



Identification automatique des vallées glaciaires à partir d'un modèle numérique de terrain

Mémoire

Bilel Bakari

Maîtrise en sciences géomatiques - avec mémoire
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada



Identification automatique des vallées glaciaires à partir d'un modèle numérique de terrain

Mémoire

Bilel Bakari

Maitrise en sciences géomatiques – avec mémoire

Maître ès sciences (M. Sc.)

Sous la direction de :

Éric Guilbert, directeur de recherche
Bernard Moulin, codirecteur de recherche

Résumé

La vallée glaciaire est une forme de relief associée aux montagnes qui ont été affectées par une glaciation régionale. L'étude de cette forme de relief aide les chercheurs à mieux connaître le développement du système glaciaire régional qui reflète les changements climatiques globaux. La tâche d'identification de ces formes sur un modèle numérique de terrain est primordiale pour toutes les études géomorphologiques ou environnementales. Avec le développement des Systèmes d'Information Géographique et des outils informatiques, l'automatisation de cette tâche devient une solution pour la diminution de la durée et du coût exigés par la méthode manuelle.

Cependant, les méthodes automatiques actuelles comme la classification morphométrique ou l'analyse d'images par objets (*Object Based Image Analysis*) sont limitées pour l'identification d'une forme de relief entière comme la vallée glaciaire. Ces méthodes sont basées en général sur des approches de classification du terrain en éléments de relief sans la prise en considération du contexte géomorphologique.

À cet égard, nous avons comme objectif le développement d'une méthode automatique d'extraction des formes des vallées glaciaires. Notre méthode est basée sur l'idée de la saillance issue de la cognition humaine en matière des formes de relief. Nous admettons que la vallée glaciaire est définie par l'assemblage spatial du fond et des versants dans un contexte géomorphologique donné. L'identification de ces formes est réalisée à partir de l'identification des cours d'eau et des contreforts comme éléments saillants de ces composants et par leur assemblage autour d'une saillance globale, le talweg.

Nous avons appliqué notre méthode automatique sur des modèles numériques de terrain de différentes zones glaciaires parmi lesquelles la vallée Jacques-Cartier au Québec. Nous avons obtenu des entités spatiales qui caractérisent l'étendue géographique de la vallée glaciaire et de ses éléments composants accompagnées de leurs indicateurs de forme.

Abstract

The glacial valley is a landform associated with mountains that have been affected by regional glaciation. The study of this kind of valley helps researchers to better understand the development of the regional glacial system that reflects global climate change. The task of identifying these forms on a digital elevation model is essential for all geomorphological or environmental studies. With the development of GIS and IT tools, the automation of this task becomes a solution for reducing the time and cost required by the manual method.

However, current automatic methods like morphometric classification or Object Based Image Analysis are limited when trying to identify an entire landform such as the glacial valley. These methods are generally based on land classification approaches of terrain elements without taking into consideration the geomorphological context.

In this respect, we aim to develop an automatic method for extracting glacial valleys. Our method is based on the idea of salience resulting from human cognition of relief. We admit that the glacial valley is defined by the spatial assembly of the bottom and slopes in each geomorphological context. The identification of these forms is based on the identification of streams and foothills as salient elements of its components and their assembly around a global salience, the thalweg.

We applied our automatic method on digital terrain models of different glacial zones, including the Jacques-Cartier Valley in Quebec. We obtained spatial entities that characterize the geographic extent of the glacial valley and its component elements accompanied with form indicators

Table des matières

Résumé	ii
Abstract.....	iii
Table des matières	iv
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	viii
Liste des abréviations, sigles, acronymes	ix
Remerciements.....	x
Introduction	1
I. Mise en contexte :	1
II. La vallée glaciaire : définition, caractéristique et rôle	2
III. L'identification automatique des formes de relief : pourquoi et comment ?.....	7
IV. Problématique	10
V. Questions de recherche	10
VI. Objectifs de recherche	11
VII. Hypothèse de recherche	11
VIII. Méthodologie	11
IX. Structure du mémoire.....	13
Chapitre 1 : État de l'art	15
I. Introduction.....	15
II. Les méthodes de classification et d'analyse des formes de relief :.....	15
III. Méthode automatique d'identification des vallées	29
IV. Les approches cognitives :.....	36
V. Conclusion.....	37
Chapitre 2 : Méthodologie.....	39
I. Introduction.....	39
II. Modèle conceptuel :	40
III. Modèle opérationnel:.....	47
IV. Conclusion	65
Chapitre 3 : Résultats	67
I. Introduction :	67
II. Implantation :.....	67

III. Résultats :	71
IV. Discussions :	93
V. Conclusion :	95
Conclusion	96
Bibliographies	99

Liste des figures

Figure 1 Les composants d'une vallée glaciaire (Source d'image: www.geoglaciare.net).....	4
Figure 2 Coupe longitudinale au niveau d'une vallée glaciaire	5
Figure 3 le profil en long de la vallée glaciaire	6
Figure 4 Processus de l'étude d'une forme de relief sur un modèle représentatif de la surface	7
Figure 5 Les étapes de la recherche	13
Figure 6 La géomorphométrie et sa relation avec les disciplines de la source et de l'utilisateur final. D'après Pike (1995)	16
Figure 7 Systèmes de classification de la surface en douze éléments de relief (MacMillan & Shary, 2009) ...	18
Figure 8 Modèle représentatif des éléments de relief d'une vallée glaciaire.....	19
Figure 9 La répartition spatiale des composants de la vallée glaciaire (vue de dessus)	20
Figure 10 Les éléments de relief identifiés dans la zone de la vallée Jacques-Cartier.....	21
Figure 11 Les étapes simplifiés de la classification des formes de relief par l'OBIA.....	23
Figure 12 Les valeurs de TPI pour le même point avec trois échelles de calcul.....	26
Figure 13 La carte de classification du terrain par le TPI dans la zone de la vallée Jacques-Cartier au nord du Québec en utilisant 3 échelles : (a) 100m , (b) 500m , (c) 1000m	28
Figure 14 Formation de bacs de distance : le blanc désigne le fond de la vallée et les différentes nuances de gris représentent les bacs de distance dans le sous bassin de drainage du talweg.....	31
Figure 15 Carte de classification par l'indice valléen de la zone de la vallée de la Jacques-Cartier au nord de Québec.....	33
Figure 16 L'extraction du fond de la vallée selon la méthode des ruptures de pente	34
Figure 17 Saillance du contexte.....	41
Figure 18 Fond de la vallée glaciaire	43
Figure 19 Versant de la vallée glaciaire.....	44
Figure 20 Modèle conceptuel représentatif d'une vallée glaciaire (composants, éléments saillants et assemblage spatial).....	46
Figure 21 Modèle opérationnel 1 : extraction des éléments saillants	49
Figure 22 Modèle opérationnel 2 : analyse et interprétation	50
Figure 23 Les étapes d'extraction du réseau de drainage à partir d'un MNT.....	51
Figure 24 Modèle d'extraction du talweg	54
Figure 25 Modèle d'extraction du réseau de crêtes	55
Figure 26 Le réseau des lignes de crêtes dans une vallée.....	56
Figure 27 Modèle d'extraction du fond préliminaire	57
Figure 28 Le fond préliminaire	58
Figure 29 Extraction du fond à partir des ruptures de pente.....	59
Figure 30 Profil d'analyse transversale d'une vallée.....	60
Figure 31 Groupement des points par versant.....	63
Figure 32 Délimitation de la vallée glaciaire.....	64
Figure 33 Localisation de la zone d'étude	72
Figure 34 Le réseau de drainage de la zone classifié avec l'ordre d'Horton.....	73
Figure 35 Les talwegs identifiés dans la zone d'étude classifié selon le gradient de pente.....	75
Figure 36 Les contreforts associés aux talwegs identifiés	77
Figure 37 Contreforts gauches et droits associés au talweg	78

Figure 38 Épaulements gauches et droits associés au talweg	80
Figure 39 Limite de la vallée Jacques-Cartier en 3D	81
Figure 40 La limite des deux vallées identifiées dans la zone d'étude	82
Figure 41 Fond plat délimité dans la vallée glaciaire du Jacques-Cartier	83
Figure 42 les deux vallées glaciaires dans le bassin versant de la rivière Jacques-Cartier : (a) La vallée Jacques-Cartier (b) la vallée Sautariski à la Chute (Arbour, 2008)	84
Figure 43 Localisation de la zone d'étude dans le bassin versant du fleuve du Rhône	85
Figure 44 Réseau de drainage identifié dans la zone d'étude	86
Figure 45 Les contreforts associés au talweg identifié	87
Figure 46 La délimitation de la vallée du Rhône	88
Figure 47 La distribution des sédiments glaciaires dans le bassin du Rhône (Stutenbecker et al., 2016).....	89
Figure 48 La localisation de la troisième zone d'étude (Stillwater Sciences, 2007)	90
Figure 49 Réseau de drainage identifié dans la troisième zone d'étude.....	91
Figure 50 Délimitation de la vallée glaciaire dans la troisième zone d'étude	92

Liste des tableaux

Tableau 1 Caractéristiques des MNT de zones d'études.....	71
Tableau 2 Longueur des talwegs identifiés.....	76
Tableau 3 Moyenne de b et FR associée à chaque talweg	79
Tableau 4 Longueur et la moyenne de gradient de pente des talwegs identifiés	86
Tableau 5 Coefficients de l'allure des contreforts gauches et droits	87
Tableau 6 Les coefficients b et FR des contreforts associés au talweg.....	92

Liste des abréviations, sigles, acronymes

SIG : système d'information géographique

MNT : Modèle numérique de terrain

OBIA: Object-based image analysis

FR : Rapport de forme

b : Coefficient de la loi de puissance

Remerciements

Au terme de ce travail, il m'est agréable de m'acquitter d'une dette de reconnaissance auprès de toutes les personnes dont l'intervention au cours de ce projet, a favorisé son aboutissement.

Je voudrais adresser toute ma gratitude à mon directeur de recherche, Monsieur Éric Guilbert, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance aux membres de mon comité d'encadrement : mon codirecteur Monsieur Bernard Moulin et Monsieur Patrick Lajeunesse. Je les remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

Mes remerciements s'adressent aux membres du Jury qui m'ont fait l'honneur de participer à ma soutenance et Monsieur Frédéric Hubert qui m'a fait l'honneur d'avoir évaluer mon mémoire.

Je tiens aussi à remercier tous ceux qui m'ont toujours soutenu et qui ont pris part de leur temps pour m'aider à élaborer ce travail : mes amis, mes collègues et tout le staff du département géomatique de l'université Laval.

Mes derniers remerciements et non les moindres, iront à mes proches, et en particulier à mon père, ma mère, mes frères et sœurs qui m'ont toujours apporté leur soutien sans faille. Je les remercie de toute l'affection et tout l'amour qu'ils m'ont témoigné.

Introduction

I. Mise en contexte :

La surface de la Terre est un objet naturel indispensable à la survie de l'être humain. Elle nous présente un milieu d'habitat, une ressource économique et un élément fondamental de notre écosystème. Cette surface particulièrement fascinante est dotée d'une irrégularité de forme et d'altitudes constituant ainsi ce que nous appelons le relief. À ce titre, l'étude des formes de relief présente une discipline scientifique qui aide l'être humain à comprendre et mieux agir dans son environnement. Une telle étude exige tout d'abord l'étape de l'identification de la forme sur le terrain ou sur un modèle représentatif de surface. Notre projet de recherche consiste à automatiser l'étape de l'identification d'une forme particulière de relief sur un modèle représentatif de surface qui va être dans notre cas un modèle numérique de terrain (MNT). La forme de relief que nous allons étudier est la vallée glaciaire ; une vallée qui caractérise les régions glaciaires avec des particularités reliées au processus de formation et au climat froid.

Les formes de relief sont largement reconnues comme des objets naturels qui divisent la surface de la Terre en entités spatiales fondamentales. Nous pouvons définir ces formes comme toute caractéristique physique de la surface de la Terre ayant une forme distinctive reconnaissable (Evans, 2012). Autrement, et d'une manière plus subjective, une forme de relief peut être définie comme une unité de terrain créée par des processus naturels de telle sorte qu'elle puisse être reconnue et décrite en termes d'attributs typiques où qu'elle puisse se produire (Evans, 2012). Le relief est intrinsèquement un phénomène très complexe. Il résulte de la combinaison de processus naturels variés, notamment des forces tectoniques, et des facteurs lithologiques et érosifs. Beaucoup d'autres facteurs, par exemple le climat, contribuent à la diversification de la surface terrestre. En effet, la surface de la Terre est structurée en relief à cause de l'influence cumulative des processus géomorphologiques, géologiques, hydrologiques, écologiques et de formation du sol qui ont agi sur elle au fil du temps (Schillaci et al., 2015).

Les différentes origines de la formation, la complexité des formes et les dimensions variables des unités font de l'étude des formes de relief une branche scientifique indépendante appelée Géomorphologie. C'est la science qui a pour objet la description et l'explication des formes du relief terrestre. D'après les géomorphologues, nous pouvons classer les formes de relief selon plusieurs

critères comme le processus de formation ou la zone climatique. La taxonomie des formes de relief peut varier selon le niveau de détail utilisé dans la classification, une forme de relief unitaire peut contenir d'autres formes de reliefs si on diminue le niveau de granularité (Band, 1999).

Les modèles numériques de terrain avec leurs différentes résolutions offrent aux chercheurs l'opportunité d'étudier relativement les formes de relief sans avoir à sortir sur le terrain. Selon la résolution, les spécialistes peuvent effectuer des classifications et des mesures sur les formes de relief. Les modèles numériques de terrain offrent aussi la possibilité de développer des modèles de simulation qui présentent l'évolution de la forme au cours du temps ou dans des cas particuliers comme les inondations ou les séismes.

En face de l'importance de l'étude des formes de relief et l'accès facile aux données présentées par les modèles numériques de terrain, la tâche d'identification de ces formes est désormais primordiale pour les spécialistes du domaine. La méthode manuelle demeure la plus utilisée pour exécuter une telle tâche. Cependant, le résultat dépend de l'expertise de l'utilisateur et peut prendre du temps lorsqu'il s'agit de traiter de grandes zones. Une méthode automatique a l'avantage de fournir une approche systématique incluant des indicateurs vérifiables. Les spécialistes auront recours de plus en plus aux méthodes automatiques qui consomment moins de temps et qui conviennent aux données massives.

À cet égard, notre projet de recherche consiste à étudier une forme de relief complexe, ayant une grande importance pour le géomorphologue, qui est la vallée glaciaire. Jusqu'à maintenant, à notre connaissance il n'y a aucune méthode automatique d'identification de la forme d'une vallée glaciaire. Notre travail comporte l'étude de la vallée glaciaire, la présentation des méthodes automatiques actuelles et le développement d'une méthode automatique appropriée aux vallées glaciaires.

II. La vallée glaciaire : définition, caractéristique et rôle

1. Définition

Pendant la dernière période glaciaire, qui s'est terminée il y a dix mille ans, 32% de la surface terrestre était recouverte de glaciers. Actuellement et dans la période de réchauffement, cette surface ne dépasse pas 10% (Stahr & Langenscheidt, 2015). Le glacier fondu n'a pas disparu sans laisser sa trace sur le relief terrestre. Tout un système de relief glaciaire a été créé. Parmi les formes de relief

caractéristiques du système glaciaire se trouve la vallée glaciaire, une forme de relief associée aux montagnes qui ont été affectées par une glaciation régionale (Coles, 2014). La vallée glaciaire est connue aussi sous les termes de vallée en U ou vallée en auge. Les deux noms décrivent la forme de la vallée assez différente à celle des autres vallées.

2. Formation

Le processus de formation d'une vallée glaciaire est exclusivement relié au système glaciaire et non pas au système fluvial, au contraire des autres types de vallées. L'altération du substratum rocheux (une roche sur laquelle reposent des sédiments meubles) sous l'effet de la masse et du mouvement du glacier entraîne la formation d'un fossé assez large avec une forme d'auge en U (Stahr & Langenscheidt, 2015). Dépendamment de l'âge et de l'ampleur de l'érosion, une vallée glaciaire peut garder sa forme originale ou subir une déformation partielle ou totale. La nature du substratum rocheux, sa structure et la tectonique locale (déformation de la structure des roches sous l'effet des séismes locaux) jouent aussi un rôle dans l'évolution de la forme d'une vallée glaciaire au cours du temps (García Ruiz, 2016).

En général, le glacier érode la surface de la zone montagneuse d'une manière uniforme. En passant sur une vallée, le glacier sera confiné dans ses murs. Conséquemment, le glacier aura tendance à approfondir et à élargir le fond de la vallée. De ce fait, la vallée en V sera convertie en vallée en U puisque la forme en U offre la moindre résistance au frottement au glacier en mouvement (García Ruiz, 2016). Le glacier a une viscosité et une section transversale beaucoup plus grandes qu'une rivière, son cours a des coudes moins nombreux et plus larges, ce qui rend la vallée plus droite et plus lisse. Les parois de la vallée glaciaire peuvent être presque verticaux et peuvent être striées par des blocs entraînés par le glacier et le fond de la vallée peut être recouvert de moraines.

3. Composants

Comme elle est une forme de relief assez spécifique et complexe, la vallée glaciaire possède deux types de profil, le profil en travers et le profil en long. En étudiant les deux profils, nous pouvons définir les éléments suivants :

a. Profil en travers :

En traversant une vallée glaciaire suivant une coupe transversale, nous pouvons dire qu'elle est composée principalement d'un fond plat entouré par des versants (figure1) (Anderson et al, 2006). La direction de la pente des versants est orientée toujours vers le fond. Leur pente augmente en allant du fond vers la limite de vallée. Nous pouvons distinguer deux types de versant : la pente douce formée généralement par des cônes alluviaux ou des éboulis et le versant abrupt qui forme la paroi de la vallée avec une pente raide. Les versants sont marqués par des arêtes descendues des sommets latéraux appelées contreforts. Vers les sommets des contreforts se trouvent les épaulements qui sont des portions sensiblement horizontales marquant la limite de l'effet du glacier sur le rocher et la limite de la vallée glaciaire entre autres. Dans le relief glaciaire, nous pouvons trouver deux types d'épaulement : les épaulements simples et les épaulements à pommeau. L'épaulement simple est horizontal ou légèrement descendant au contraire de l'épaulement à pommeau qui se termine, peu avant le rebord d'auge, par une remontée à un petit sommet appelé pommeau (Anderson et al., 2006).

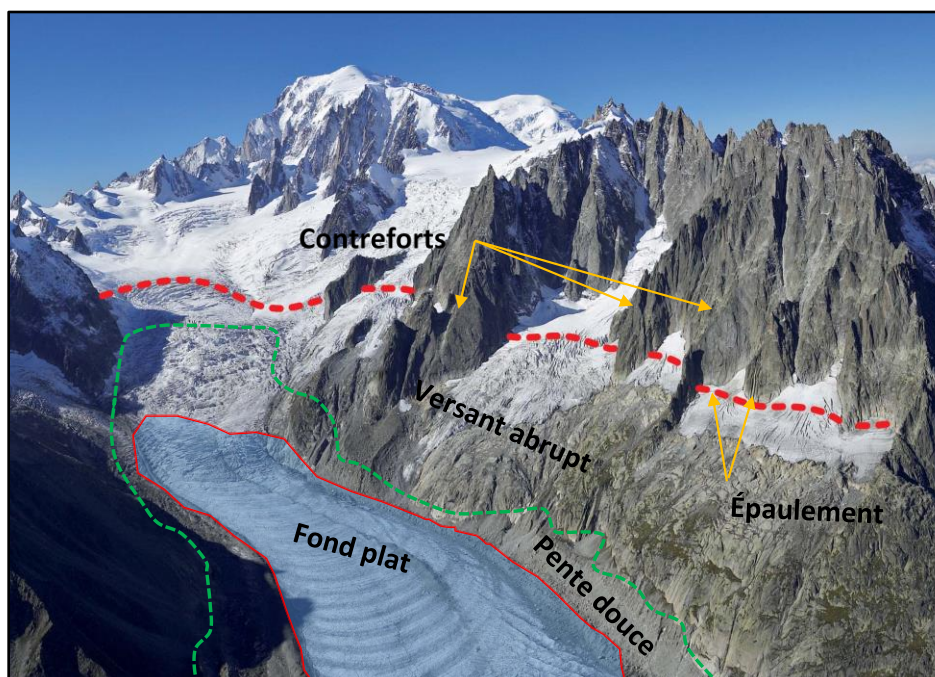


Figure 1 Les composants d'une vallée glaciaire (Source d'image: www.geoglaciaire.net)

Au niveau du fond, nous trouvons des dépôts sédimentaires résultant de l'érosion glaciaire appelés moraines (figure 2). Selon leur position par rapport au fond de la vallée, nous pouvons apercevoir des moraines latérales, frontales et d'autres centrales. Bien qu'elles forment des déformations au niveau

du fond, les moraines présentent des indicateurs de l'érosion glaciaire. Étant donné que l'épaisseur de la glace est le facteur principal dans le processus d'approfondissement, les glaciers plus petits qui sont connectés au glacier principal érodent la surface montagneuse d'une manière moins rapide. Lorsque les glaciers fondent, les creux de l'affluent sont laissés comme vallées suspendues sur les murs de la vallée glaciaire. Les cours d'eau postglaciaires peuvent former des cascades à partir de l'embouchure de ces vallées suspendues (Stahr & Langenscheidt, 2015).

