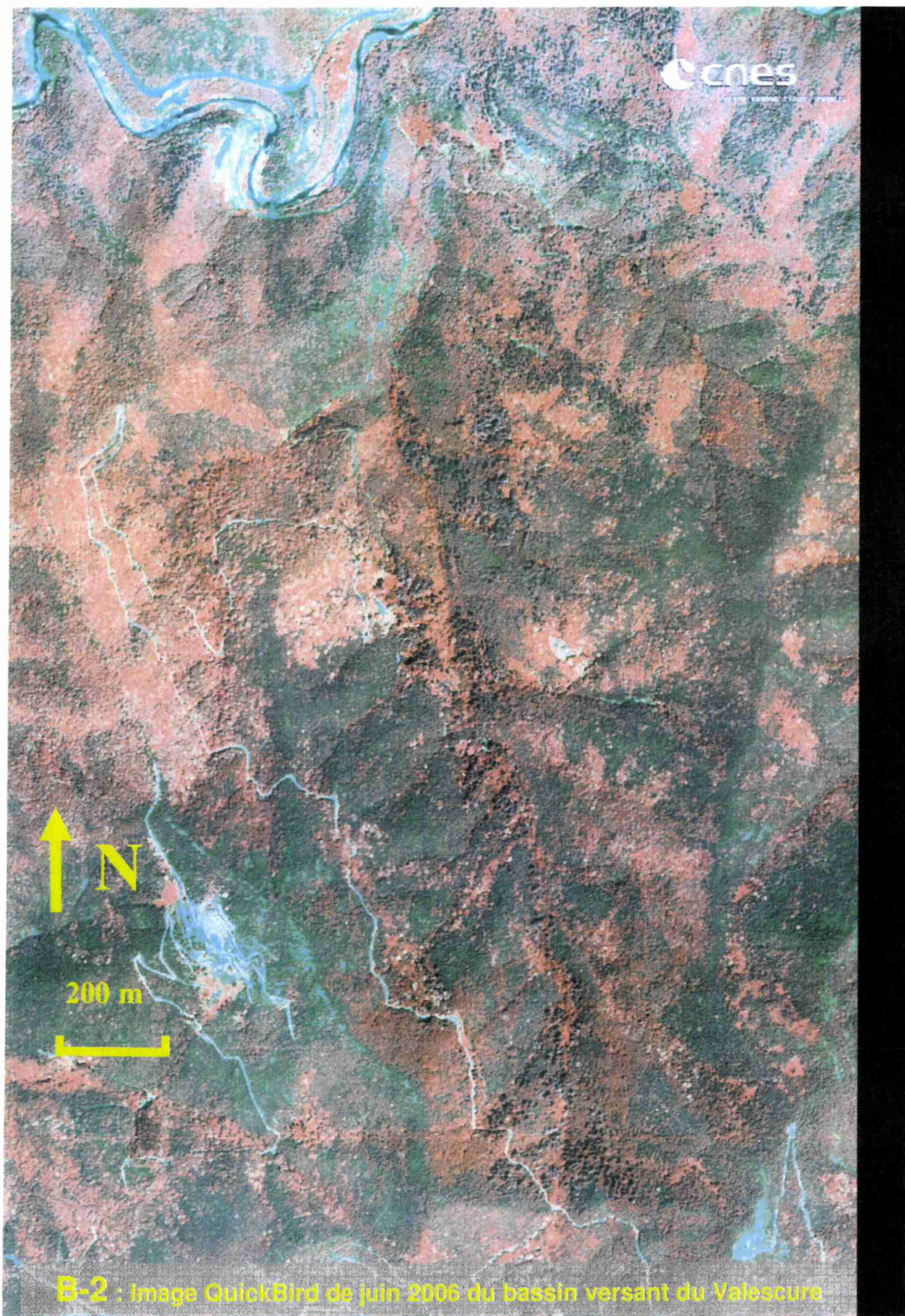
TETIS : Territoire, Environnement, Télédétection et Information Spatiale

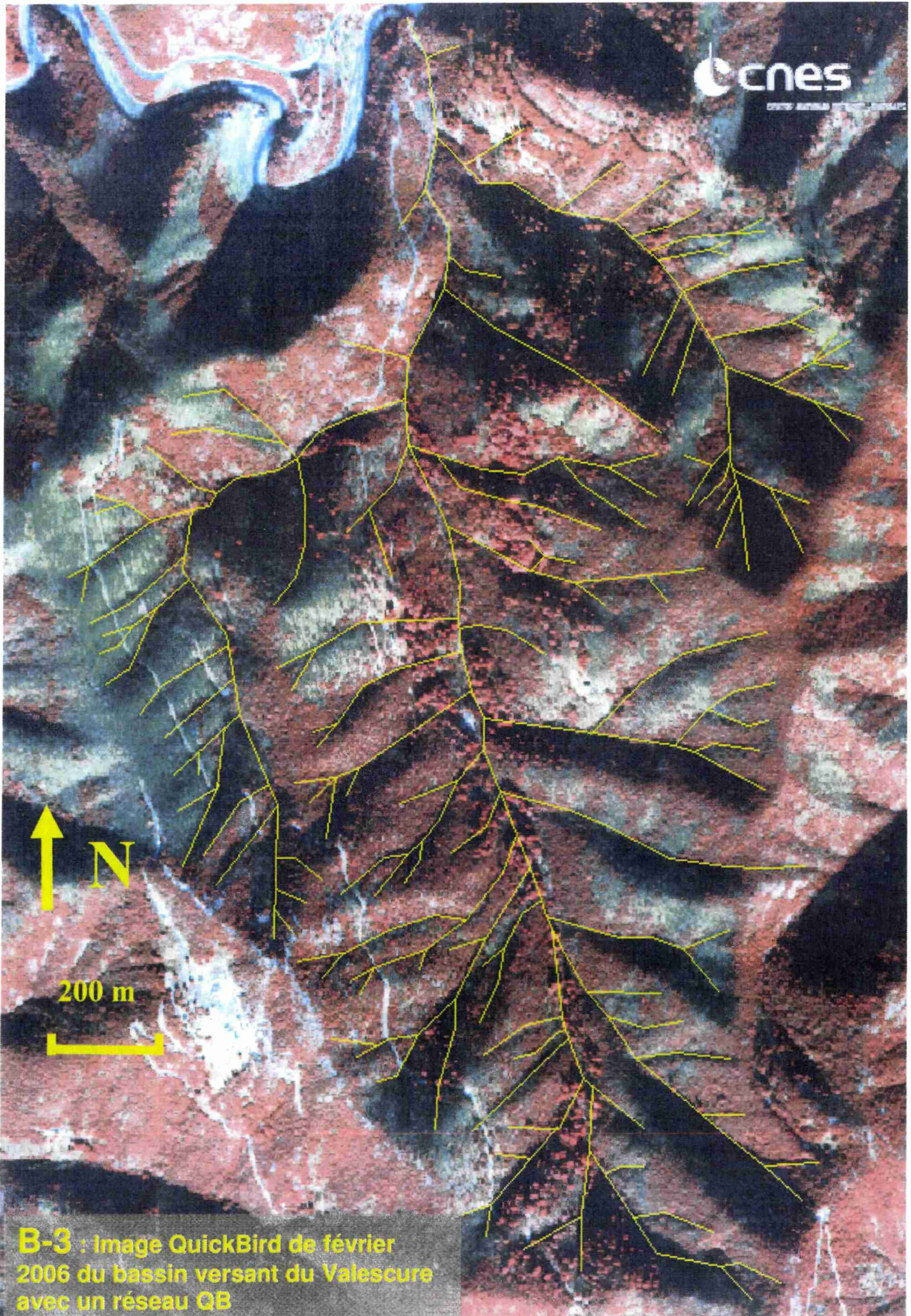
THRS : Très Haute Résolution Spatiale

TIN : Triangular Irregular Network