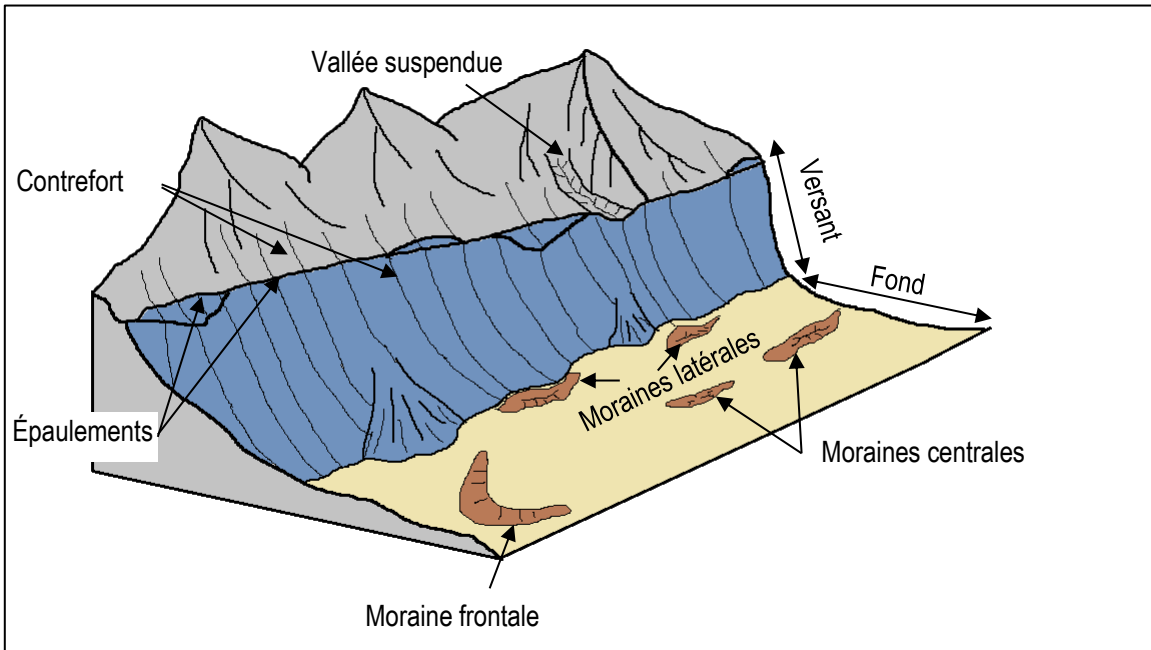


Figure 2 Coupe longitudinale au niveau d'une vallée glaciaire

b. Le profil en long :

Selon la nature du substratum traversé par le glacier, le profil en long de la vallée glaciaire présente des types différents de déformation de la surface. Nous pouvons distinguer deux types de formes dans la vallée : les ombilics et les verrous (figure 3) (Seddik et al., 2009). Les ombilics sont des formes de surcreusement représentées par des cuvettes limitées dans leur partie aval par des bosses topographiques (García Ruiz, 2016). Dans la période postglaciaire, les ombilics peuvent être occupés par des lacs. L'autre forme est le verrou, c'est une barre rocheuse dure localisée dans le fond. Grâce à la dureté de leur roche composante, les verrous résistent en face de l'érosion glaciaire en formant des bosses topographiques situées parfois dans la partie aval des ombilics.

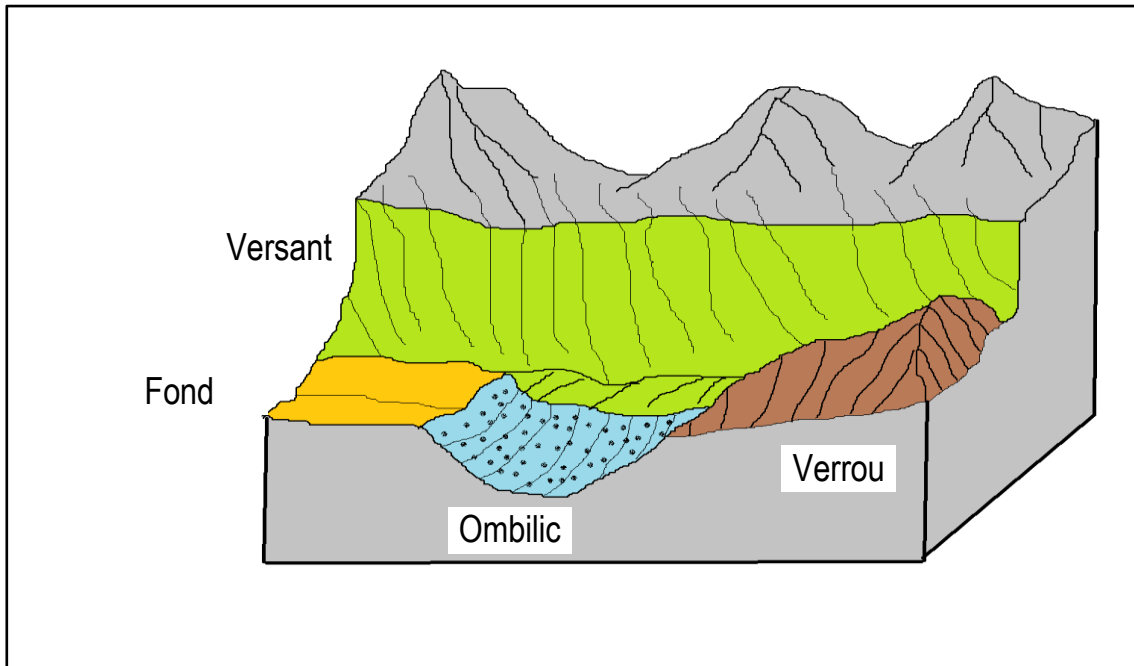


Figure 3 le profil en long de la vallée glaciaire

4. La forme et les composants : la clé pour identifier une vallée glaciaire

Pendant le 19^e siècle, les géomorphologues étaient habitués à utiliser la forme de la vallée pour comprendre le processus de la formation de cette forme de relief. Ils établissaient une interprétation assez simple basée sur la description de la géométrie de la vallée (Harbor, 1992). Une forme en U était reliée au système glaciaire et la forme en V au système fluvial. À partir du dernier siècle, cette interprétation a été remise en question. La question était : est-ce à partir de la forme seulement qu'on peut distinguer une vallée fluviale d'une vallée glaciaire (Livers & Wohl, 2015)?

Pour répondre à cette question, les géomorphologues ont commencé les études sur l'évolution d'une vallée en fonction du temps, de l'érosion ou des événements tectoniques. La conclusion que nous pouvons tirer de ces recherches est qu'une vallée glaciaire peut se transformer en une vallée fluviale et vice versa. La circulation de l'eau dans une vallée glaciaire avec un substratum moyennement dur transforme le fond de la vallée glaciaire avec le temps vers une vallée fluviale imbriquée dans l'ancienne vallée. L'érosion des versants et le transport des sédiments vers les deux côtés du fond avec une ampleur faible d'érosion au niveau du fond donnent aux vallées glaciaires une forme en V. De l'autre côté, toutes les vallées fluviales affectées par une glaciation se transforment en vallée

glaciaire en U. Dans une zone montagneuse, le climat change de sorte qu'une zone peut subir plusieurs cycles de glaciation et de déglaciation. Cela affecte directement la nature des formes de relief dans cette zone (Stahr & Langenscheidt, 2015).

Il est possible que la forme actuelle d'une vallée ne renseigne pas sur la totalité des processus antérieurs à l'origine de sa génération. Une vallée glaciaire peut avoir été une vallée fluviale dans le passé et vice versa. Toutefois, cette forme renseigne relativement sur la nature actuelle de la vallée qui nous intéresse dans notre projet. Pour cela, l'identification de la vallée glaciaire sera faite à partir de sa forme actuelle et des différents éléments de relief la composant (fond et versants) dans un modèle numérique de terrain. L'identification de ces éléments spécifiques aux vallées glaciaires (contreforts et épaulements) diminue la relativité attribuée à la définition de la vallée par sa forme seulement.

III. L'identification automatique des formes de relief : pourquoi et comment ?

L'étude d'une forme de relief comme la vallée glaciaire sur un modèle numérique de terrain exige avant tout la délimitation de son étendue géographique. Toutes sortes d'analyses thématiques sont plus pertinentes lorsqu'elles sont appliquées sur l'étendue de la forme de relief seulement et non pas sur tout le terrain. De plus, la mesure des dimensions de la forme est irréalisable sans avoir défini son étendue géographique. Comme nous travaillons sur un modèle numérique de terrain, une autre étape s'impose avant l'étape de la délimitation qui est l'identification de la forme de relief. Cette étape consiste à déterminer si la forme de relief existe dans le terrain ou non. Autrement dit, c'est le fait d'approuver la présence d'une forme de relief dans une partie du modèle numérique du terrain, mais sans avoir défini ses limites géographiques dans la majorité des cas. L'enchaînement suivant (figure 4) résume les étapes habituelles manuelles utilisées pour étudier une forme de relief sur une carte ou un modèle numérique du terrain (Schillaci et al., 2015).

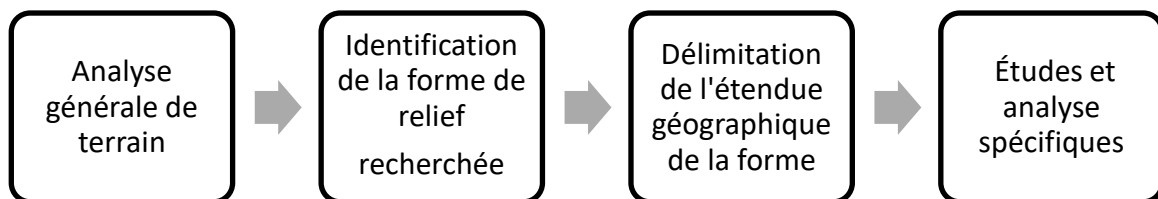


Figure 4 Processus de l'étude d'une forme de relief sur un modèle représentatif de la surface

Les deux étapes de l'identification et la délimitation de la forme de relief peuvent être jumelées dans une seule étape dans les cas des formes de relief simples. Dans ce cas, la forme est définie par un seul élément de relief et l'identification de cet élément de relief permet entre autres la délimitation de toute la forme. Cependant, notre cas est une forme de relief assez complexe qui présente parfois des discontinuités et des déformations dans ses éléments composants. L'étude d'une vallée glaciaire sur un modèle numérique de terrain nécessite tout d'abord son identification et sa délimitation par la suite. Dans cette section, nous présenterons brièvement les deux types de méthodes d'identification des formes de relief existantes utilisées pour cet objectif.

1. Méthode manuelle

C'est la manière classique d'identification. Elle nécessite une connaissance de terrain pour localiser les vallées en U sur une carte ou sur un modèle numérique de terrain. En général, dans la plupart des systèmes manuels de classification des reliefs, un expert connaissant les concepts théoriques applicables à la différenciation des reliefs en général et connaissant bien les types de relief locaux, interprète les informations disponibles sur la surface terrestre pour les diviser en entités spatiales distinctes et décrire les différentes classes de formes de terrain (Alain Dupéret, Benoît Deffontaines, 2014). Un expert prend en compte le contexte régional, le contexte physiographique, le contexte de processus géomorphologique et d'autres formes de contexte pour arriver à une interprétation d'une forme de relief (Wang et al., 2010). La délimitation des formes peut se baser sur des caractéristiques spécifiques du terrain, mais elle dépend beaucoup de l'expérience de la personne qui fait l'identification.

La méthode classique d'identification des formes de relief demeure limitée à nos jours. Cette méthode qui demande beaucoup d'expertise et de temps ne peut pas gérer des grands volumes de données avec des grandes résolutions. Il faut chercher des outils pour automatiser l'identification des formes et pour classifier le terrain. Dans cette section, nous allons citer les principales méthodes automatiques actuelles utilisées dans l'identification des formes de relief.

2. Méthodes automatiques

Les méthodes automatiques d'identification des formes de relief sont des méthodes développées dans le but d'accélérer, simplifier ou de remplacer complètement la méthode manuelle. La majorité des méthodes automatiques sont basées sur la géomorphométrie qui est la science de l'analyse quantitative de la surface terrestre (Florinsky, 2017). C'est une approche moderne, analytique et cartographique pour représenter la topographie de la terre par la manipulation informatique de l'élévation du terrain (Pike et al., 2009).

L'analyse quantitative de terrain peut être basée sur le pixel comme dans la classification morphométrique ou elle peut être basée sur l'objet comme dans l'approche OBIA (Object-based image analysis). D'une part, la classification morphométrique est un outil automatique de classification de surface en éléments de relief en se basant sur un critère comme la pente ou la courbure. Cette méthode n'est pas capable d'identifier une forme de relief entière aussi complexe que la vallée glaciaire. Une forme de relief peut contenir une multitude d'éléments de relief qui diffèrent dans leur agencement spatial selon la dimension de la forme de relief et selon la nature des roches de la surface (Schillaci et al., 2015). D'autre part, l'OBIA (*Object Based Images Analysis*) est la méthode la plus utilisée présentement dans la classification des formes de relief. Elle se base sur la classification des formes par classes d'objets au contraire des autres méthodes de la géomorphométrie qui utilisent le pixel (Benz et al, 2004). Il s'agit d'une décomposition hiérarchique du paysage par une analyse multi-échelle. Ensuite, la classification des formes de relief se fait à partir d'une délimitation des objets homogènes résultant de la segmentation d'image (Anders et al., 2011). Pour appliquer cette méthode, il faut passer toujours par des réglages selon le contexte, l'échelle et la résolution des données. L'utilisateur doit avoir une connaissance du terrain et une expertise du domaine pour manipuler une telle méthode.

Une autre approche automatique d'identification des formes de relief est le modèle cognitif développé à partir des définitions théoriques des formes de relief et à partir de la perception humaine. Cette approche s'inspire de l'étude de processus cognitifs pour développer des algorithmes d'identification des formes dans le domaine de la géomorphologie. Il s'agit d'une représentation des formes de relief à partir des éléments saillants caractéristiques de ces formes (Guilbert et al., 2016). Cependant, cette méthode n'est pas souvent utilisée. Elle demande un apprentissage des caractéristiques de la forme et de ses éléments saillants. De plus, il n'y a pas d'outils permettant de transformer la perception humaine de la saillance en des algorithmes d'extraction des formes de relief.

IV. Problématique

L'identification des formes de relief à partir d'un modèle numérique de terrain demeure d'une manière ou d'une autre une procédure manuelle ou semi-automatique. L'automatisation de cette tâche devient de plus en plus indispensable surtout avec le grand volume des données disponibles actuellement dans le domaine des SIG.

L'automatisation des méthodes existantes peut réussir pour des formes de relief spécifiques qui ont une géométrie simple et facile à détecter avec les méthodes d'analyse mathématiques de la surface. Les formes de relief plus complexes posent plus de difficultés. Il faut une méthode robuste pour la détection d'une forme de relief composée de plusieurs éléments de relief formant un assemblage spatial qui varie en fonction du contexte géomorphologique ou de la durée d'existence de la forme. Idéalement une telle méthode devrait prendre en compte la nature de la forme de relief, la variation de la géométrie de la forme en fonction du contexte géomorphologique et s'appliquer indépendamment de la résolution des données. Cependant, une telle méthode n'existe pas présentement. Les méthodes basées sur la géomorphométrie sont capables uniquement de classer le terrain en des éléments de relief catégorisés à partir des systèmes prédéfinis. L'OBIA nécessite l'intervention de l'utilisateur pour paramétrer les attributs et les seuils utilisés pour détecter les formes de relief.

Aussi, la détection automatique de la forme d'une vallée glaciaire à partir d'un MNT avec les méthodes existantes est irréalisable. Une telle forme de relief est très complexe dans sa composition, elle peut présenter beaucoup d'anomalies comme par exemple les verrous glaciaires. La morphologie de la vallée peut varier en fonction de son âge ou encore en fonction d'autres facteurs comme l'érosion et les forces tectoniques. L'identification automatique de la forme de la vallée glaciaire pose vraiment un défi à la fois exigeant et motivant.

V. Questions de recherche

D'après ce que nous avons lu, l'identification automatique d'une forme de relief comme la vallée glaciaire avec les méthodes existantes est irréalisable. Les problèmes de la nature complexe des formes, du contexte et de l'échelle posent des limites face à l'automatisation de la tâche. Néanmoins, il se trouve une autre méthode qui paraît robuste pour faire l'automatisation. Cette méthode utilise la

saillance des formes de relief pour faire l'extraction à partir d'un MNT. Cependant, cette méthode ne possède pas encore des bases pratiques bien définies. Face à ces problèmes, nous pouvons poser les questions suivantes :

- Comment pouvons-nous identifier des formes de relief complexes comme la vallée glaciaire à partir d'un modèle numérique de terrain en utilisant les éléments saillants?
- À quel point la méthode basée sur la saillance pourrait-elle réussir la délimitation de la vallée glaciaire et ses composants?

VI. Objectifs de recherche

Face aux limitations des méthodes automatiques d'identification des formes de relief existantes et au potentiel de la méthode basée sur la saillance, nous visons dans ce projet les objectifs suivants :

- Utiliser le concept de saillance pour réaliser la tâche d'identification de la forme d'une vallée glaciaire à partir d'un modèle numérique de terrain.
- Proposer une méthode automatique, robuste et rapide capable de remplacer la méthode manuelle dans la délimitation de la forme de vallée glaciaire.

VII. Hypothèse de recherche

Les formes de relief comme la vallée glaciaire sont définies par l'assemblage spatial des éléments de relief dans un contexte géomorphologique donné. L'identification de ces formes de relief pourrait être réalisée à partir de l'identification de ses éléments saillants et par l'assemblage de ces éléments autour des saillances.

VIII. Méthodologie

Pour mener à bien notre recherche, nous sommes passés par trois étapes essentielles illustrées dans la figure 5.

Tout d'abord, nous avons commencé notre recherche par une revue de littérature dans laquelle nous avons concentré notre prospection sur deux sujets principaux. Le premier sujet concerne les méthodes d'identification automatiques des formes de relief et les méthodes de segmentation de terrain

existantes. Nous avons étudié les principes, l'application et les limites de ces méthodes. En parallèle, nous avons étudié la vallée glaciaire afin de concevoir quelle méthode est capable de l'identifier à partir d'un modèle numérique de terrain. Cette étape nous a permis d'évaluer les méthodes existantes, de définir notre hypothèse de recherche et de fixer nos objectifs.