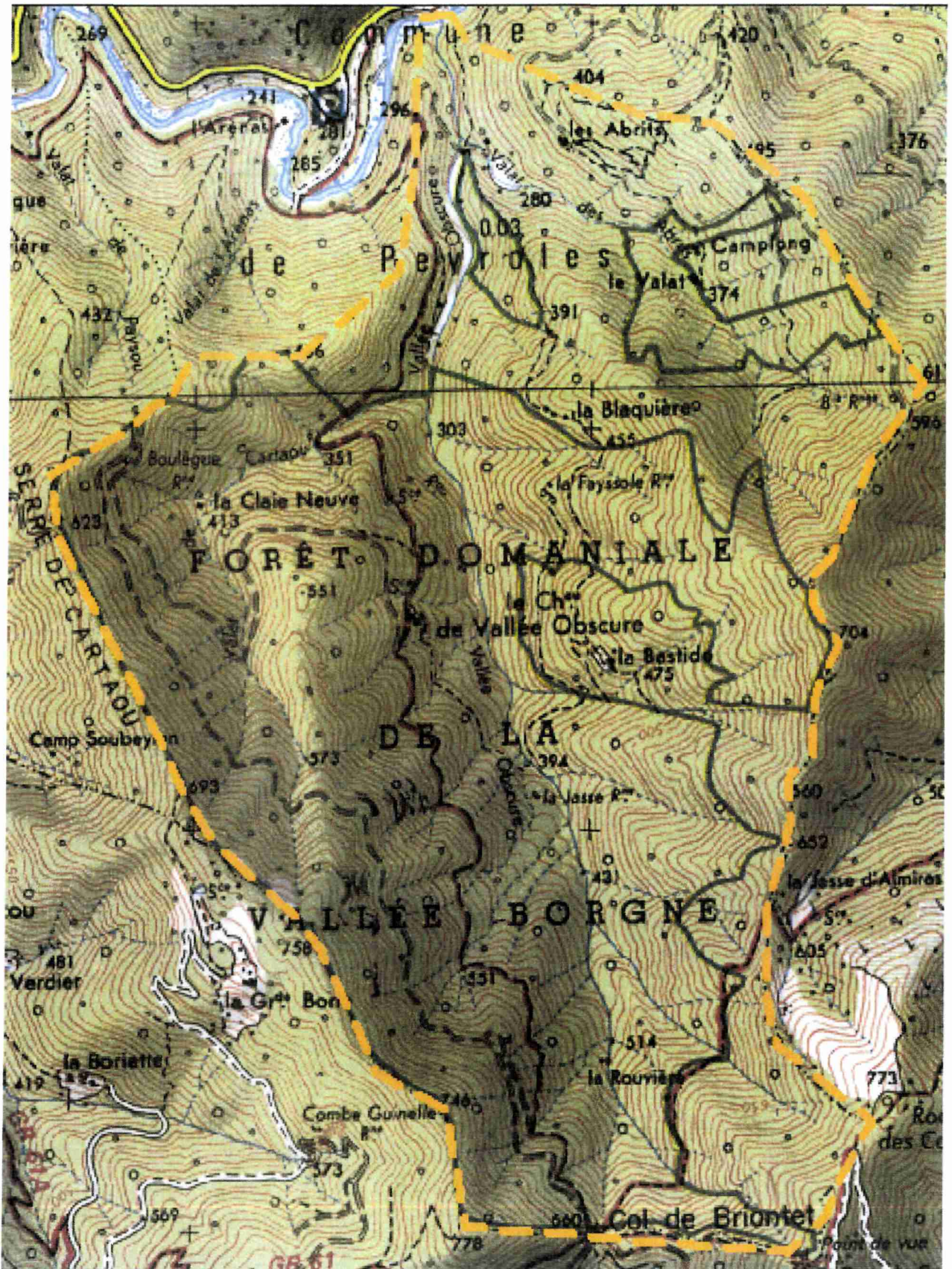
UMR : Unité Mixte de Recherche



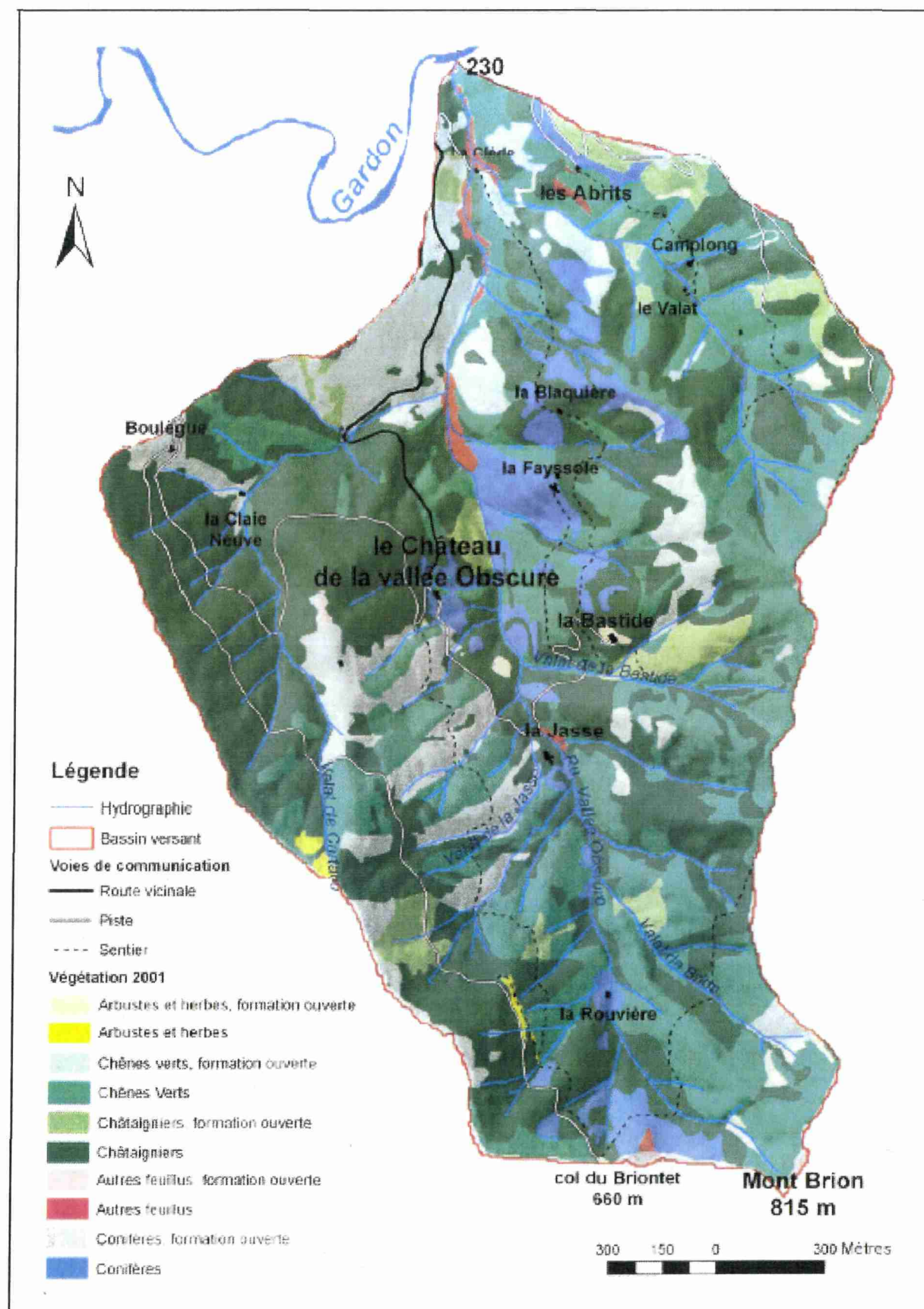