Ensuite, nous sommes passés à l'étape de conception avec la construction de deux modèles. Le premier modèle est un modèle conceptuel qui permet la définition de l'assemblage spatial des composants de la vallée glaciaire ainsi que ses éléments saillants. C'est une représentation de la vallée glaciaire qui nous aide à mieux comprendre cette forme de relief. Le deuxième modèle est un modèle opérationnel qui présente le fruit de notre perception d'une méthode d'identification automatique de la vallée glaciaire. La méthode présentée par le modèle permet l'extraction des composants et des éléments saillants de la vallée déjà définis dans le premier modèle. Ce modèle définit toutes les étapes qui permettent la réalisation de l'identification et la délimitation de la vallée glaciaire à partir d'un MNT.

Enfin, nous avons utilisé les résultats de la conception pour chercher les outils convenables et pour programmer nos propres outils afin de développer un modèle automatique d'identification des vallées glaciaires à partir d'un MNT. Nous avons appliqué le modèle obtenu sur trois zones d'étude et nous avons soigné les résultats pour évaluer et discuter notre travail.

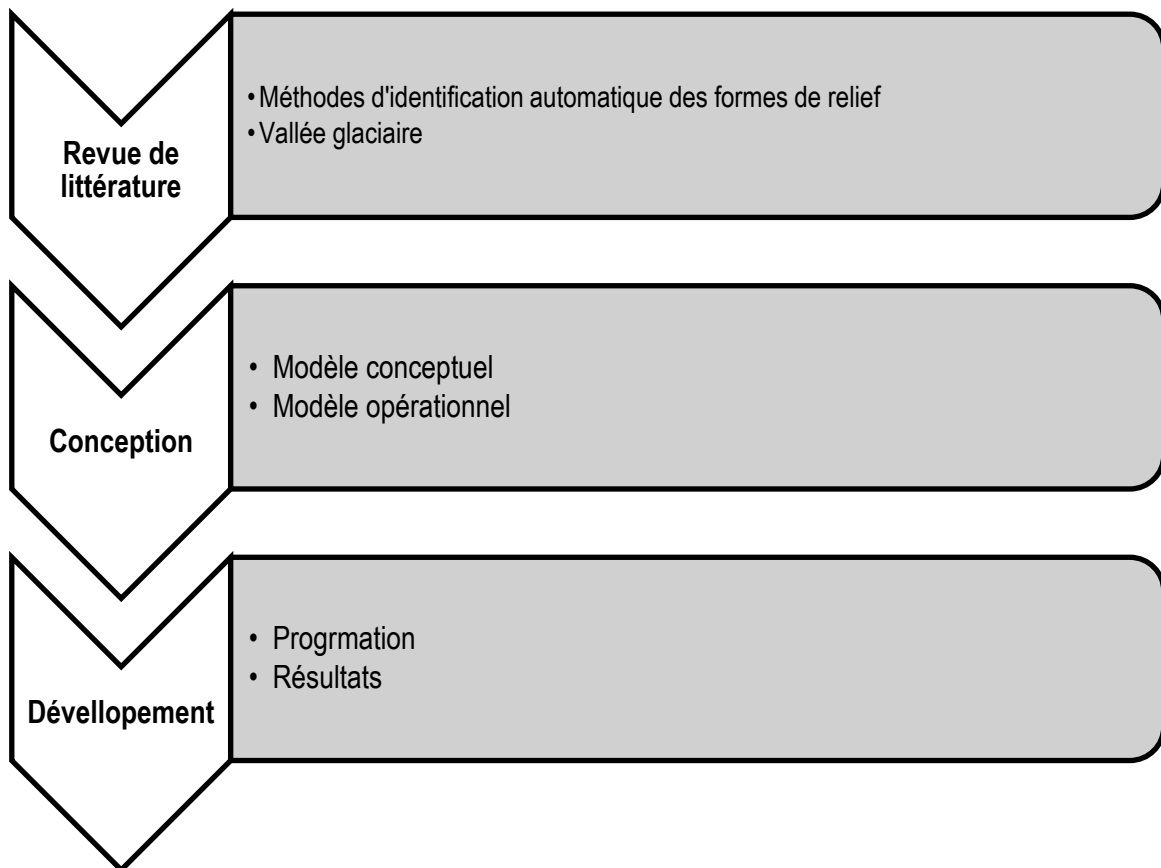


Figure 5 Les étapes de la recherche

IX. Structure du mémoire

Dans le reste de ce document, le mémoire sera organisé sous la forme suivante :

Chapitre 1 : Nous allons présenter chaque méthode automatique d'identification des formes de relief en définissant ses bases théoriques, son application, ses avantages et ses limites. Nous présenterons les méthodes les plus génériques, puis à celles qui sont plus spécifiques en relation avec notre objectif. Dans la première partie, nous présenterons des méthodes génériques telles que l'analyse géomorphométrique et l'OBIA qui sont utilisées pour classer toutes formes de relief. Dans la deuxième partie, nous présenterons d'autres méthodes plus spécifiques à la forme de vallée comme l'indice valléen. Enfin, nous discuterons d'une manière générale les avantages et les inconvénients de chaque méthode en précisant les parties qui peuvent nous aider dans la réalisation de notre objectif.

Chapitre 2 : La méthodologie du travail sera présentée dans ce chapitre qui est composé de deux grandes parties qui résument le "quoi" et le "comment" de la méthodologie. Le "quoi" présente

l'ensemble des éléments saillants globaux et spécifiques qui définissent la forme d'une vallée glaciaire. Dans cette partie, nous présenterons le modèle conceptuel du travail qui définit la base théorique de la méthode automatique proposée. Dans la deuxième partie, nous allons présenter le modèle opérationnel de la méthode. Cette partie va répondre à la question de comment pouvons-nous identifier la vallée glaciaire. Tout d'abord, le modèle sera présenté d'une manière globale qui résume ses étapes. Ensuite, nous détaillerons chaque étape en expliquant la procédure et les résultats voulus. Enfin, nous finirons par l'explication de l'originalité de notre méthode.

Chapitre 3 : Ce chapitre est composé de trois parties. D'abord, nous décrirons l'implantation informatique de notre modèle. Dans cette partie, nous allons nous concentrer sur les détails techniques liés à l'automatisation des étapes de traitement des données et nous allons présenter les données utilisées pour appliquer notre méthode. Nous allons présenter les zones d'étude sur lesquelles on a appliqué la méthode. Ensuite, nous allons présenter les résultats obtenus après l'application de notre modèle. La discussion et la validation seront abordés dans cette partie du mémoire. Nous allons discuter la performance de notre méthode en termes de précision. Enfin, nous allons comparer les résultats avec ceux de la méthode manuelle appliquée par un expert pour donner une évaluation objective de notre travail.

Conclusion : Nous allons tirer dans cette partie les conclusions générées à partir de toutes les étapes du travail. Nous allons préciser notre contribution à la recherche dans le domaine des formes de relief. Enfin, nous allons proposer quelques perspectives en relation avec les recherches qui vont suivre le présent travail.

Chapitre 1 : État de l'art

I. Introduction

La vallée glaciaire comme nous avons vu précédemment est une forme de relief complexe. Cette forme est constituée de composants assemblés dans un contexte spatial qui rend la forme de ce type de vallée reconnaissable par rapport aux autres formes de relief. L'identification et la délimitation d'une telle forme sur le terrain exigent la connaissance de ses caractéristiques géomorphologiques en plus de ses composants. Habituellement, la délimitation est faite par un expert du domaine qui a déjà une connaissance du terrain et de ses caractéristiques. La classification des formes de relief est basée sur une interprétation visuelle de cartes topographiques et de photographies aériennes associée à des travaux sur le terrain. De telles approches manuelles s'appuient sur la connaissance du domaine de l'interprète et sur l'expérience implicite du domaine d'étude (Dekavalla & Argialas, 2017).

Dans ce chapitre, nous présentons différentes approches d'identification automatique des formes de relief. En partant de la géomorphométrie qui présente une discipline indépendante d'étude des formes de relief vers des indices développés spécifiquement pour identifier une forme comme la vallée. Nous présentons la base théorique de chacune des approches ainsi que leurs avantages et désavantages envers notre objectif. Nous appliquerons certaines méthodes sur une zone d'étude : la vallée de la rivière Jacques-Cartier au nord de Québec. Nous discuterons la fiabilité de chaque méthode, sa précision et ses limites. Vers la fin du chapitre, nous ferons la comparaison entre les différentes méthodes en précisant ce qui nous manquera pour réaliser notre objectif qui est l'identification de la forme de la vallée.

II. Les méthodes de classification et d'analyse des formes de relief :

1. L'analyse géomorphométrique :

La géomorphométrie est une discipline scientifique issue de la géomorphologie et de l'analyse quantitative du terrain. Il s'agit d'un domaine parallèle aux SIG et aux cartographies analytiques (figure 6) (Pike et al., 2009). Bien que la géomorphométrie ait été considérée comme une activité dans des domaines plus établis, allant de la géographie et la géomorphologie à la science du sol et au génie militaire, elle n'est plus seulement une collection de techniques numériques, mais une discipline à part entière (Pike et al., 2009).

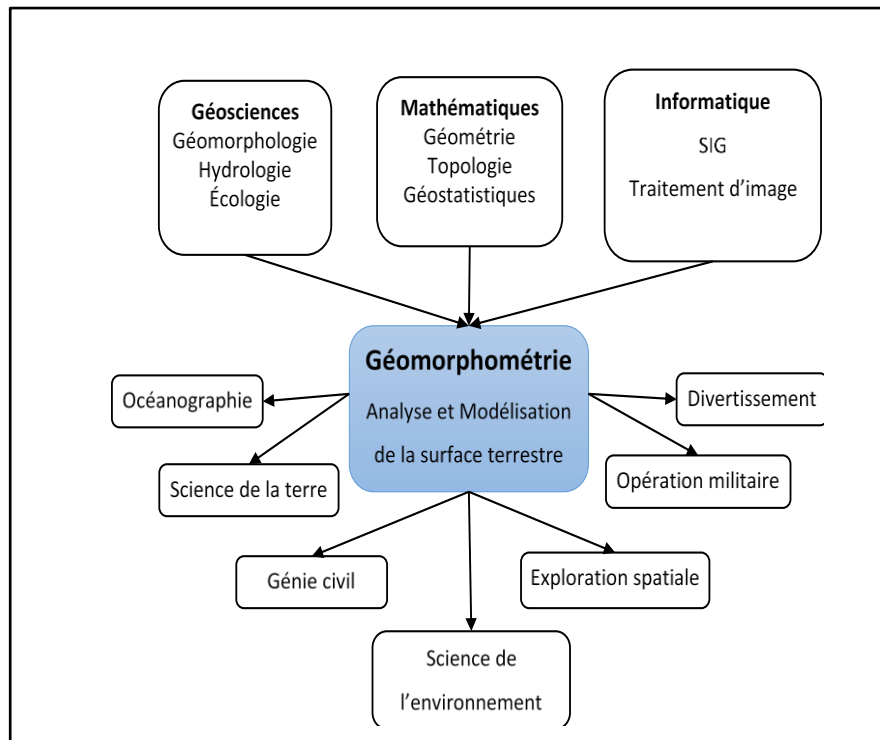


Figure 6 La géomorphométrie et sa relation avec les disciplines de la source et de l'utilisateur final. D'après Pike (1995)

La géomorphométrie se focalise sur l'étude quantitative de la surface terrestre et sur l'extraction des objets spatiaux à partir des modèles numériques de terrain (Florinsky, 2017). Les considérations principales utilisées en géomorphométrie pour la différenciation des formes de relief à différentes échelles sont la forme ou l'aspect de la surface locale, la taille du relief dans les dimensions horizontales et verticales, le contexte du local au régional, les modèles de répétition cyclique des formes topographiques telles que la proximité, la connectivité et la position et les relations hydrologiques (Hengl & MacMillan, 2009).

Selon le type des données et la technologie utilisée pour le traitement de ces données, nous pouvons dire que nous avons deux variétés de géomorphométrie : une géomorphométrie classique et une autre plus moderne (Hengl & MacMillan, 2009). La géomorphométrie classique est utilisée pour l'analyse des courbes de niveau et pour l'interprétation des cartes topographiques (Hengl & MacMillan, 2009). Cela aide à l'extraction des paramètres de surface comme la pente et la courbure et aussi pour l'élaboration des cartes thématiques comme les cartes hydrologiques ou hypsométriques. La géomorphométrie moderne se focalise sur la construction et le traitement des modèles numériques de terrain. Elle se concentre sur l'analyse et l'interprétation des surfaces continues ou des objets discrets

comme les formes de relief. Cette discipline permet à la fois l'extraction des paramètres du terrain et l'extraction des objets spatiaux et aussi l'élaboration des cartes thématiques comme les cartes d'occupation du sol (Hengl & MacMillan, 2009).

L'analyse du modèle numérique de terrain par la géomorphométrie propose une manière rapide d'obtention des paramètres descriptifs du terrain qui aident à l'analyse et à la prise de décision (Hengl & MacMillan, 2009). Une analyse géomorphométrique de terrain comprend en général cinq étapes (Reuter & Nelson, 2009) :

- L'échantillonnage de la surface.
- La génération du modèle de surface.
- La correction du modèle.
- Le calcul des paramètres de surface.
- L'interprétation thématique.

L'unité fondamentale de l'analyse géomorphométrique est l'élément de relief, une entité spatiale homogène avec des propriétés géomorphométriques uniformes (MacMillan & Shary, 2009). Un élément de relief est un composant de la forme de relief. Une telle forme peut se composer d'un ou plusieurs éléments de relief selon un assemblage spécifique qui la définissent comme objet spatial indépendant. La procédure qui permet l'extraction des éléments de relief à partir des modèles numériques de terrain est l'opération de traitement et du calcul par fenêtre de voisinage. Les paramètres sont calculés pour chaque cellule ou pixel en fonction des valeurs de voisinage et en fonction de l'échelle utilisée (Reuter & Nelson, 2009). Nous pouvons dire qu'un élément de relief est un ensemble de cellules voisines du modèle numérique de terrain qui ont la même valeur ou sont dans le même intervalle pour un seul ou plusieurs paramètres géomorphométriques.

Les éléments du relief peuvent être extraits automatiquement en utilisant des paramètres de surface du sol tels que la pente, les courbures, la zone de captage, la distance aux cours d'eau, les pics et la profondeur de la dépression. Ces éléments sont groupés dans des systèmes de classification comme celui dans la figure 7 (MacMillan & Shary, 2009) qui se base sur les types des courbures pour donner douze classes d'éléments de relief.

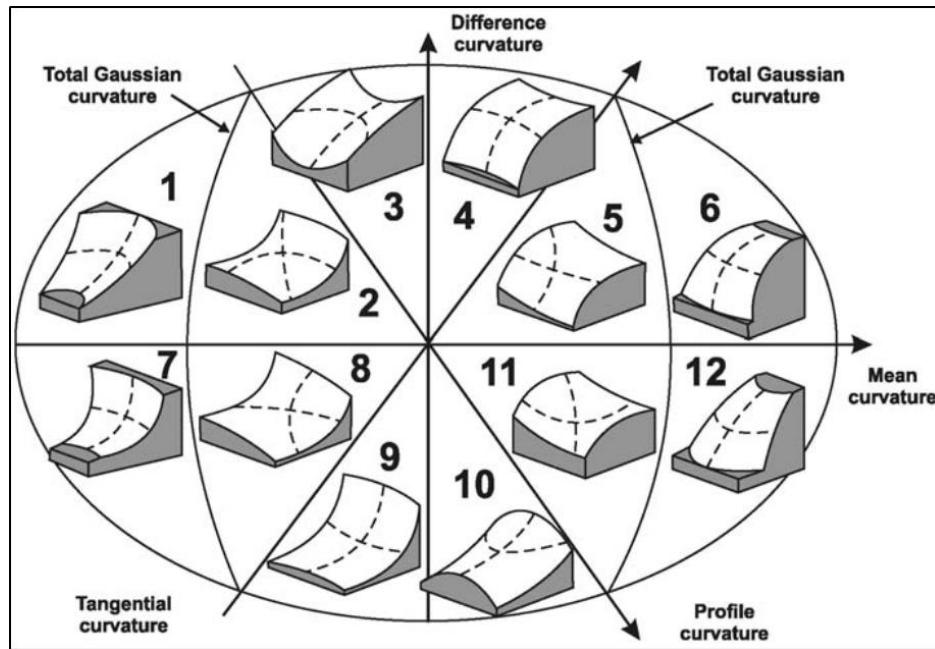


Figure 7 Systèmes de classification de la surface en douze éléments de relief (MacMillan & Shary, 2009)

En appliquant les approches de la géomorphométrie à notre cas d'étude, nous allons traiter la vallée glaciaire comme une forme de relief composée d'éléments de relief. Chaque élément (figure 8) correspond à une entité homogène avec des caractéristiques morphométriques précises. Le modèle suivant effectue la décomposition de vallée en quatre éléments de relief. Tout d'abord, le fond sous forme d'une entité surfacique avec une pente proche de l'horizontale. Deux types de versants : le versant doux avec une pente douce et le versant abrupt avec une pente raide. Enfin, l'épaule sous forme d'une entité linéaire qui présente une rupture de pente entre le versant abrupt et l'entourage de la vallée.

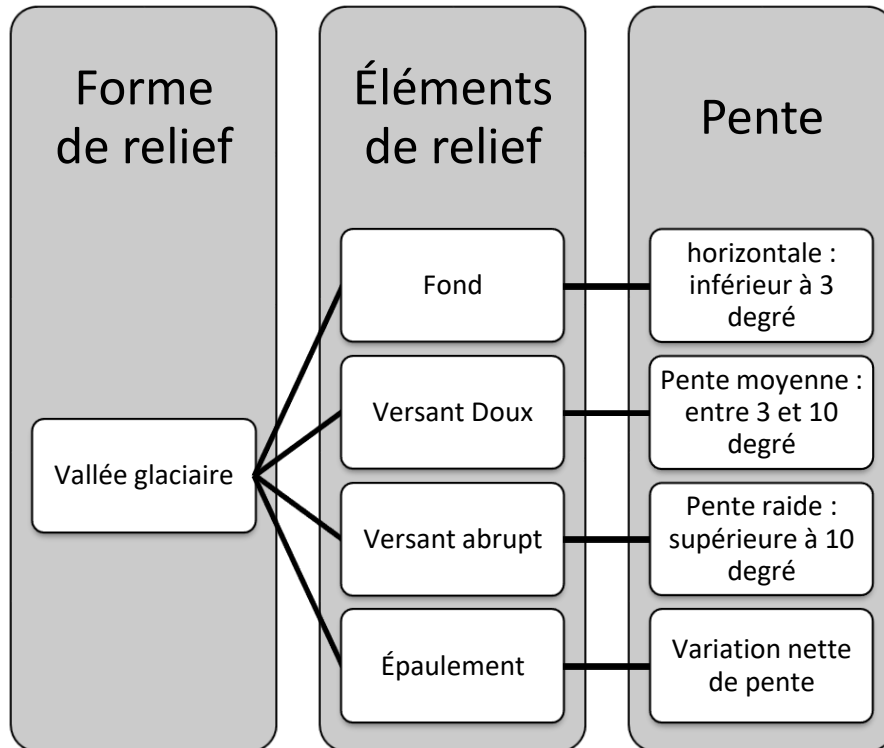


Figure 8 Modèle représentatif des éléments de relief d'une vallée glaciaire

L'identification seule des éléments composants d'une vallée glaciaire ne suffira pas pour l'identifier. Un assemblage spatial est requis pour donner sens à l'ensemble des éléments identifiés. Dans notre cas, l'assemblage est défini à partir de la description de la forme d'une vallée glaciaire. Le schéma suivant décrit la répartition spatiale des composants d'une vallée (figure 9). Le fond plat compose l'unité centrale d'une vallée entourée par le reste des composants. Le versant doux se localise entre le fond et le versant abrupt, différent de ces deux composants par sa pente ni horizontale ni raide. Le versant abrupt entoure lui-même le versant doux présentant la paroi de la vallée avec une pente raide. Enfin l'épaulement qui présente la limite entre la vallée et le reste de la surface et entre autres la limite entre le versant abrupt et le reste du relief.