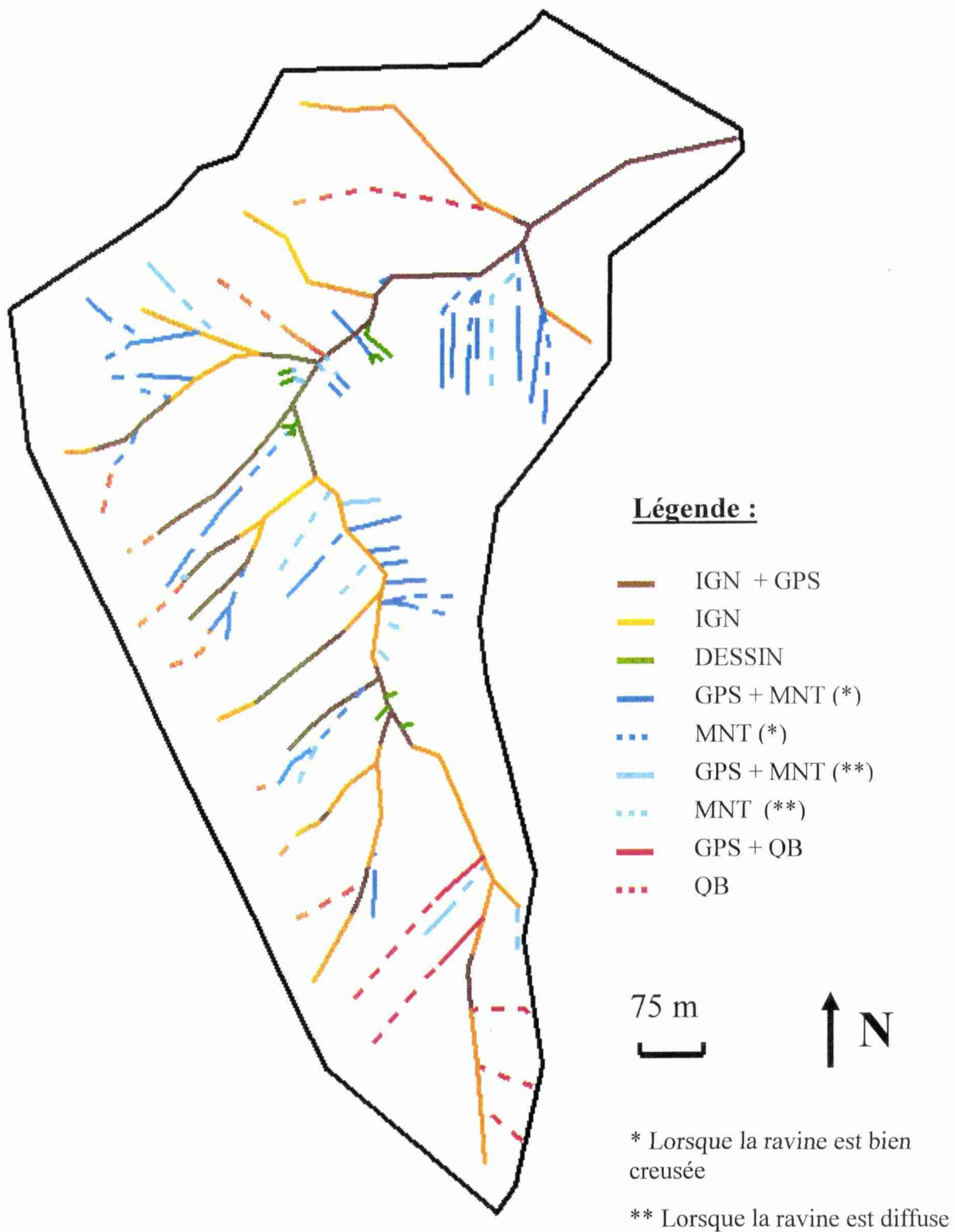
B-3 : image QuickBird de février 2006 du bassin versant du Valescure avec un réseau QB



C-1 : Scan IGN au 1:25000^{ème} du bassin versant du Valescure



C-2 : Couvert végétal de la Vallée Obscure en 2001
(d'après les observations de J.M. CASTEX ; réalisation : F. ALLIGNOL)



C-3 : Carte de la référence terrain sur le bassin versant du Cartaou : données utilisées pour la construction de chaque tronçon

Analyse des réseaux QB de février

Longueur (m)	buf5_scan25			buf10_scan25			buf20_scan25			Totale
	Commun	En moins	En plus	Commun	En moins	En plus	Commun	En moins	En plus	
fev_reseau4000	6710	17514	23603	12325	11999	17988	21102	3122	9211	30313
fev_reseau4000_op2	5821	18403	22884	11851	12373	16854	19666	4558	9039	28705
fev_reseau4000-180	5160	19064	22866	11049	13175	16977	20252	3972	7774	28026
fev_reseau 14500	4938	19286	19461	9842	14382	14557	17290	6934	7109	24399
fev_reseau 14500_op2	4509	19715	19920	8896	15338	15543	16446	7778	7983	24429
fev_reseau 14500-180	4294	19930	19057	8303	15921	15048	14716	9508	8635	23351

Pourcentage	buf5_scan25			buf10_scan25			buf20_scan25		
	Commun	En moins	En plus	Commun	En moins	En plus	Commun	En moins	En plus
fev_reseau4000	27,7	72,3	97,4	50,9	49,1	74,3	87,1	12,9	38,0
fev_reseau4000_op2	24,0	76,0	94,5	48,9	51,1	69,6	81,2	18,8	37,3
fev_reseau4000-180	21,3	78,7	94,4	45,6	54,4	70,1	83,6	16,4	32,1
fev_reseau 14500	20,4	79,6	80,3	40,6	59,4	60,1	71,4	28,6	29,3
fev_reseau 14500_op2	18,6	81,4	82,2	36,7	63,3	64,2	67,9	32,1	33,0
fev_reseau 14500-180	17,7	82,3	78,7	34,3	65,7	62,1	60,7	39,3	35,6

Analyse des réseaux QB de juin

Longueur (m)	buf5_scan25			buf10_scan25			buf20_scan25			Totale
	Commun	En moins	En plus	Commun	En moins	En plus	Commun	En moins	En plus	
juin_reseau4000	3670	20554	17206	6908	17316	13968	13467	10757	7409	20876
juin_reseau4000-180	2629	21595	9747	5095	19129	7281	8983	15241	3393	12376
juin_reseau 14500	1975	22249	10590	3251	20973	9314	6461	17763	6104	12565
juin_reseau 14500-180	2158	22066	12391	4338	19886	10211	8486	15738	6063	14549

Pourcentage	buf5_scan25			buf10_scan25			buf20_scan25		
	Commun	En moins	En plus	Commun	En moins	En plus	Commun	En moins	En plus
juin_reseau4000	15,2	84,8	71,0	28,5	71,5	57,7	55,6	44,4	30,6
juin_reseau4000-180	10,9	89,1	40,2	21,0	79,0	30,1	37,1	62,9	14,0
juin_reseau 14500	8,2	91,8	43,7	13,4	86,6	38,4	26,7	73,3	25,2
juin_reseau 14500-180	8,9	91,1	51,2	17,9	82,1	42,2	35,0	65,0	25,0