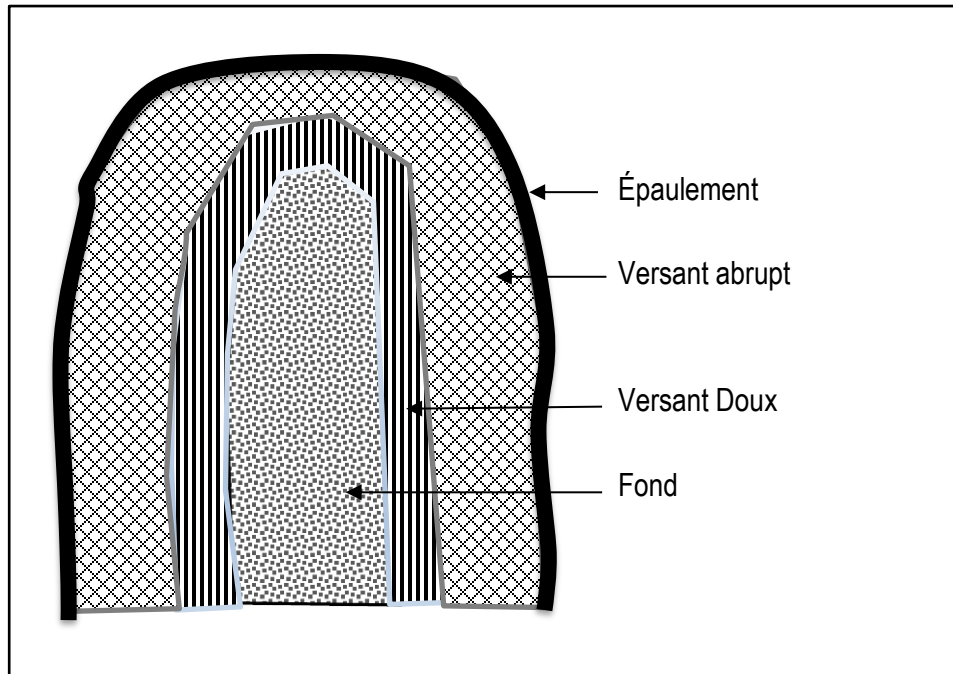


Figure 9 La répartition spatiale des composants de la vallée glaciaire (vue de dessus)

Dans la section suivante, nous appliquons une classification par pente sur la zone d'étude. En admettant les seuils illustrés dans le modèle (figure 8), on cherchera la répartition spatiale des éléments dans le terrain. La carte suivante (figure 10) présente cette classification. Nous délimitons manuellement la zone de la vallée pour montrer l'assemblage spatial des éléments identifiés.

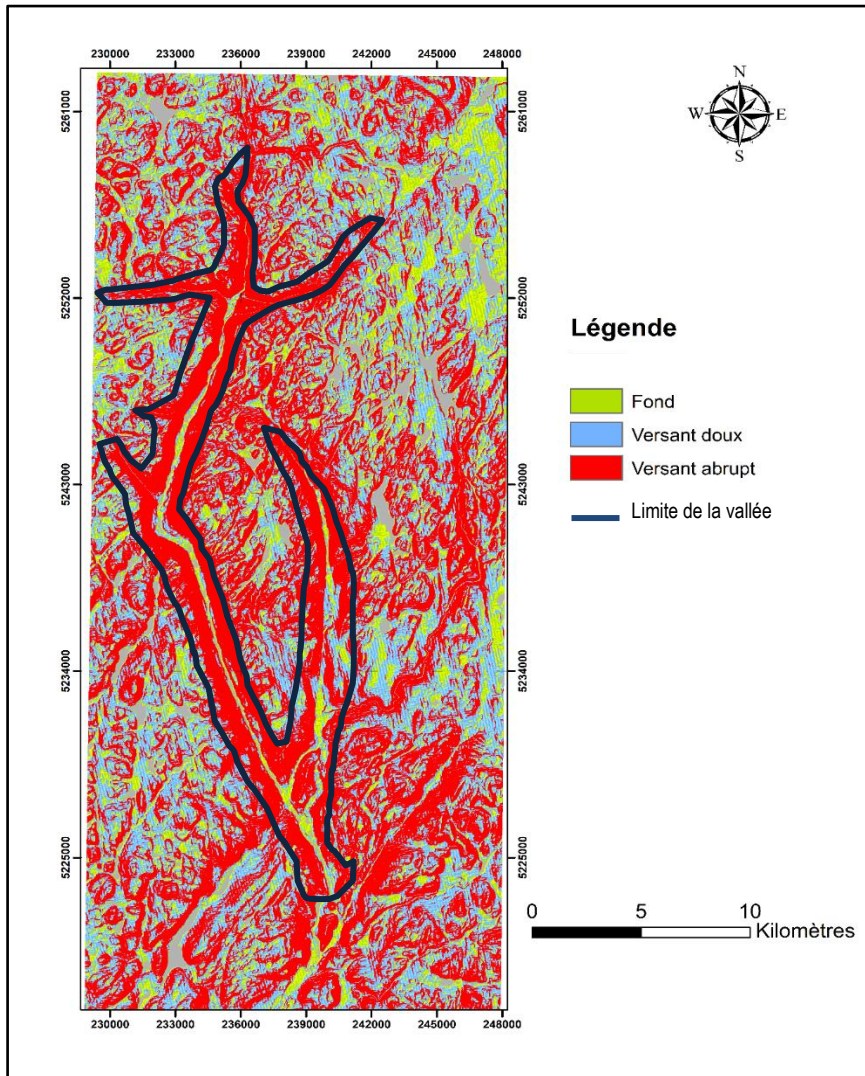


Figure 10 Les éléments de relief identifiés dans la zone de la vallée Jacques-Cartier

Dans l'intérieur de la zone délimitée manuellement, nous pouvons remarquer que les trois éléments de relief ont un assemblage spatial semblable au modèle précédent. Nous percevons que le fond se trouve entre les deux versants et le versant doux lui-même se trouve toujours entre les deux autres éléments. Cependant, l'identification automatique de l'assemblage semble difficile et presque impossible pour les raisons suivantes.

Les éléments ne sont pas continus dans l'espace, le fond par exemple apparaît sous forme de zones déconnectées et non continues. D'autre part, toutes les parties du terrain peuvent être un des trois

éléments définis. La recherche des éléments d'une manière automatique sans avoir un système de recherche ou un contexte pour intégrer la topologie est quasiment impossible.

De plus et dans la réalité des choses, il ne s'agit pas d'une forme de relief qui garde la même forme géométrique. L'érosion peut enlever des éléments de la forme de relief ou elle peut déformer ses parties. Aussi, il existe des anomalies qui peuvent exister au sein d'une forme de relief comme les verrous dans l'exemple des vallées glaciaires. Nous pouvons conclure que les méthodes automatiques de l'analyse quantitative de terrain sont efficaces seulement dans la classification de la surface en éléments de relief, mais elles sont incapables d'identifier une forme de relief entière comme la vallée glaciaire.

2. L'OBIA :

L'analyse d'images basée sur les objets (OBIA) devient une approche largement utilisée dans la cartographie géomorphologique (Drăguț & Eisank, 2011). L'utilisation de l'OBIA se base sur l'idée que les formes de relief peuvent être associées à des segments en tant que collections de cellules adjacentes ayant des valeurs similaires (D'Oleire-Oltmanns et al., 2013a). Selon les données utilisées, ces valeurs peuvent être des paramètres de surface, des degrés de couleur ou des mesures effectuées directement sur le terrain.

En règle générale, l'OBIA comporte deux étapes: la segmentation et la classification (Benz et al., 2004). Les algorithmes souvent utilisés dérivent des segments homogènes de surface à partir des données entrantes en se basant sur le degré de similarité entre les cellules (Benz et al., 2004). Les segments résultants présentent des unités de traitement plus réalistes que les pixels et peuvent être créés à partir d'un traitement à plusieurs échelles (D'Oleire-Oltmanns et al., 2013a). Une fois les segments délimités, des règles de classification sont appliquées pour relier chaque segment au concept de relief auquel il se rapproche le plus (MacMillan et al., 2004).

La taille des objets est contrôlée par un seuil qui définit l'hétérogénéité maximale des valeurs de cellule de la grille utilisée dans la segmentation. Plus un objet contient de cellules, plus il contient d'informations qui peuvent être utilisées pour classer d'autres objets spécifiques. Évidemment, lorsque les objets deviennent trop volumineux, ils peuvent englober plusieurs entités plus petites qui empêchent une classification précise, ce qui entraîne un problème de multi-classification. Idéalement, les objets devraient avoir à peu près la même taille que l'entité à classer, ou être légèrement inférieurs

à celle-ci. Choisir une valeur de paramètre d'échelle appropriée est donc une étape cruciale (Anders et al., 2011b).

Dans la figure 11, nous présentons les étapes de traitement d'un modèle numérique de terrain par l'OBIA dans le but de faire une classification des formes de relief. L'OBIA est souvent utilisée par des experts du domaine ou par des gens qui ont une idée sur la composition du terrain. En fait, la segmentation d'image en général est une opération de traitement qui a pour but de rassembler les pixels entre eux suivant des critères prédéfinis (Pedersen, 2016a). À cet égard, la définition des critères de la classification des formes de relief est en relation directe avec la connaissance de l'utilisateur. L'utilisateur doit avoir une idée sur les formes de relief qui se trouvent dans son cas d'étude, de même que sur les dimensions approximatives des unités et leurs caractéristiques lithologiques (Benz et al., 2004). Cela fait de l'OBIA une méthode qui se base sur des critères subjectifs. L'évaluation des seuils ou des paramètres de définition d'une forme de relief dans ce cas peut différer d'un utilisateur à un autre selon sa connaissance du terrain et son expérience dans le domaine.

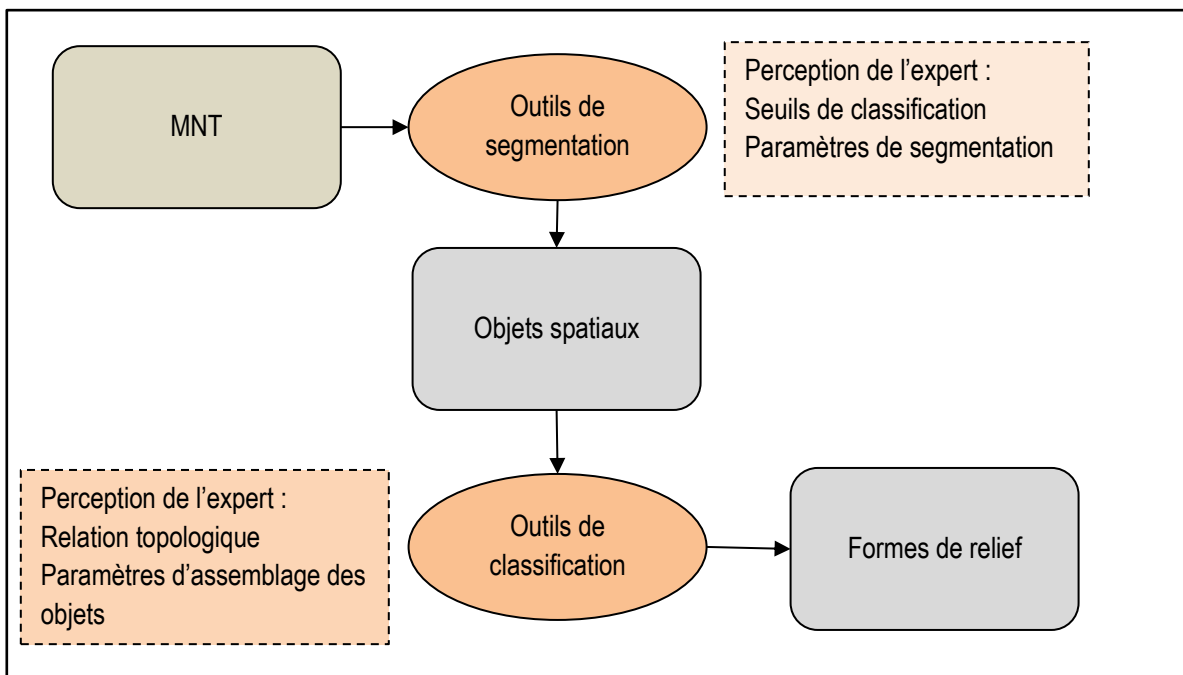


Figure 11 Les étapes simplifiées de la classification des formes de relief par l'OBIA

L'OBIA s'est avérée un outil efficace pour obtenir des objets de terrain représentatifs plutôt que des pixels dispersés. Il est confirmé qu'elle est puissante dans l'utilisation des informations de différents niveaux dans le cadre du contexte géomorphométrique. Cependant, cette méthode utilise un couplage faible de forme, de position et de réseau de terrain et peut être améliorée pour devenir un système plus sophistiqué et structuré qui représente des formes de relief dans le terrain (Robb et al., 2015).

Il faut également considérer que le terrain peut ne pas toujours correspondre à des organisations particulières et peut présenter un caractère irrégulier comme une rugosité élevée. Pour cela, l'OBIA fournit une segmentation à plusieurs niveaux qui aide à représenter l'échelle. Cependant, le cadre multiniveaux fourni par l'OBIA est plutôt utilisé à des fins de classification (Pedersen, 2016b) (Gerçek et al., 2011). Il a permis de collecter des informations à différents niveaux. Néanmoins, les critères utilisés pour définir une forme de relief quelconque peuvent varier aussi en fonction de l'échelle utilisée ou en relation avec le contexte géomorphologique. Pour le même utilisateur, il faut prendre en compte la variation des dimensions géométriques entre deux contextes géomorphologiques différents. Par exemple, en prenant le cas des canyons sous-marins qui sont des formes de relief caractéristiques de la zone du talus sous-marin, les dimensions des canyons varient énormément selon le contexte géomorphologique. Les canyons de l'estuaire de Saint-Laurent (Québec-Canada) ont une longueur qui ne dépasse pas 10 km (Normandeau et al., 2015). Cependant, le canyon de Monterey dans l'océan pacifique (Californie-États-Unis) a une longueur qui dépasse 150 km (Maier et al., 2018). Dans ce cas, l'application de l'OBIA pour ces deux zones nécessite l'intervention de l'utilisateur pour régler les paramètres de classification selon le changement du contexte.

L'aspect automatique de l'OBIA est valable pour le traitement d'un seul contexte. L'application de cette méthode sur un autre cas avec les mêmes paramètres n'est pas satisfaisante. Il faut passer toujours par des réglages selon le contexte, l'échelle et la résolution des données. Ce qui concerne notre cas d'étude, l'OBIA peut être très efficace dans la délimitation de la forme de vallée glaciaire dans un contexte géographique connu par l'utilisateur. Notons que la vallée glaciaire est une forme de relief assez spécifique qui présente des irrégularités et des discontinuités dans sa forme. Le changement du contexte exige entre autres le changement des paramètres d'identification. Cela oblige l'utilisateur à avoir une connaissance du terrain et une expertise du domaine pour manipuler une telle méthode. A cet égard, nous pouvons dire que l'OBIA peut réussir à identifier la forme seulement d'une manière

supervisée. Cela ne correspond pas à nos objectifs d'avoir une méthode automatique d'identification et de délimitation de la vallée glaciaire d'une façon non supervisée.

3. L'indice de positionnement topographique TPI :

L'indice de la position topographique "TPI" présente un indice de classification de relief à partir d'un MNT. Le calcul du TPI est assez simple, il consiste à calculer la différence d'élévation entre une cellule et son voisinage (Weiss & Conservancy, 2000) (De Reu et al., 2013). C'est à l'utilisateur de fixer le nombre de cellules de voisinage utilisées selon la résolution du MNT et sa connaissance du terrain.

Selon la résolution du modèle et l'échelle utilisée, cet indice donne une idée sur la nature des formes de relief dans une zone donnée (De Reu et al., 2013). Les valeurs du TPI pour les formes incisées comme les vallées où les dépressions topographiques sont généralement négatives au contraire du TPI des sommets ou des collines qui sont positives (Weiss & Conservancy, 2000). La relation entre la valeur d'élévation d'une forme et son voisinage pourrait être significative dans des cas semblables à ces derniers. Dans d'autres cas, les chercheurs combinent le TPI avec la valeur de pente (Han et al., 2016) ou d'autres paramètres géomorphométriques comme la courbure.

La valeur de l'indice de positionnement topographique demeure très dépendante de l'échelle choisie par l'utilisateur. Cette échelle limite la recherche des formes de relief dans des seuils prédéfinis. Cependant, ces formes sont créées par des processus naturels et elles ne gardent pas les mêmes dimensions pour chaque zone ou contexte. Prenant l'exemple des vallées glaciaires, la longueur et la largeur de la vallée varient énormément entre deux zones géographiques comme le Québec et l'Alaska. De plus, dans une même zone comme l'Alaska nous pouvons trouver des vallées de différentes dimensions malgré qu'elles soient dans la même zone géographique. Un expert du domaine peut choisir les échelles qui conviennent à chaque zone au contraire d'un utilisateur ordinaire qui va trouver des difficultés pour réaliser cette tâche.

Afin de mieux expliquer le problème d'échelle dans le calcul de TPI, nous présentons dans le schéma suivant (figure 12) l'influence du choix de l'échelle sur le résultat final de l'identification. Pour la même forme de relief, nous choisissons des échelles différentes de calcul et montrons le type de forme de relief interprété. Le point étudié ici est un sommet local dans un fond de vallée. Du point de vue géomorphologique cet élément présente une accumulation des sédiments dans la partie latérale du fond. Toutefois, cet élément appartient au fond de la vallée malgré sa différence morphologique avec

la zone plate qui l'entoure. Dans le premier cas A, nous utilisons une petite échelle d'étude. Le calcul de TPI nous donne une valeur près de 0, cela signifie qu'on est au niveau d'une zone plate. Dans le cas B, nous utilisons une échelle moyenne. La valeur de TPI est supérieure à 0 dans ce cas, cela montre qu'on est au niveau d'un sommet. Enfin et en utilisant une grande échelle, nous obtenons une valeur de TPI inférieure à 0 pour le troisième cas. Cela signifie que nous sommes au niveau d'un fond de vallée, ce qui est vrai dans la réalité.

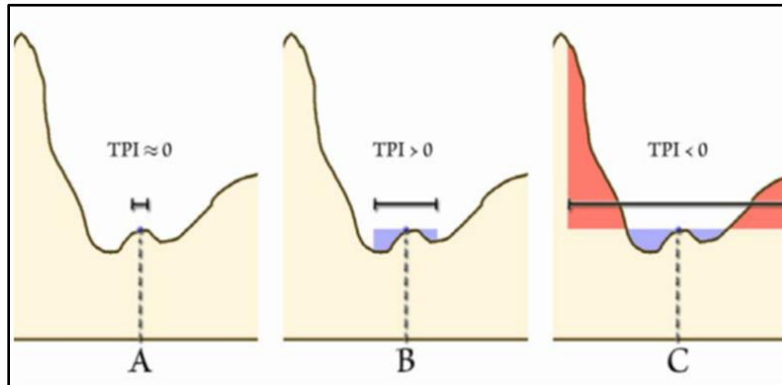


Figure 12 Les valeurs de TPI pour le même point avec trois échelles de calcul

Comme nous avons vu, le choix de l'échelle de traitement agit directement sur les résultats de calcul et sur l'interprétation entre autres. Certains chercheurs, afin d'éviter ce problème d'échelle, utilisent une charte de classification de relief basée sur deux échelles ou plus (Han et al., 2016) (De Reu et al., 2013). Selon ces travaux, les déformations locales prennent la valeur de TPI de la forme de relief entière si on utilise une grande échelle. Cela demeure valide dans un cas comme le sommet local situé dans le fond que nous avons étudié. Cependant, la question qui se révèle est comment pouvons-nous choisir les échelles et sur quel paramètre pouvons-nous nous baser pour déterminer des seuils. Dans la majorité des cas les chercheurs utilisent des échelles arbitraires, une petite échelle présentant les huit voisins de la cellule de pixel et une autre échelle, grande ou moyenne.