Analyse des réseaux MNT

Longueur (m)	buf5_scan25			buf10_scan25			buf20_scan25			Totale
	Commun	En moins	En plus	Commun	En moins	En plus	Commun	En moins	En plus	
reseau MNT_2	14600	9624	117151	27275	-3051	104476	49396	-25172	82355	131751
reseau MNT_5	11596	12628	56026	20704	3520	46918	35319	-11095	32303	67622
reseau MNT_10	7856	16368	24676	13670	10554	18862	22532	1692	10000	32532
reseau MNT_25	5082	19142	13007	9045	15179	9044	14051	10173	4038	18089
reseau MNT_50	3362	20862	8573	6226	17998	5709	9859	14365	2076	11935
reseau MNT_100	2768	21456	6311	5043	19181	4036	7742	16482	1337	9079
reseau MNT_250	2166	22058	3337	3696	20528	1807	5091	19133	412	5503

Pourcentage	buf5_scan25			buf10_scan25			buf20_scan25		
	Commun	En moins	En plus	Commun	En moins	En plus	Commun	En moins	En plus
reseau MNT_2	60,3	39,7	483,6	112,6	-12,6	431,3	203,9	-103,9	340,0
reseau MNT_5	47,9	52,1	231,3	85,5	14,5	193,7	145,8	-45,8	133,4
reseau MNT_10	32,4	67,6	101,9	56,4	43,6	77,9	93,0	7,0	41,3
reseau MNT_25	21,0	79,0	53,7	37,3	62,7	37,3	58,0	42,0	16,7
reseau MNT_50	13,9	86,1	35,4	25,7	74,3	23,6	40,7	59,3	8,6
reseau MNT_100	11,4	88,6	26,1	20,8	79,2	16,7	32,0	68,0	5,5
reseau MNT_250	8,9	91,1	13,8	15,3	84,7	7,5	21,0	79,0	1,7

Analyse des réseaux QB de février

Longueur (m)	Ordre de Strahler					Total
	1	2	3	4	5	
Réseaux QB						
fev_reseau4000	16386	7542	3204	2216	965	30313
fev_reseau4000_op2	16864	6058	2457	2343	983	28705
fev_reseau4000-180	14086	7697	4158	2085		28026
fev_reseau14500	13482	5001	3882	2034		24399
fev_reseau14500_op2	15203	5180	2056	1136	855	24429
fev_reseau14500-180	14253	4090	3319	1689		23351
Référence IGN	13954	5244	4055	971		24224

Nb de branches	Ordre de Strahler					Total
	1	2	3	4	5	
Réseaux QB						
fev_reseau4000	100	46	25	20	3	194
fev_reseau4000_op2	84	35	20	19	6	164
fev_reseau4000-180	96	46	32	14		188
fev_reseau14500	63	26	22	12		123
fev_reseau14500_op2	54	25	12	8	3	102
fev_reseau14500-180	63	30	21	9		123
Référence IGN	72	31	33	3		139

Analyse des réseaux QB de juin

Longueur (m)	Ordre de Strahler					Total
	1	2	3	4	5	
Réseaux QB						
juin_reseau4000	11399	5100	1281	2814	282	20876
juin_reseau4000-180	5672	3645	2834	225		12376
juin_reseau14500	6265	3591	2418	291		12565
juin_reseau14500-180	8106	3401	2856	185		14549
Scan 25 Réseau IGN	13954	5244	4055	971		24224

Nb de branches	Ordre de Strahler					Total
	1	2	3	4	5	
Réseaux QB						
juin_reseau4000	68	34	9	20	1	132
juin_reseau4000-180	34	17	15	1		67
juin_reseau14500	29	16	11	1		57
juin_reseau14500-180	35	18	14	1		68
Scan 25 Réseau IGN	72	31	33	3		139

Analyse des réseaux MNT

Longueur (m)	Ordre de Strahler					Total
	1	2	3	4	5	
reseau_MNT_2	102475	16826	6744	3501	2206	131751
reseau_MNT_5	48497	9163	5453	2337	2171	67622
reseau_MNT_10	20100	6850	3093	1412	1010	32532
reseau_MNT_25	9427	5209	3153	299		18089
reseau_MNT_50	6218	3580	2137			11935
reseau_MNT_100	5007	1935	2137			9079
reseau_MNT_250	3074	2428				5502

Nombre de branches	Ordre de Strahler					Total
	1	2	3	4	5	
reseau_MNT_2	885	399	158	107	73	1622
reseau_MNT_5	470	188	94	57	56	865
reseau_MNT_10	179	71	53	25	8	336
reseau_MNT_25	67	34	26	1		128
reseau_MNT_50	29	19	9			57
reseau_MNT_100	15	6	8			29
reseau_MNT_250	6	5				11

D-3 : Tables récapitulatives de l'analyse des réseaux selon la classification de Strahler



RECUEIL DE DONNEES TERRAIN

Bassin versant :	Valescure	Sous bassin versant :	Cartaou
Commune :	Peyrolles	Département :	Gard (30)