Dans cette section, nous présentons les résultats de la classification par TPI dans la zone de la vallée Jacques Cartier au nord du Québec. Nous avons utilisé des tailles de voisinage de TPI différentes dans le but d'identifier la vallée. En utilisant une petite taille de voisinage (figure 13-a), nous pouvons remarquer que la majorité de la zone d'étude possède des valeurs entre 0.2 et 0.8 avec des petites

zones attachées et continues dans le fond de la vallée avec une valeur inférieure à 0.2. Cela est dû à l'incision des cellules du fond par rapport au reste des cellules. Avec une taille de traitement de 500m (figure 13-b), nous pouvons remarquer que le fond de la vallée est une zone continue et entourée par des zones à TPI élevée qui sont les versants.

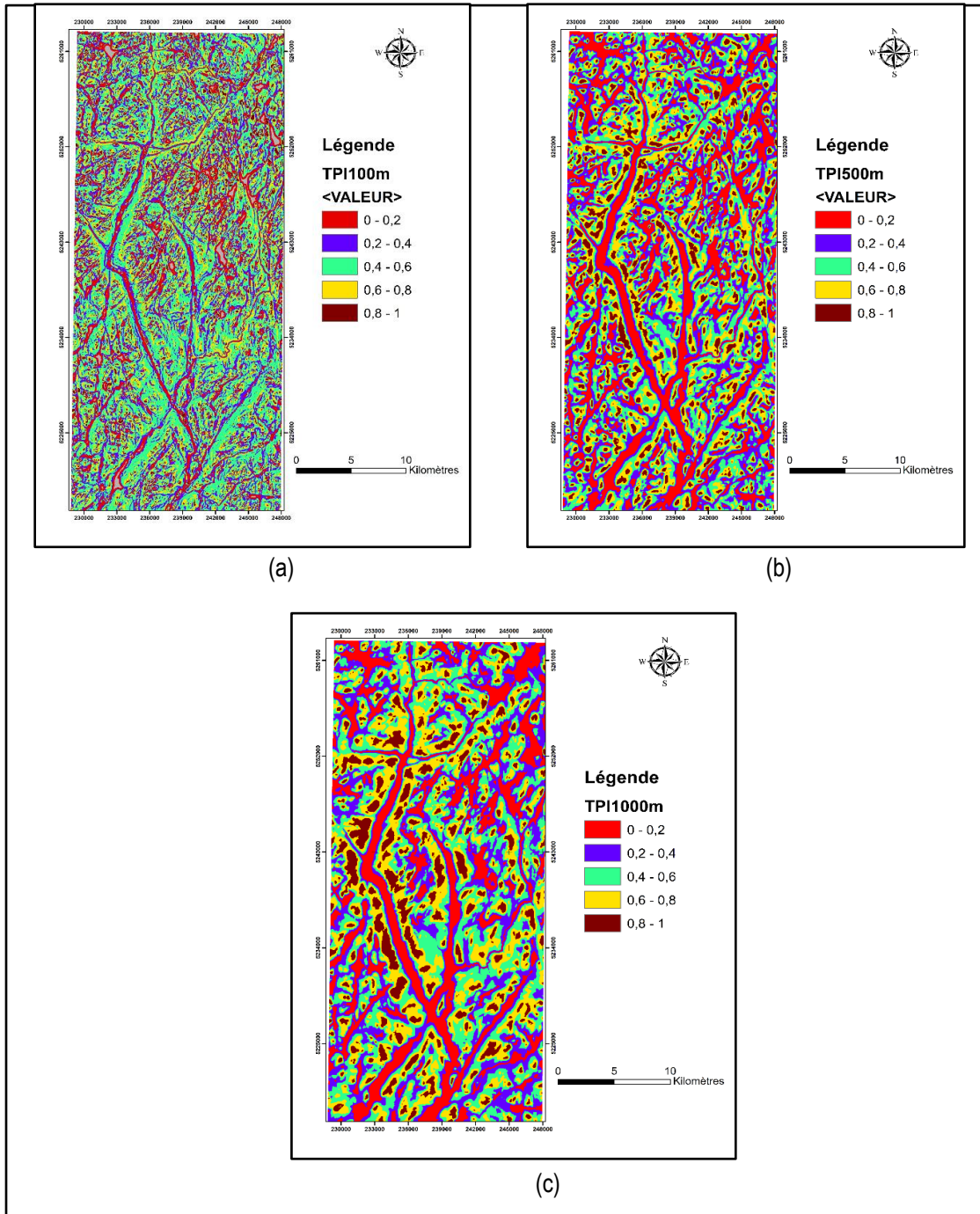


Figure 13 La carte de classification du terrain par le TPI dans la zone de la vallée Jacques-Cartier au nord du Québec en utilisant 3 échelles : (a) 100 m , (b) 500 m , (c) 1000m

En utilisant un voisinage plus large de traitement, nous pouvons voir la vallée glaciaire en totalité présentée par un fond à TPI très faible et deux versants à TPI importante. La vallée est distinguable par rapport à son entourage par l'assemblage spatial de ses composants. Le fond et les versants sont des zones homogènes continues à TPI presque constant. Néanmoins, la vallée glaciaire est bien distinguable seulement au niveau de cette échelle. Une échelle plus petite ou plus grande à celle-ci est non convenable pour identifier cette forme de relief. Nous pouvons conclure que le choix de l'échelle est primordial pour étudier une surface avec le TPI. L'utilisateur doit connaître les dimensions de la forme recherchée pour choisir l'échelle d'étude. Ceci est un inconvénient majeur pour une méthode automatique. Les dimensions de la forme de relief recherchée peuvent varier entre deux contextes différents. Dans ce cas, l'intervention de l'utilisateur est demandée pour changer l'échelle, ce qui ne convient pas avec notre objectif du travail.

III. Méthode automatique d'identification des vallées

1. L'indice valléen:

C'est un indice développé par Straumann (Straumann & Purves, 2011) pour identifier une vallée à partir d'un MNT. Cette méthode se compose d'un ensemble d'algorithmes afin de donner à chaque pixel un degré d'appartenance aux vallées. L'indice valléen se base sur l'étude des paramètres géomorphométriques du terrain en corrélation avec l'étude du réseau de drainage.

Straumann a basé sa méthode sur une définition simple et générique de la vallée. Une vallée est une zone basse et concave de la surface terrestre. Cette définition renseigne sur une différence négative d'élévation de la vallée avec son entourage. De plus, la nature concave de cette zone la différencie entre tous genres de zones basses. Cependant, cette définition est très générique et ne donne aucune information sur la dimension ou le contexte de cette forme de relief. Pour résoudre ce problème, Straumann a relié les calculs des paramètres de surface avec les propriétés du réseau de drainage pour donner un contexte et un point de départ pour son calcul d'appartenance. Le premier algorithme consiste à extraire le réseau de drainage et identifier entre autres le talweg et les bassins et les sous-bassins versants. À partir du talweg et vers l'extrémité du bassin, le deuxième algorithme aide à délimiter le fond en utilisant le gradient de pente. À cette étape, les objets existants sont les cellules du fond incluses dans un sous-bassin. Entre ces deux objets se trouve une zone où l'appartenance

des pixels aux vallées n'est pas encore déterminée. En utilisant la différence d'élévation et la distance vers les cellules du fond combinées avec la courbure, le troisième algorithme donne un degré d'appartenance à chaque pixel de la zone entre le fond et la limite du bassin.

Straumann utilise la démarche classique d'extraction d'un réseau de drainage. À partir d'un MNT, la méthode consiste à faire un remplissage des cellules afin d'éliminer les cuvettes. La direction des flux permet la modélisation de la direction d'écoulement d'eau à partir de chaque cellule vers sa voisine de plus grande pente descendante en utilisant l'algorithme 8D. Dans une fenêtre mobile 3x3 cet algorithme admet le calcul de la pente la plus forte vers l'une des huit cellules adjacentes, d'où l'appellation 8D. Le calcul d'accumulation se fait à partir des valeurs de la direction des flux. Dans ce cas, la méthode de Shreve (Li, 2006) est utilisée pour classifier chaque cellule du MNT avant la transformation vers un réseau linéaire qui présente le réseau de drainage.

L'extraction du fond se fait à partir de la segmentation des cellules du talweg. Un algorithme de contour actif est utilisé pour identifier toutes les cellules raster voisines du fond avec une pente inférieure à 3°. Ces cellules doivent être connectées directement au talweg ou à une cellule du fond déjà identifiée. Dans cette étape le calcul de la pente se fait d'une manière simple, c'est le rapport entre la différence d'élévation entre une cellule et sa voisine en suivant la direction d'écoulement.

$$P = ((Z_n - Z_v) / d) \times 100$$

P : pente, Z_n : altitude de la cellule, Z_v : altitude de la cellule voisine,

d : distance entre les deux centres des cellules

Après l'extraction du fond, il y a une autre zone qui apparaît, c'est la zone entre le fond et la limite du sous bassin. Le reste de la méthode consiste à évaluer l'appartenance de chaque cellule aux vallées. Pour cela, Straumann utilise plusieurs critères quantitatifs de classification. D'abord, il classifie cette zone en utilisant la distance euclidienne vers le fond. Il utilise des échelons soit 1,5 de la résolution du MNT pour ajouter à chaque cellule une valeur de distance D. Cette méthode, comme l'indique le schéma suivant (figure 14), permet la formation des bacs de distance pour chaque sous bassin versant.

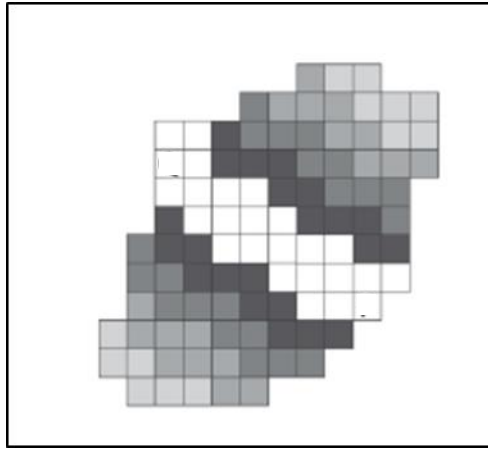


Figure 14 Formation de bacs de distance : le blanc désigne le fond de la vallée et les différentes nuances de gris représentent les bacs de distance dans le sous bassin de drainage du talweg.

Le calcul de la courbure se fait en suivant la direction du fond vers la plus proche cellule de la limite du sous bassin versant. Cette méthode permet la classification de chaque cellule en utilisant la différence d'élévation entre la cellule et ses deux voisines.

$$C_i = (z_{i+1} - z_i) - (z_i - z_{i-1})$$

Avec C_i : courbure, z_i : valeur d'élévation de la cellule, z_{i-1} et z_{i+1} : valeur d'élévation des cellules voisines

Les valeurs de courbure sont ajustées de la manière suivante :

$$\begin{aligned} C_i &= 0 \text{ Si } C_i > 0 \\ C_i &= 0 \text{ Si } C_i = 0 \\ C_i &= C_i * D \text{ Si } C_i < 0 \end{aligned}$$

Avec C_i : courbure D : distance

Après la détermination de la courbure pour chaque cellule, un autre calcul s'effectue pour déterminer la courbure moyenne C de la totalité du sous-bassin.

$$C = \sum_{i=0}^m -C_i$$

L'indice valléen se détermine à partir de la moyenne de deux valeurs $V1$ et $V2$. $V1$ présente la différence d'élévation entre la cellule et ses huit voisines. Cet indice est similaire au TPI, mais avec

une normalisation. L'utilisation de l'intervalle [0,1] évite les grandes différences et renseigne plus clairement sur l'appartenance des cellules aux vallées. Les huit cellules voisines de la cellule sont utilisées pour calculer V1.

$$v_1 = 1 - \frac{z_i - z_{min}}{z_{max} - z_{min}} \in [0,1]$$

Avec z_i : valeur d'élévation de la cellule, z_{min} : valeur d'élévation minimale des cellules voisines, z_{max} : valeur d'élévation maximale des cellules voisines

V2 montre la différence entre la courbure de la cellule et la courbure totale du sous bassin versant. Au contraire du V1, la relation spatiale et le contexte sont intégrés dans V2. La détermination de cet indice se fait en suivant une direction propre de calcul en se basant sur la distance qui sépare la cellule au fond. De plus l'espace est réparti en zones élémentaires où la valeur finale de V2 est dépendante de la valeur totale dans cette zone.

$$v_2 = 1 - \frac{\sum_{i=0}^j -c_i}{c} \in [0,1]$$

Enfin l'indice valléen V est la moyenne statistique des deux indices V1 et V2. La moyenne est utilisée pour donner la même importance aux deux indices et entre autres aux deux concepts basiques de la méthode : la différence d'élévation et la courbure.

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \in [0,1]$$

Dans cette section, nous présentons le résultat de l'application de l'indice valléen sur la zone au nord de Québec où se trouve la vallée glaciaire de la Jacques-Cartier (figure 15).

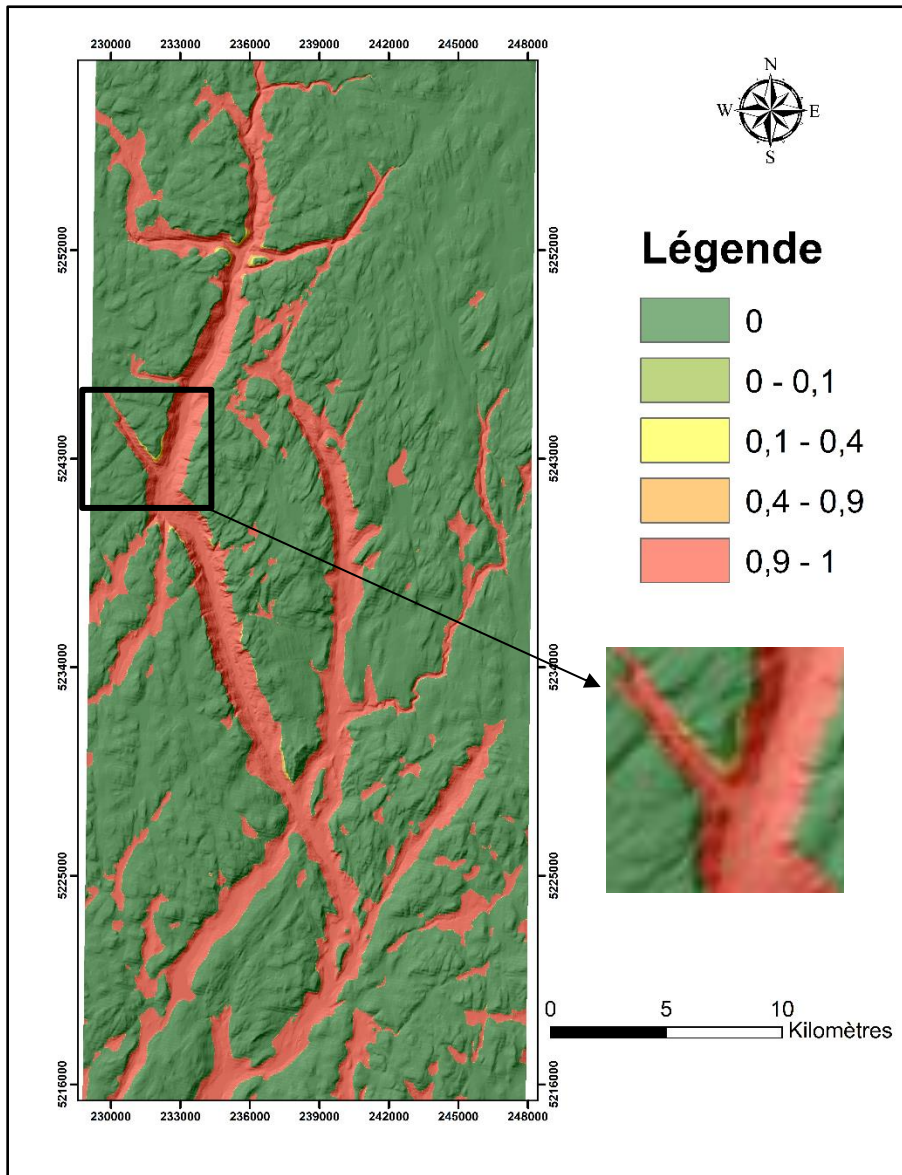


Figure 15 Carte de classification par l'indice valléen de la zone de la vallée de la Jacques-Cartier au nord de Québec

Parmi les outils déjà présentés, l'indice valléen présente un outil robuste pour l'identification de la forme d'une vallée. Cet outil intègre le contexte sous la forme du réseau de drainage et utilise la répartition de l'espace en sous-bassins versants. Un autre point fort de cette méthode est l'organisation du travail en des étapes claires similaires à celles de l'identification manuelle des formes. La focalisation sur l'extraction du fond avant le versant et l'utilisation de la courbure sont en accord avec la perception des géomorphologues.

Cependant, cette méthode présente deux points qui ne correspondent pas à nos objectifs. Le premier point est le fait que cette méthode ne différencie pas les différents types des vallées. L'indice nous donne une idée sur l'appartenance des points de surface à une vallée seulement et il ne renseigne pas sur la nature de cette vallée. Deuxièmement, la méthode présentée par Straumann ne donne pas la limite exacte de la forme de la vallée. Elle nous donne seulement un degré d'appartenance des points aux vallées.

2. Méthode d'extraction du fond de la vallée :

Zhao et coll. présentent dans leur article récent (Zhao et al., 2019) un outil qui permet la délimitation du fond de vallée. La méthode propose une approche algorithmique automatisée pour extraire la largeur de la vallée en U et en V en utilisant le point de rupture de pente entre la paroi et le fond de la vallée (figure 16). Pour réaliser cela, le talweg de la vallée est divisé en des petits morceaux droits qui aident par la suite au dessin des profils perpendiculaires à eux. Le calcul de pente des segments perpendiculaires permet l'identification des points de rupture de pente pour chaque morceau du talweg.

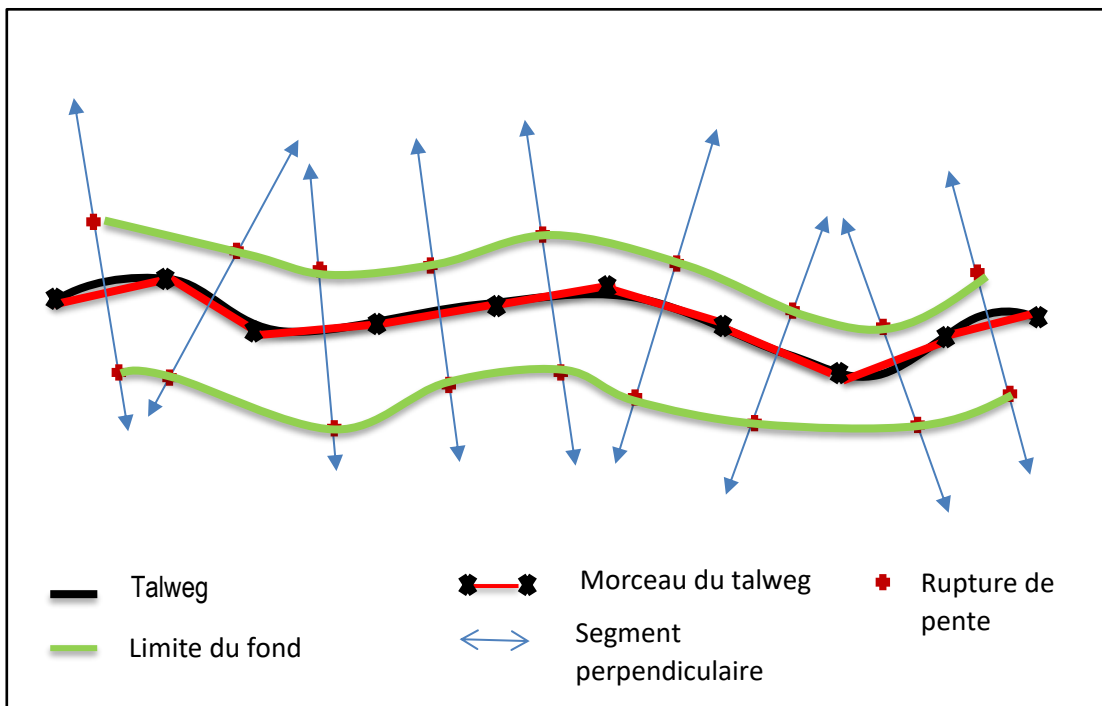


Figure 16 L'extraction du fond de la vallée selon la méthode des ruptures de pente

Cette méthode admet que les fonds de vallée sont des zones relativement plates avec une marge souvent définie par de brusques changements de pente (Gilbert et al., 2016) et que l'impact des variations dans les petites déformations de la pente est éliminé dans le processus d'exploration par comparaison répétée avec un seuil de pente donné. L'algorithme comprend cinq étapes :

- Prétraitement des données.
- Extraction des tronçons linéaires.
- Extraction des perpendiculaires des tronçons.
- Délimitation des contours du fond de la vallée.
- Calcul de la largeur du fond de la vallée.

La largeur de la vallée est explorée à partir des rives perpendiculaires au cours principal. Deux points de rupture de pente sont identifiés pour chaque rive, soit un point droit et un point gauche. La distance entre les deux points définit la largeur de la vallée. La méthode vise l'extraction d'une série de largeurs tout le long d'une vallée limitée par un bassin versant. L'outil permet à l'utilisateur l'application automatique des procédures suivantes sur un MNT :

- Extraction de réseau de drainage et du bassin versant.
- Segmentation du cours principal et son découpage en morceaux.
- Identification du point milieu de chaque morceau.
- Définition des segments perpendiculaires à chaque morceau qui passent au point milieu.
- Calcul de pente pour chaque segment.
- Identification des ruptures de pente et la définition des premiers points de rupture gauche et droite pour chaque morceau.
- Le calcul de largeur de vallée.

- Délimitation du fond de la vallée.

Pour identifier le fond d'une vallée avec cette méthode, l'utilisateur doit entrer dans l'outil quatre paramètres soit :

- La direction principale de la vallée.
- La longueur des morceaux du talweg.
- Le seuil de pente entre le fond et les versants.
- La distance maximale à explorer à gauche et à droite du talweg pour trouver les ruptures de pente.

À cet égard, l'utilisateur doit connaître l'étendue géographique de la vallée correspondante ainsi que sa direction principale avant de faire la délimitation du fond. Cela demande une délimitation de la vallée entière sur le MNT. De plus, pour identifier les ruptures qui renseignent sur la limite du fond il faut d'abord définir un seuil de pente et une distance maximale de recherche. Cette méthode paraît efficace pour extraire le fond d'une vallée déjà délimitée sur un modèle numérique de terrain. Dans le cas d'une vallée non délimitée, l'utilisateur doit passer obligatoirement par l'étape de l'analyse de chaque partie de la vallée pour concevoir les quatre paramètres à utiliser pour extraire le fond.

IV. Les approches cognitives :

Les approches cognitives d'identification des formes de relief s'inspirent de la cognition spatiale. Cette idée se résume dans le fait que les gens peuvent connaître une forme de relief quelconque à partir de ses éléments saillants et sans avoir recours à une description détaillée de la forme (Sinha & Mark, 2010). La saillance de la forme de relief peut être traduite par un ou un ensemble d'éléments du terrain spécifiques à la forme ou par une caractéristique spatiale qui fait la différence avec son entourage (Sinha & Mark, 2010).

Cette idée paraît théoriquement logique et réaliste, car la majorité des gens n'ont besoin d'aucune étude détaillée en géomorphologie pour reconnaître une montagne ou une vallée. Cependant, la difficulté apparaît dans la mise en application de cette idée par des outils automatiques. Évidemment,

un ordinateur ne possède pas les mêmes capacités que l'être humain. De ce fait, nous avons besoin de traduire l'idée de cognition vers des outils automatiques et des algorithmes acceptés par un ordinateur.

À cet égard, les chercheurs dans ce domaine ont proposé l'intégration d'un cadre ontologique qui décrit la forme de relief. Ce cadre définit la base de connaissances de l'algorithme d'extraction de la forme de relief (Guilbert et al., 2016). Une telle base peut être réalisée à partir de l'analyse de la forme de relief et sa saillance. Une étape de transformation est requise dans ce cas pour relier la connaissance et l'algorithme (Guilbert et al., 2016). Cette transformation peut être divisée en deux étapes, une transformation conceptuelle et une autre logique (Guilbert et al., 2016). La transformation conceptuelle se résume dans la construction d'un modèle conceptuel qui met en évidence la définition de la forme de relief illustrée à partir de l'analyse de la forme. Ensuite, la transformation logique consiste à avoir la structure de donnée convenable à l'application du modèle conceptuel (Guilbert et al., 2016). En suivant ces étapes, nous pouvons développer des algorithmes d'identification de la forme de relief en se basant sur l'idée de la saillance.

Un avantage de cette méthode est la prise en compte du contexte spatial dans la délimitation et l'extraction des formes de relief. Les formes sont reconnues à partir des éléments saillants, que ce soit l'échelle utilisée ou le contexte. Cependant, cette méthode n'est pas encore mise en œuvre dans le cas de formes complexes telles que les vallées glaciaires, seuls des modèles conceptuels sont développés sans aucune application informatique (D'Oleire-Oltmanns et al., 2013b).

V. Conclusion

La vallée glaciaire est une forme de relief complexe qui prend des dimensions différentes selon le contexte avec différentes irrégularités et discontinuités au niveau de leurs composants. Pour pouvoir identifier et délimiter automatiquement cette forme, il nous faudra une méthode qui prend en considération ces points.

Les méthodes actuelles sont incapables d'identifier la vallée glaciaire pour différentes raisons. L'analyse géomorphométrique, l'OBIA et le TPI sont des méthodes génériques utilisées pour classer la surface terrestre en zones homogènes. Elles ne sont pas des méthodes qui prennent en considération l'aspect spécial de la vallée glaciaire. De plus, l'intervention de l'utilisateur dans chaque

changement du contexte ne convient pas avec notre objectif d'avoir une méthode automatique applicable dans tous les contextes sans intervention de l'utilisateur pour régler des paramètres.

Toutefois, l'indice valléen paraît comme une méthode robuste et spécifique aux formes des vallées. Ses deux inconvénients sont qu'il ne différencie pas entre les différents types de vallées et qu'il ne donne pas la limite exacte de la forme. Le dernier inconvénient est résolu dans la méthode d'extraction du fond de la vallée. Pourtant, elle demande avant tout une délimitation de la vallée entière.

L'absence d'un modèle conceptuel de la forme de relief dans ces méthodes rend de l'identification des formes complexes très difficile. Il nous faudra tout d'abord une compréhension des caractéristiques, de la géométrie et de l'assemblage spatial de la forme de relief. Le modèle opérationnel de la méthode automatique d'identification doit intégrer un modèle conceptuel pour s'adapter au changement du contexte (Guilbert et al., 2016).

La méthode basée sur la cognition s'inspire des mécanismes cognitifs observés chez l'être humain. En fait, les chercheurs ont montré que l'être humain se base sur la reconnaissance d'éléments caractéristiques des formes (éléments saillants) pour les identifier. Dans le domaine de la géomorphologie, cette approche nous aide à développer une méthode capable d'identifier la forme de la vallée glaciaire en identifiant ses éléments saillants. Dans le chapitre qui suit, nous allons proposer une méthodologie du travail qui met en application cette méthode en se basant sur le concept de saillance.

Chapitre 2 : Méthodologie

I. Introduction

En admettant les limites des méthodes d'identification des formes de relief présentées dans le deuxième chapitre, nous voulons travailler sur une méthode qui sera plus robuste en termes d'identification d'une vallée glaciaire. Notre méthode, comme nous l'avons indiqué dans l'hypothèse, sera basée sur l'assemblage des éléments composants de la vallée glaciaire autour des saillances. L'idée de la saillance est donc la clé majeure dans notre travail, de telle sorte que chaque élément de vallée est identifiable à partir des éléments saillants qui le définissent et la vallée glaciaire à son tour est identifiable à partir de l'assemblage spatial de ces éléments.

Dans notre cas, les données que nous allons traiter jouent un rôle important dans la définition des éléments saillants. En fait, ce qui nous concerne ce sont les éléments saillants des composants d'une vallée glaciaire dans un modèle numérique de terrain. Ce modèle ne présente pas toute la réalité physique du terrain. En outre, le MNT donne une présentation approximative de la géométrie de la surface qui dépend beaucoup de la résolution. Malgré cela, l'information géographique donnée par le MNT contient déjà une information intrinsèque qui peut être analysée, par l'exploitation des propriétés métriques, géométriques, topologiques et attributaires des données.

Dans ce chapitre, nous déterminerons les composants d'une vallée glaciaire et ses éléments saillants en donnant leurs caractéristiques et les relations qui les assemblent. Nous commencerons par les éléments les plus généraux pour aller vers les plus spécifiques. Ceci nous permettra le développement d'un modèle conceptuel qui regroupe tous les composants de la vallée et les éléments saillants qui leur sont attribués. Par la suite, nous présenterons les techniques d'identification qui conviennent à chacun des éléments du modèle conceptuel. Enfin, nous dévoilerons la méthode d'assemblage de ces éléments et de la délimitation de la vallée glaciaire.

II. Modèle conceptuel :

Avant tout, nous remarquons que la présence de tous les composants possibles d'une vallée glaciaire quelconque n'est pas garantie (figures 1 et 2 dans l'introduction). Un élément comme la pente douce se présente seulement s'il y a des éboulis ou des cônes de déjection en bas des parois de la vallée. D'autre part, la forme et la dimension d'un élément varient énormément selon la lithologie du terrain et selon le volume du glacier. De plus, nous ne pouvons pas parler d'un agencement spatial des éléments spatiaux du profil longitudinal, la présence des verrous est étroitement liée à la présence de roches dures le long du fond de la vallée. Toutefois, la vallée glaciaire contient des éléments spécifiques avec un assemblage spatial qui la définissent et la différencient de son entourage.

Dans notre projet, nous intéressons à l'assemblage spatial de ces types d'éléments pour faire l'identification de la vallée glaciaire. Une vallée glaciaire se compose obligatoirement d'un fond plat et de deux versants abrupts. Le fond et les versants de la vallée glaciaire diffèrent de ceux des autres vallées par des caractéristiques distinctives comme la pente et la largeur. Ces deux composants s'assemblent autour d'un système hydrographique spécifique aux vallées glaciaires avec deux directions d'écoulement perpendiculaires. Dans cette section, nous exposons d'abord la saillance globale de la vallée glaciaire présentée par le système hydrographique et l'assemblage spatial des composants et par la suite nous allons présenter la saillance partielle des composants de la vallée. Enfin, nous regroupons tous ces éléments dans un modèle conceptuel qui nous aide à mieux comprendre la forme de relief et aide par la suite au développement du modèle opérationnel.

1. Saillance globale :

La vallée glaciaire comme forme de relief fait partie d'un système postglaciaire, les composants de la vallée sont assemblés et interconnectés autour d'un système hydrographique. Dans la géomorphologie, le système hydrographique est souvent présenté par une partition de l'espace en bassins versants qui contiennent des réseaux de drainage. Le réseau de drainage est l'une des unités fondamentales les plus importantes en matière de caractérisation géométrique des formes de relief. Les paramètres morphométriques évalués à l'aide du réseau nous permettent de comprendre divers paramètres de terrain, tels que la nature de la forme de relief, la géologie du substrat rocheux sous-jacent et le ruissellement de surface. Il constitue un contexte spatial qui met en évidence la relation topologique entre les différentes parties du terrain.

Au niveau d'une vallée glaciaire qui est caractérisée par une forme allongée, les drains du réseau de drainage présentent une direction dominante et une autre direction perpendiculaire secondaire. La direction dominante est celle de l'auge de la vallée et les autres sont des drains qui viennent à partir du voisinage de l'auge (Rosgen, 1996). En regardant le réseau de drainage qui passe par une vallée glaciaire (figure 17), la première chose qui attire l'attention est l'agencement spatial des tronçons qui présentent les deux directions des cours d'eau au niveau d'une vallée. Nous appelons cet agencement un squelette puisqu'il présente une carcasse linéaire de la forme de relief surfacique. Cette structure relie les différents composants de la vallée glaciaire qui s'agencent autour d'elle. Le segment principal du squelette appelé talweg passe toujours et exclusivement par le fond et il suit la direction principale de la vallée. À gauche et à droite du talweg, les affluents suivent la direction secondaire perpendiculaire et ils relient le fond avec le reste du bassin versant. Dès qu'ils passent à travers les versants de la vallée, la pente des affluents augmente en marquant une rupture qui désigne la transition entre les versants et leur entourage.

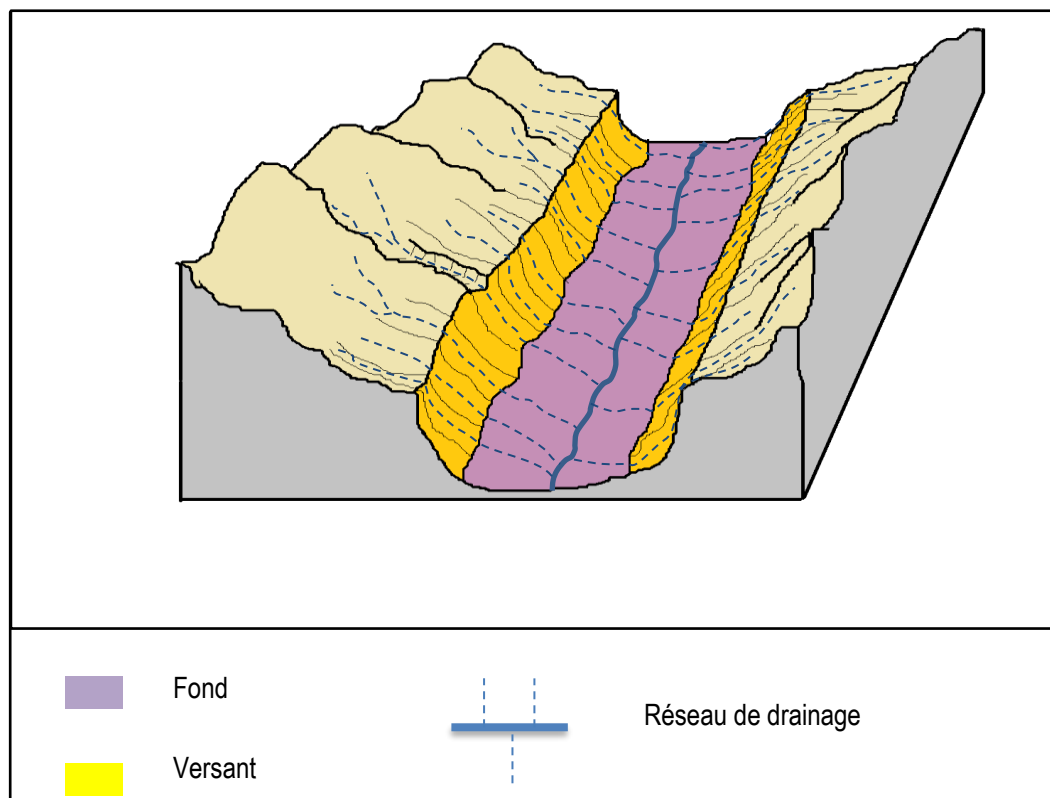


Figure 17 Saillance du contexte

Le réseau de drainage de la vallée glaciaire forme la saillance globale qui définit cette forme de relief. Les différents composants de la vallée s'assemblent toujours autour de cette saillance pour former un assemblage spatial spécifique aux vallées glaciaires.

2. Saillance partielle :

La saillance partielle est la saillance qui est issue des composants de la vallée glaciaire et qui les différencie de leur entourage. Cette saillance peut être une caractéristique géométrique comme la pente et l'aspect ou un élément spécifique qui se présente exclusivement dans un composant de la vallée. Dans cette section, nous dévoilons le type de saillance attribué à chaque composant de vallée.

a. Saillance du fond :

Le fond de la vallée (figure 18) est une zone plate entre deux versants se faisant face. Cette partie de la vallée a deux caractéristiques : une géométrique en relation avec sa pente horizontale et sa position entre deux versants et l'autre hydrologique, car elle contient le talweg (Anderson et al., 2006). Le talweg est un lieu concave de convergence du ruissellement. Son importance se résume dans le fait qu'il est directement relié au fond de la vallée, le fond de la vallée glaciaire contient toujours un talweg et le talweg de vallée se trouve toujours dans le fond. Nous pouvons dire que le talweg est un squelette du fond, toutes les autres parties du fond se trouvant autour de lui.

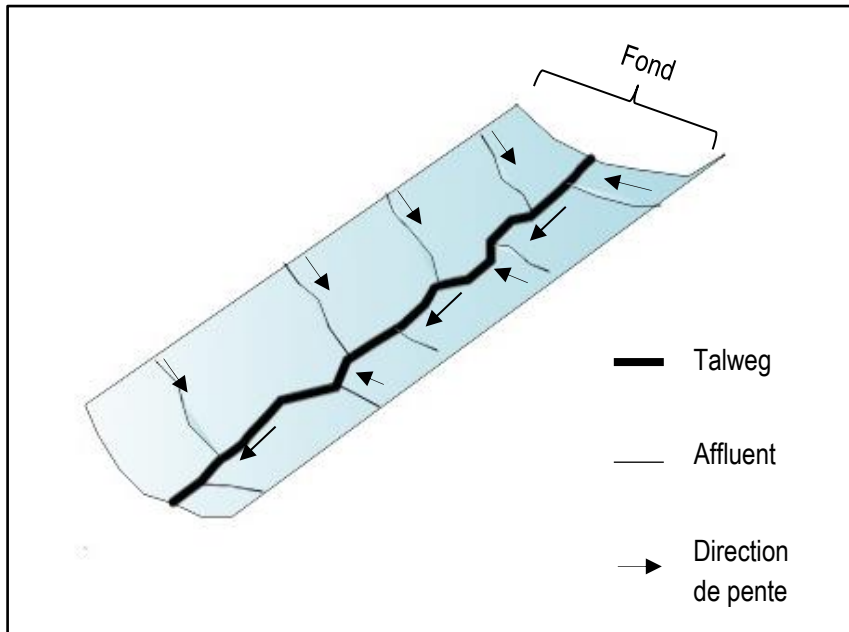


Figure 18 Fond de la vallée glaciaire

La pente du fond est généralement faible et dirigée vers le talweg qui est orienté vers la partie aval de la vallée. Les dépôts sédimentaires du fond forment parfois des formes comme les moraines qui n'ont pas une pente régulière, de même pour les verrous ou les ombilics. Cependant, ces éléments font partie du fond de la vallée glaciaire et n'ont pas de caractéristiques géométriques propres. La saillance de ce type d'élément existe dans leur position par rapport au talweg du fond et les versants. Ils ont toujours la même position spatiale, soit entre le talweg et les versants.

b. Saillance des versants :

Sous l'effet de l'érosion glaciaire, les versants d'une vallée glaciaire (figure 19) ont une pente raide qui se dirige vers le fond de la vallée. La paroi du versant est marquée par la présence d'arêtes qui ont la même direction que les versants et sont appelées contreforts. Les contreforts sont géographiquement définis comme des arêtes descendues des sommets qui bordent la vallée ou qui se situent dans un versant. Il s'agit d'une zone de transition entre le fond de la vallée à faible relief et les zones topographiques adjacentes (Anderson et al., 2006). Les contreforts présentent un élément complémentaire au réseau de drainage de la vallée glaciaire puisqu'ils délimitent la zone de captage des affluents.