Fiche caractéristique de la ravine :		PRA16	
Date :	20.04/07	N° BD ravines :	16

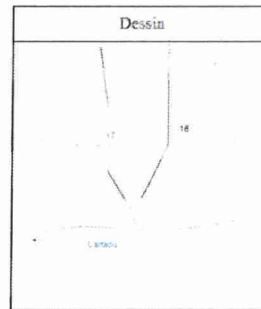
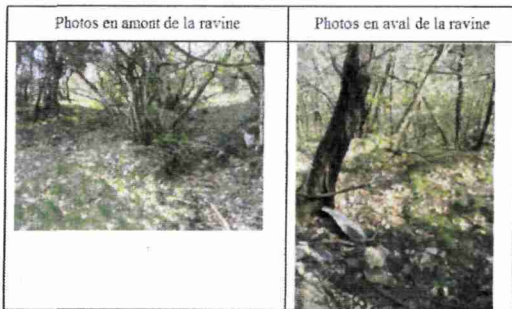
GPS :	Trumble	Système de géoréférencement :	Lambert II Etendu
Coordonnées :	X	Y	

Réalisés par :	Pierre-Alain AYRAL Julian GILLE
----------------	------------------------------------



Morpho	Ravine	Largeur (cm)	Profondeur (cm)	Profondeur/Largeur	Hydrologie	Débit estimé	Végétation	Nb photos	amont	aval
1	2	150	40	0.27	0	/	1	2	1	1

Commentaires	

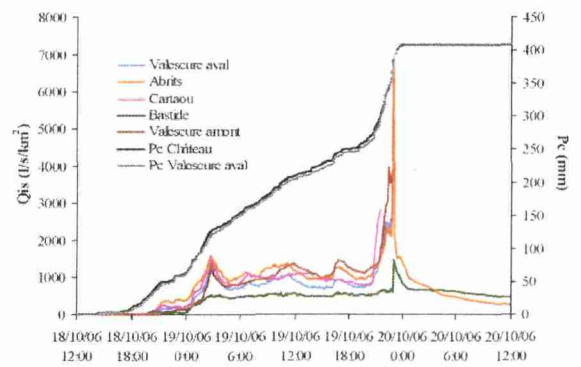
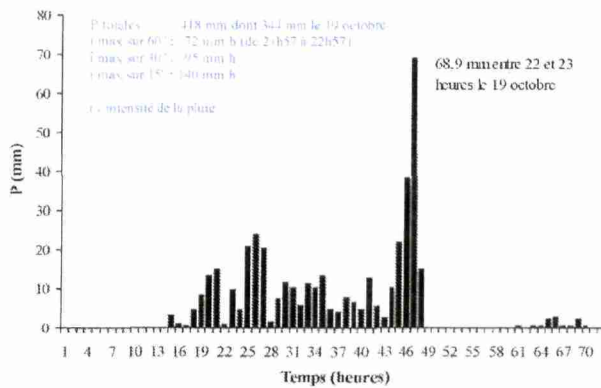


Tâches réalisées :	Tâches à accomplir :
- Mesure de la section avec un metre	

E-2 : Fiche caractéristique d'une ravine (format html)

L'évènement météorologique du 18-20 octobre 2006

Un épisode pluviométrique plus sévère que celui de septembre 2002 s'est produit dans la Vallée Obscure. En 72 heures, les précipitations totales sont de 418 mm dont 344 mm pendant une journée. Pour cet épisode, c'est le ruisseau du Valat du Cartaou qui a eu la réponse hydrologique la plus rapide. Les débits atteints sont estimés à 25,9 m³/s au niveau de la station du Valescure aval. Des débits très abondants et particulièrement violents ont conduit à une érosion mécanique et des transports solides, en réponse à des précipitations intenses pendant quelques heures. Il semble que localement, des drains plus ou moins actifs se soient incisés. Toutefois, un ruissellement de surface généralisé sur les versants n'a pas été observé [Martin *et al.*, 2007].



Qis : Débit instantané spécifique
 Pc : Pluies cumulées



Dépôt de matériaux et colmatage des buses en arrière du gué sur le Cartaou



Gué sur le ruisseau de Cartaou après l'intervention d'une entreprise pour déboucher les buses (23 octobre 2006)

E-3 : Evènement météorologique d'octobre 2006

Annexe IV : Spécifications techniques

Ces spécifications s'adressent aux utilisateurs de solutions ArpentGIS complètes, composées du Pocket PC Dell Axim, du récepteur GPS GlobalSat BC337 et des logiciels ArpentGIS et ArpentGIS-PC

Pocket PC Dell Axim X51*	
Processeur :	Intel X-Scale 416 M-hz
Mémoire RAM / ROM :	64Mo / 128 Mo
Transfert des données :	Câble de synchronisation USB
Système d'exploitation :	Microsoft Windows Mobile 5.0
Ecran :	Tactile - LCD TFT couleur 16 bits transflectif 3.5" (utilisables même en plein soleil) - 240x320 pixels - 65536 couleurs.
Navigaton :	Bouton de navigation à 5 directions
Boutons de programme :	Calendrier, contacts, messagerie, accueil
Boutons :	Marche/arrêt, enregistrement vocal, réinitialisation
Compartiment d'extension :	1 compartiment pour carte CF type II (utilisé par carte GPS) 1 compartiment pour carte mémoire SD Card
Port et connecteurs	Bluetooth, Infrarouge, câble synchro, écouteurs stéréo
Poids et dimensions :	165g, 73x16,9x119 mm
Alimentation :	Batterie amovible/rechargeable Lithium-Ion 1100mAh
Batterie de sauvegarde :	Oui (rechargeable)
Applications :	Calendrier, contacts, tâches, dictaphone, notes, Pocket Word, Pocket Excel, Pocket Internet Explorer, Windows Media Player, Calculatrice...
Accessoires :	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Valise de transport antichoc et étanche à 100% ▪ Câble allume-cigare, pour la charge de la batterie pendant le transport ▪ Chargeur de batterie sur secteur (220V) ▪ Câble USB de transfert des données avec un ordinateur ▪ Logiciel Microsoft ActiSync pour le transfert de données avec l'ordinateur ▪ Pochette étanche (utilisation sous la pluie) ▪ Carte d'extension mémoire SD Card (en option)

Récepteur GPS GlobalSat BC-337*	
Reception	20 canaux, L1, C/A code
Intervalle d'enregistrement	1 Hz
Temps d'acquisition :	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réacquisition : 0,1s env. ▪ « Hot start » : 1s env. ▪ « Warm start » : 38s env. ▪ « Cold Start » : 42s env.
Précision positions :	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mode autonome : 10 m 2D RMS sans SA ▪ EGNOS/WAAS : 5m 2D RMS
Précision vitesse et synchro :	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vitesse : 0,1m/s, sans SA ▪ Synchro : 1 µs
Contraintes dynamiques :	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Altitude : 18000 m ▪ Vitesse : 515 m/s
Contraintes physiques :	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Température d'utilisation : -10°C à +70°C ▪ Température de stockage : -40°C à +80°C ▪ Humidité : 5 à 95%, sans condensation
Antenne :	Intégrée, active. Prise antenne externe MMCX
Consommation électrique :	90mA à 3,3V DC +/- 10% - Alimenté par le Pocket PC
Dimensions	83x42,8x13,3mm
Communications :	Protocole NMEA 0183, 4800,5N1, Interface compact Flash type I
Accessoires :	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Antenne magnétique externe (en option) ▪ Logiciel de configuration

* : Ces spécifications peuvent être sujettes à des modifications de la part des constructeurs sans préavis.

E-4 : Fiche caractéristique du GPS Trumble



Résumé

La prédiction d'événements hydrologiques extrêmes sur des bassins nécessite d'avoir une bonne connaissance du réseau hydrographique. Lors des événements « type cévenol » auxquels la région est sujette, l'hypothèse est faite que le réseau temporaire concentre les eaux de ruissellement superficiel, ce qui permet d'envisager que certaines ravines contribuent activement à la dynamique des eaux sur le bassin versant. A l'échelle du réseau non permanent, le réseau cartographique de l'Institut de Géographie National (IGN) n'est pas suffisamment détaillé. Dans la mesure où la méthode utilisée par l'IGN pour la mise à jour du réseau hydrographique est la photo-interprétation et avec l'avènement des images satellites à Très Haute Résolution Spatiale (THRS), il semble donc important d'évaluer l'apport de ces images satellites vis-à-vis de cette thématique.

Cette étude va i) définir le fonctionnement hydrologique du bassin versant et tenter de faire un état de l'art des méthodes actuelles pour déterminer le réseau hydrographique, ii) proposer une méthodologie basée sur une fusion d'informations issues des images satellites et de diverses sources disponibles (MNT, terrain) pour évaluer si le drain est potentiel ou réel, iii) chercher à dégager d'une part l'intérêt de telles images satellites pour l'extraction du réseau hydrographique réel (permanent ou non, actif lors des événements hydrologiques extrêmes), et d'autre part, l'utilité d'informations contextuelles pour s'affranchir des limites rencontrées lors de la photo-interprétation des images satellites.

Mots clés

Réseau hydrographique, ravine, images QuickBird (QB), scan25 de l'IGN, Modèle Numérique de Terrain (MNT), photo-interprétation, relevés GPS, Système d'Information Géographique (SIG), télédétection, crues éclair, bassin versant du Gardon d'Anduze, Vallée Obscure.