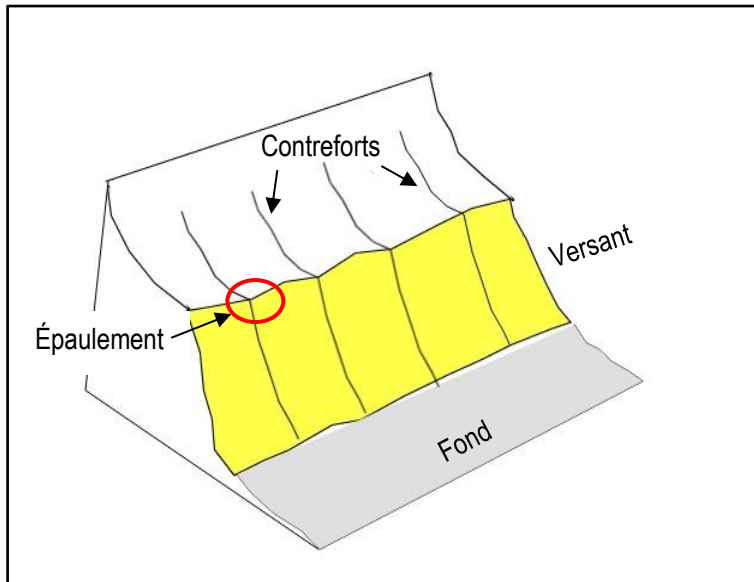


Figure 19 Versant de la vallée glaciaire

L'importance des contreforts se résume dans le fait qu'ils sont des éléments naturels qui gardent la forme de l'auge glaciaire. Ils étaient façonnés par l'érosion glaciaire qui a formé la vallée et ils sont les éléments de la vallée les plus résistants à l'érosion postérieure. L'allure des contreforts à gauche et à droite d'un fond a la forme d'une tuile romaine, soit une parabole en forme de "U". À cet égard, l'analyse des contreforts aide à caractériser les versants adjacents du talweg et à identifier entre autres la vallée glaciaire. De plus, la limite de l'effet de l'érosion glaciaire est marquée par des éléments naturels identifiables dans les contreforts qui sont les épaulements. Ils sont des discontinuités marquées par le glacier au niveau des contreforts. Ceux-ci présentent une saillance identifiable sur un MNT, car elle se caractérise par des discontinuités géométriques nettes. L'identification des épaulements n'est pas importante uniquement pour identifier la vallée glaciaire, mais aussi pour la délimiter puisqu'ils présentent la limite de l'auge glaciaire et de la vallée glaciaire.

3. Le modèle conceptuel :

La vallée glaciaire est un ensemble des composants assemblés autour du réseau de drainage que nous considérons comme squelette de cette forme. La compréhension de l'assemblage spatial de ces éléments forme une clé majeure pour identifier la vallée glaciaire. Le modèle conceptuel suivant (figure20) explique les types de relations spatiales existants entre chaque élément de vallée. Tout d'abord, toute vallée glaciaire est incluse dans un bassin versant : nous considérons le bassin versant

comme l'unité primaire de partitionnement de l'espace. Chaque bassin est associé à un réseau de drainage qui relie toutes ses parties de l'amont vers l'aval. Le réseau de drainage lui-même est partitionné selon l'ordre des cours d'eau principaux en squelettes. Le squelette est composé par un talweg et ses affluents, il est délimité par la limite des sous-bassins versants des affluents. Cette limite forme la zone préliminaire que nous considérons comme une unité secondaire de partitionnement de l'espace. Le squelette relie les différentes parties de la vallée glaciaire. Chaque élément est traversé par une partie du squelette. Le fond de la vallée est identifiable à partir de la surface à pente faible autour du talweg principal du squelette. Le fond peut comporter des formes irrégulières comme les moraines. Les crêtes qui sont dans la zone préliminaire sont étroitement reliées à la forme de vallée présentée dans cette zone. Les versants de la vallée glaciaire sont connectés au talweg via le squelette. D'autre part, les versants sont formés par la surface à pente raide tout autour des contreforts. Les contreforts sont des éléments saillants pour le versant comme dans le cas du talweg pour le fond. Les versants et le fond partagent parfois une limite commune qui définit les terminaisons des contreforts et le début de la rupture de pente, dans d'autres cas ces deux éléments sont disjoints et une partie transitoire se présente entre les deux. La partie transitoire peut être une pente douce formée par les cônes alluviaux ou des moraines latérales. Les épaulements dans les contreforts constituent la saillance formée par la limite de la vallée, ils marquent la zone transitoire entre les versants et le reste de la zone montagneuse.

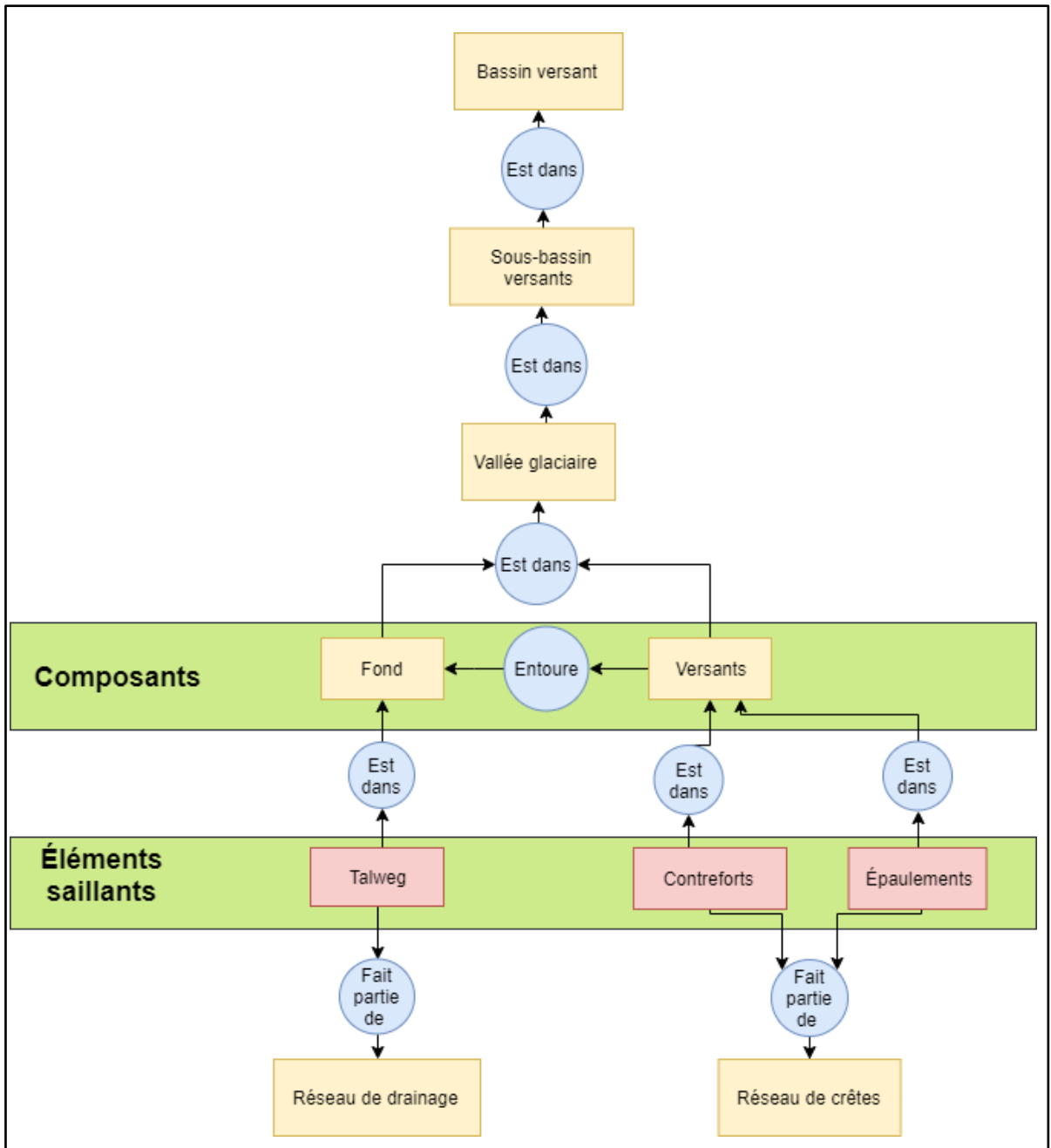


Figure 20 Modèle conceptuel représentatif d'une vallée glaciaire (composants, éléments saillants et assemblage spatial)

III. Modèle opérationnel:

Dans le but de proposer une méthode automatique d'identification des vallées glaciaires, nous avons développé la méthodologie de travail suivante. Cet enchaînement se base principalement sur l'idée de l'identification des formes de relief à partir des éléments saillants présentés par Guilbert et coll dans (Guilbert et al., 2016). L'analyse de la géomorphologie de la vallée en U nous aide à construire un modèle automatique d'identification de sa forme en nous basant sur ses éléments saillants. L'étape de la conceptualisation que nous avons détaillée dans le premier paragraphe présente un pont entre la perception humaine et les données spatiales. Cette formalisation nous aide à la transformation des connaissances théoriques de l'expert vers des étapes de traitement implantables dans un ordinateur. Ensuite, la transformation logique consiste à déterminer les outils informatiques adéquats pour chaque étape du modèle d'identification des éléments saillants.

Dans cette section, nous décrivons le modèle opérationnel entier qui sert à identifier la vallée glaciaire. Par la suite, chaque étape du modèle sera détaillée et nous présentons sa base théorique et technique adéquate à sa réalisation.

1. Le modèle en général:

Dans cette partie, nous décrivons brièvement chaque étape du modèle opérationnel en montrant son importance pour le but de notre travail. Les étapes sont résumées dans les figures 21 et 22 avec leur ordre, entrées et sorties. Tout d'abord, un modèle numérique de terrain MNT est notre donnée de départ. Le MNT est une représentation de la réalité de la surface. Selon la résolution, des mesures d'élévation sont acquises pour chaque cellule de grille. Aucune relation spatiale entre les différentes cellules n'est mentionnée pour ce type de modèle. À cet égard, l'intégration du contexte est primordiale pour aboutir à l'identification des formes de relief à partir d'un MNT. Pour cela, on utilise des réseaux linéaires, soit le réseau de drainage et le réseau des crêtes pour travailler sur les relations topologiques entre les différentes parties de surface. La hiérarchie du réseau de drainage par l'ordre d'Horton (Li, 2006) et le partitionnement de l'espace en sous-bassins versants nous aident à organiser les étapes suivantes qui aboutissent à l'identification de la vallée glaciaire. Nous pouvons diviser le modèle en deux grandes étapes soit l'extraction des éléments saillants suivie de l'analyse et l'interprétation.

❖ Extraction des éléments saillants :

1. Extraction du réseau de drainage et du réseau de crêtes à partir du MNT.
2. Partitionnement de chaque bassin versant en des sous-bassins versants qui constituent la zone préliminaire d'analyse.
3. Analyse de la pente des talwegs associés à chaque sous-bassin versant et identification de ceux qui répondent au critère d'horizontalité, soit une pente inférieure à 1,5 degrés.
4. Identification du réseau de contreforts situés dans la zone préliminaire à gauche et à droite du talweg.
5. Construction préliminaire du fond.
6. Délimitation du fond plat à partir de l'identification des ruptures de pente les plus proches à droite et à gauche du talweg dans le fond préliminaire.

❖ Analyse et interprétation :

1. L'analyse de l'allure des contreforts à gauche et à droite du talweg et l'interprétation de la nature de la vallée associée au talweg.
2. L'analyse longitudinale et fusion des vallées dans le cas de deux vallées voisines.
3. L'identification des épaulements et la reconstruction de l'étendue géographique de la vallée glaciaire.

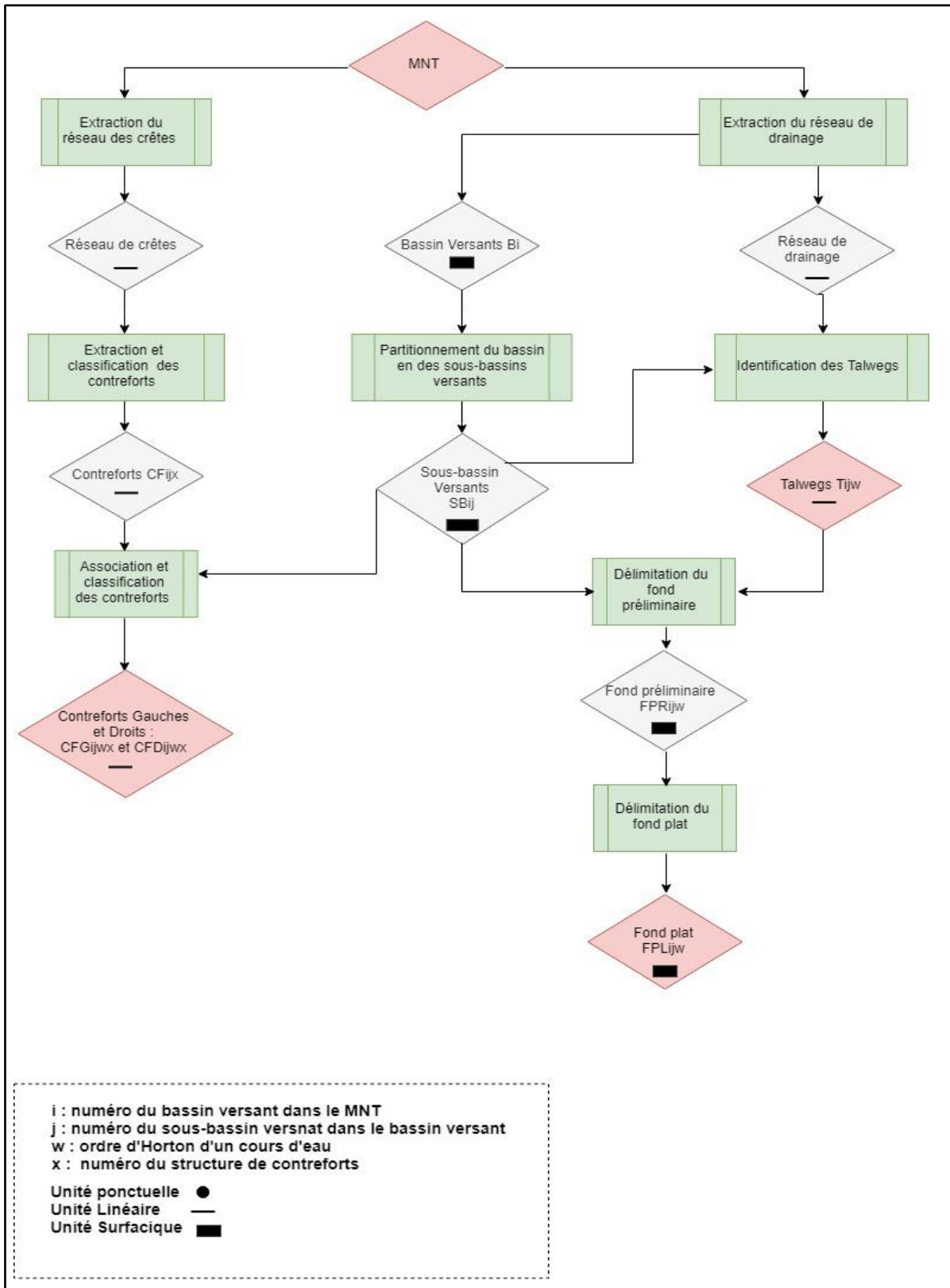


Figure 21 Modèle opérationnel 1 : extraction des éléments saillants

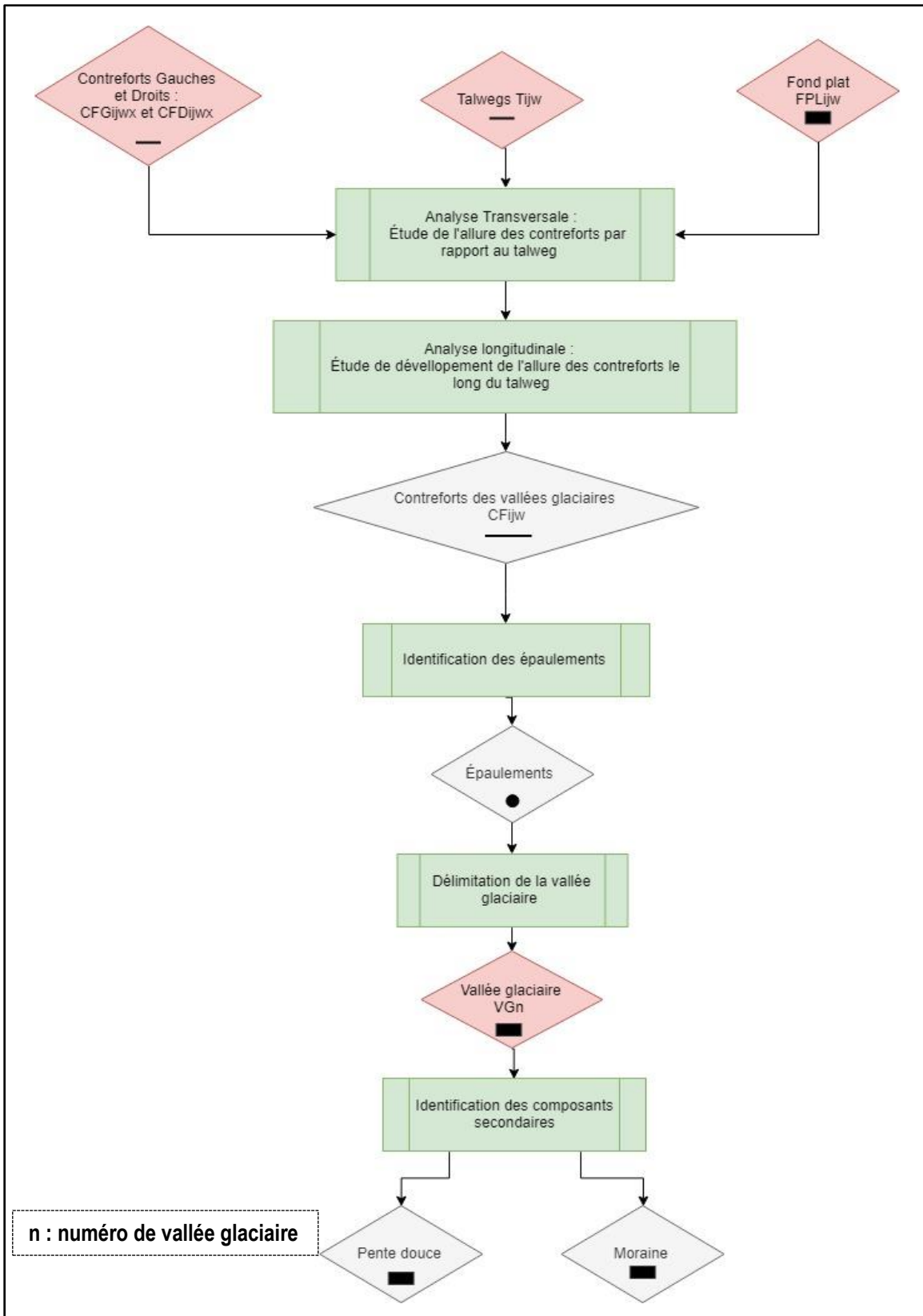


Figure 22 Modèle opérationnel 2 : analyse et interprétation

2. L'extraction du réseau de drainage

Le MNT est une représentation numérique des altitudes. C'est à partir de ce type de donnée qu'il est effectivement possible d'extraire le réseau hydrographique. Les étapes habituelles utilisées pour extraire le réseau de drainage sont bien définies. Seules quelques variantes méthodologiques et la liste des résultats secondaires diffèrent (Chorowicz et al., 1992). En effet, le réseau est défini à partir d'une simulation du ruissellement de surface sur le relief. Il s'agit essentiellement de l'identification de la pente la plus forte entre deux cellules. La recherche de la direction de flux se focalise dans les huit cellules voisines, d'où l'appellation 8D (Al-Saady et al., 2016). La figure 23 résume les étapes d'extraction d'un réseau de drainage à partir d'un MNT :

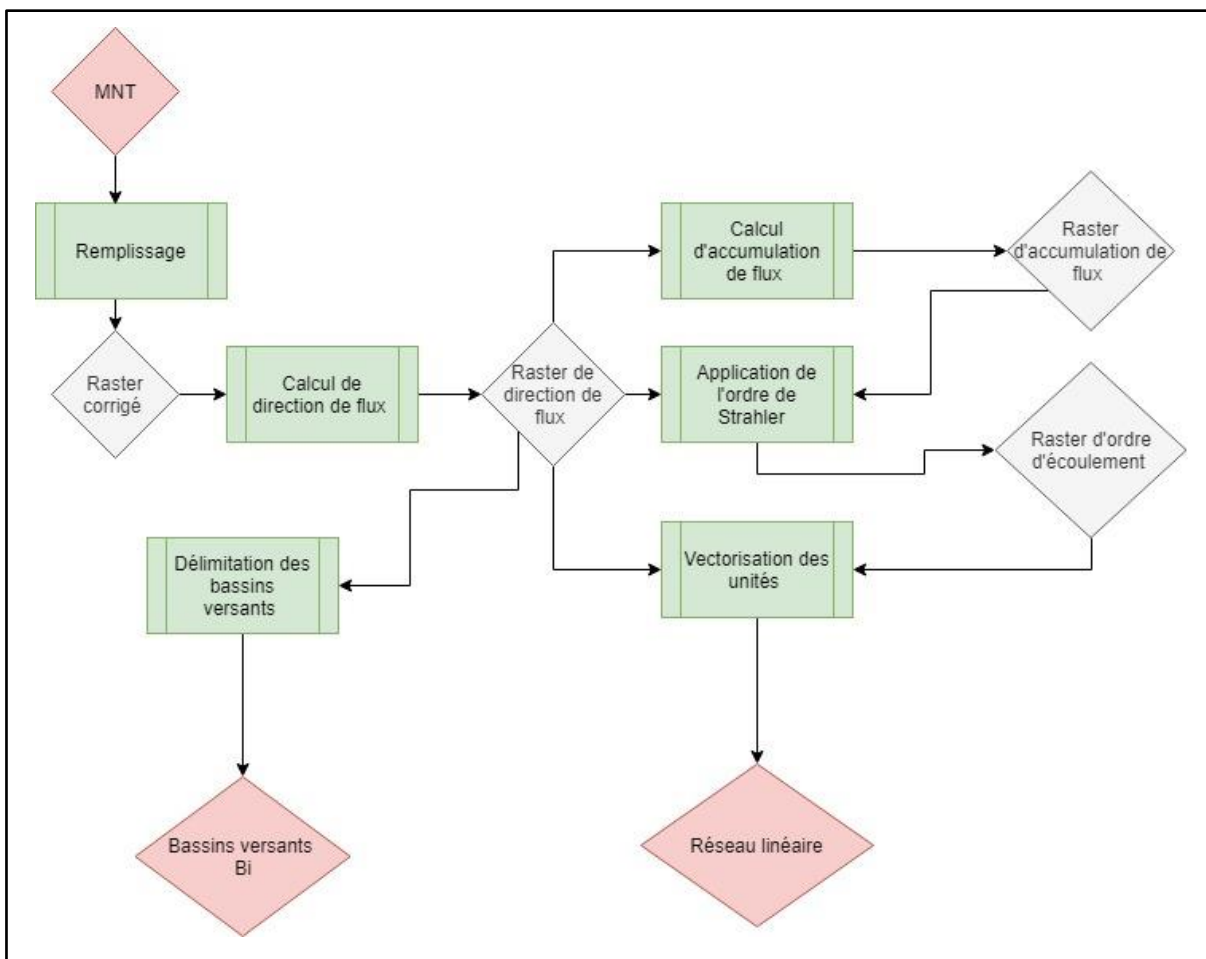


Figure 23 Les étapes d'extraction du réseau de drainage à partir d'un MNT

Un MNT est d'abord corrigé par le remplissage des cuvettes. En fait, les cuvettes sont souvent des erreurs en dues à la résolution des données ou à l'arrondi d'altitudes à la valeur entière la plus proche. Après le remplissage, la direction de flux est calculée pour chacune des cellules du MNT. Cette étape permet la modélisation de la direction de flux à partir de chaque cellule vers son voisin de plus grande pente descendante.

À partir des valeurs de la direction de flux, on peut définir l'accumulation qui présente le flux cumulé sous la forme d'une pondération cumulée de toutes les cellules s'écoulant dans chaque cellule en pente descendante du raster en sortie. Nous attribuons à chacune des cellules un ordre pour définir la hiérarchie du réseau. La méthode de Strahler sera utilisée pour notre cas puisqu'elle est la méthode la plus utilisée par les hydrographes. Cette méthode consiste à donner un ordre de 1 aux cours d'eau qui ne sont pas connectés dans leur sommet avec un autre cours d'eau. Si deux flux du même ordre fusionnent, le flux résultant reçoit un nombre augmenté d'une unité. Si deux rivières avec des ordres de flux différents fusionnent, le flux résultant reçoit le plus élevé des deux nombres. De ce fait, le cours d'eau connecté à l'exutoire du bassin reçoit l'ordre maximal. Ensuite, les cellules connectées sont vectorisées afin de former un réseau linéaire représentatif du réseau de drainage classé en ordre des cours d'eau.

3. Identification des talwegs

Une fois que nous avons fait l'extraction du réseau de drainage, nous passons à la classification du réseau par la méthode de Horton. Cette méthode est similaire à la méthode de Strahler dans le fait de donner aux cours d'eau les plus proches de l'aval un ordre maximal. Remarquons que la méthode d'Horton donne l'ordre maximal au cours d'eau le plus long continu qui part de l'exécutoire vers la partie amont du bassin que ce soit l'ordre. L'ordre suivant suit la même logique et ainsi de suite. C'est la différence entre la méthode d'Horton et celle de Strahler (Li, 2006). Cette approche nous aide à étudier le cours d'eau principal d'une vallée entièrement sans avoir la possibilité de changer son ordre dans les points de ramification.

L'extraction des talwegs se fait à partir de l'identification des cours d'eau ayant des ordres spécifiés par l'utilisateur et qui possèdent une pente horizontale. Une pente horizontale est un gradient qui ne dépasse pas 1,5 degré. Le modèle suivant (figure 24) explique les étapes de l'extraction du talweg. Le modèle possède trois entrées soit le réseau de drainage, le bassin versant et le niveau de traitement.

Le réseau de drainage a été construit dans l'étape précédente ainsi que le bassin versant. Les bassins versants BV_i seront partitionnés en sous-bassins versants SBV_{ij} . Le partitionnement est basé sur les valeurs d'accumulation dans les liaisons d'écoulement. Quand une liaison d'écoulement présente une valeur d'accumulation supérieure à la valeur indiquée, le point d'écoulement sera un point aval pour un bassin versant plus petit inclus dans le grand bassin versant. Cette valeur est la valeur minimale d'accumulation d'une vallée glaciaire.

Le niveau de traitement présente l'ordre d'Horton minimal des talwegs que l'utilisateur voulait traiter pour chercher des vallées glaciaires. Les cours d'eau seront traités en itération par ordre. Nous commençons par l'ordre d'Horton le plus élevé vers l'ordre minimal précisé par l'utilisateur. Les cours d'eau seront classés par sous-bassin versant en plus de la classification d'Horton soit Ch_{ijw} .

Ensuite, la valeur de la pente moyenne sera calculée pour chaque cours d'eau en suivant la formule suivante. Les talwegs sont les cours d'eau avec une pente moyenne inférieure à 1,5 degré.

$$Pm = \sum_{n=0}^N \frac{P_n \ln}{NL}$$

Avec : n : indice du cours d'eau, N : nombre maximal de cours d'eau, Pm : pente moyenne, P_n : pente d'un segment du cours d'eau, \ln : longueur du segment d'un cours d'eau, L : longueur totale du segment

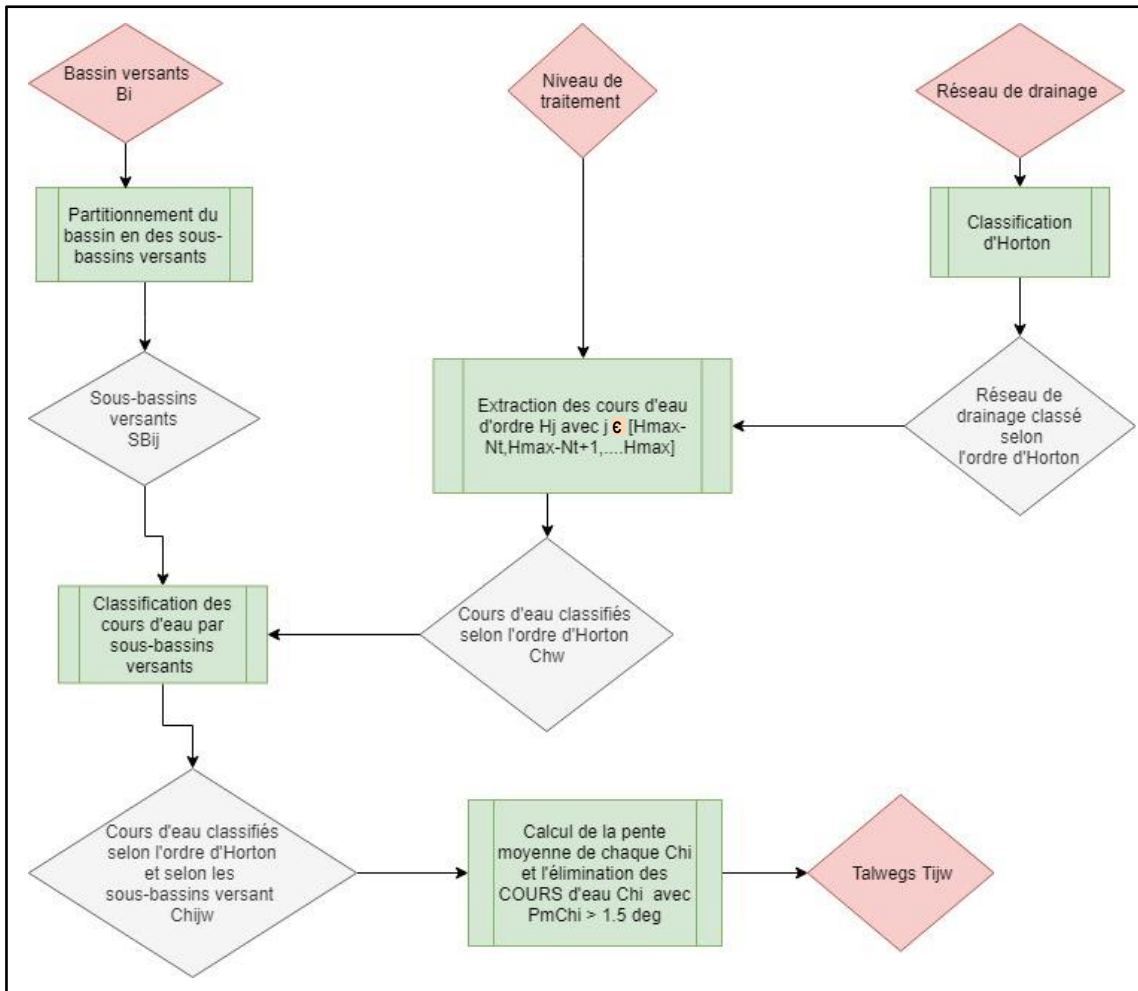


Figure 24 Modèle d'extraction du talweg

4. Extraction du réseau de crêtes:

Les versants et le fond présentent les deux éléments principaux d'une vallée glaciaire. Les versants sont des parois à pente raide et avec une direction vers le fond. Les contreforts comme nous avons déjà vu présentent les éléments saillants des versants de la vallée glaciaire. La définition d'une crête demeure relativement vague. En fait, les spécialistes définissent la crête comme une zone ou une bande d'activité géomorphologique nulle et dans d'autres cas comme une ligne qui suit la limite du bassin versant (Han et al., 2016). La notion de ligne de crêtes apparaît aussi dans l'hydrologie de surface, mais comme un attribut de réseau de drainage. La ligne de crête dans ce cas présente une ligne d'accumulation nulle ou faible au contraire du cours d'eau qui présente la ligne d'accumulation

maximale. La délimitation des zones d'accumulation et l'identification des cours d'eau nous aident à définir des bassins et des sous-bassins versants dont les limites sont notamment des lignes de crêtes. Toutefois, cette méthode a un inconvénient majeur, soit le traçage des lignes de crêtes artificielles pour fermer les bassins.

En fait, la méthode classique très souvent utilisée pour identifier les lignes de crêtes sous forme d'un réseau qui couvre tout le terrain suit les mêmes étapes d'extraction de réseau de drainage, mais avec un terrain renversé (figure 25).

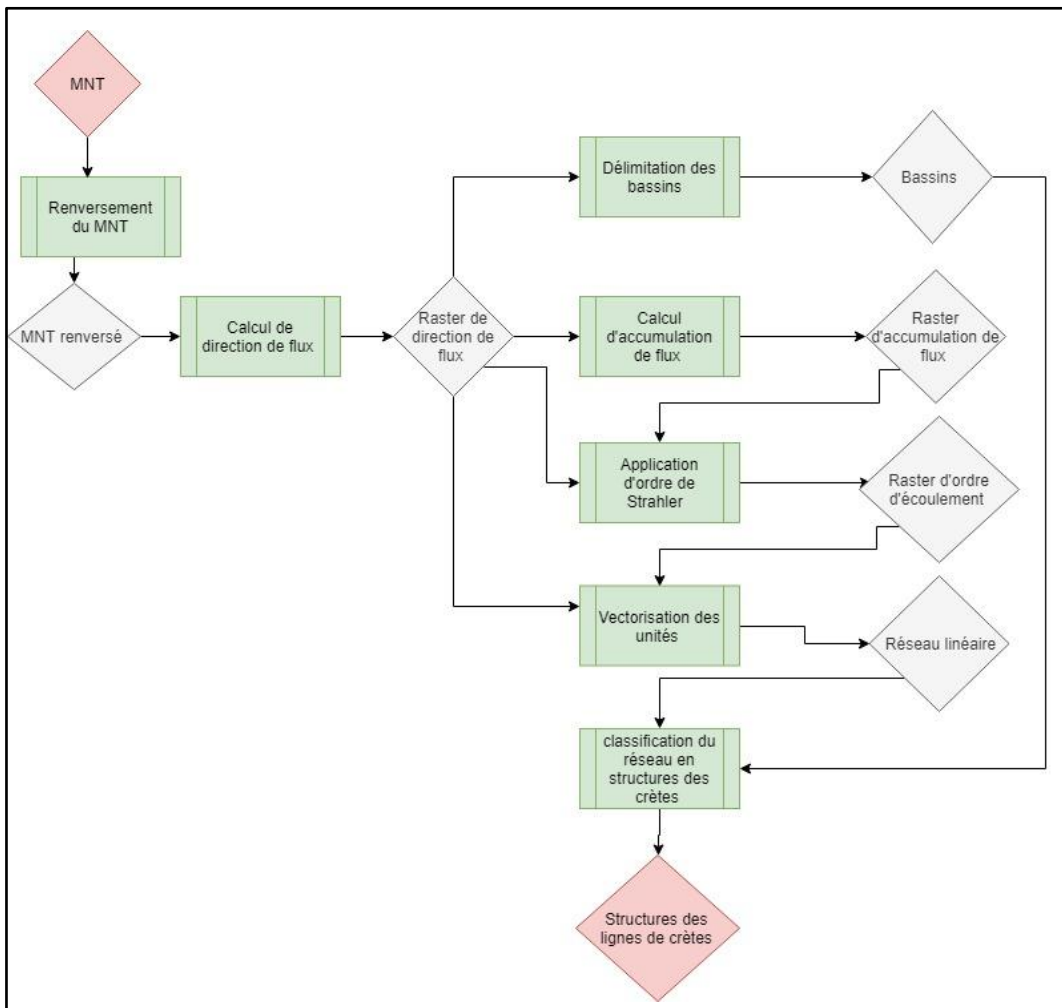


Figure 25 Modèle d'extraction du réseau de crêtes

Dans ce cas, les lignes de crête seront présentées par des structures linéaires interconnectées et séparées les unes des autres. De cette façon, chaque versant ou bosse sera présenté par ses propres

lignes de crêtes. Dans la figure suivante (figure 26), nous présentons chaque structure de crêtes par une couleur différente. Une structure peut contenir une ou plusieurs lignes de crêtes, ces structures sont séparées par les affluents du réseau de drainage.

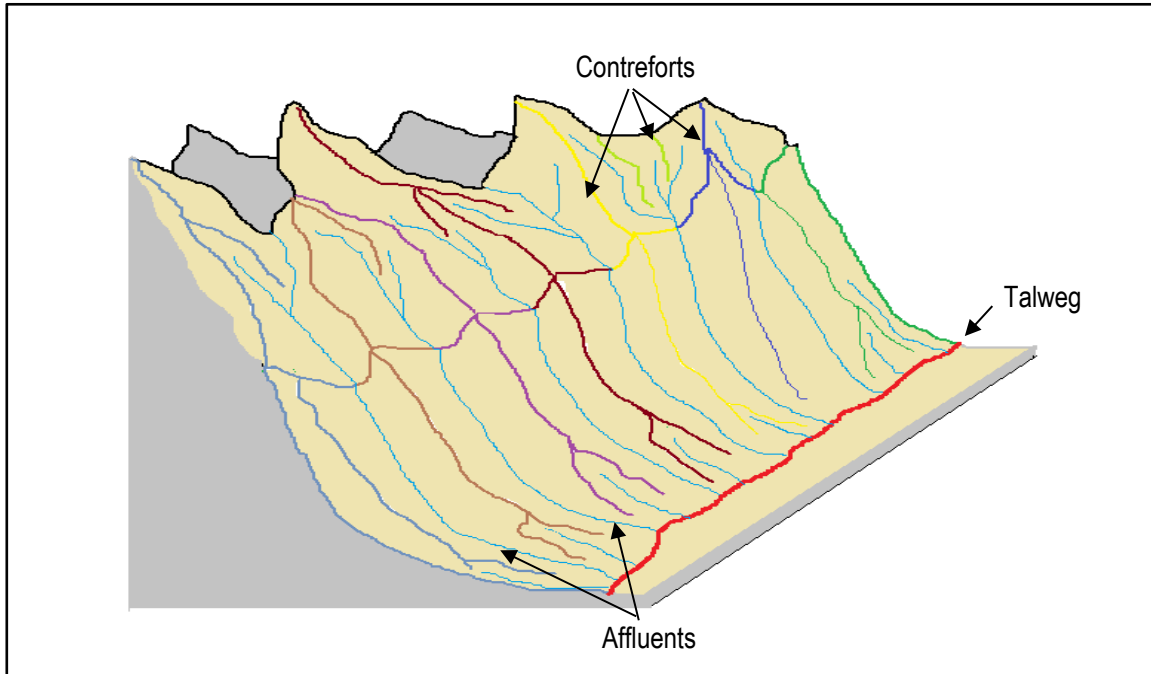


Figure 26 Le réseau des lignes de crêtes dans une vallée

5. Extraction du fond préliminaire:

Le fond préliminaire est la zone autour du talweg limitée par les pieds des contreforts à gauche et à droite de lui. C'est la zone englobante du fond plat, mais qui pourrait contenir d'autres composants comme les moraines ou la pente douce. Le modèle suivant (figure 27) présente les étapes qui servent à identifier le fond préliminaire associé au talweg.

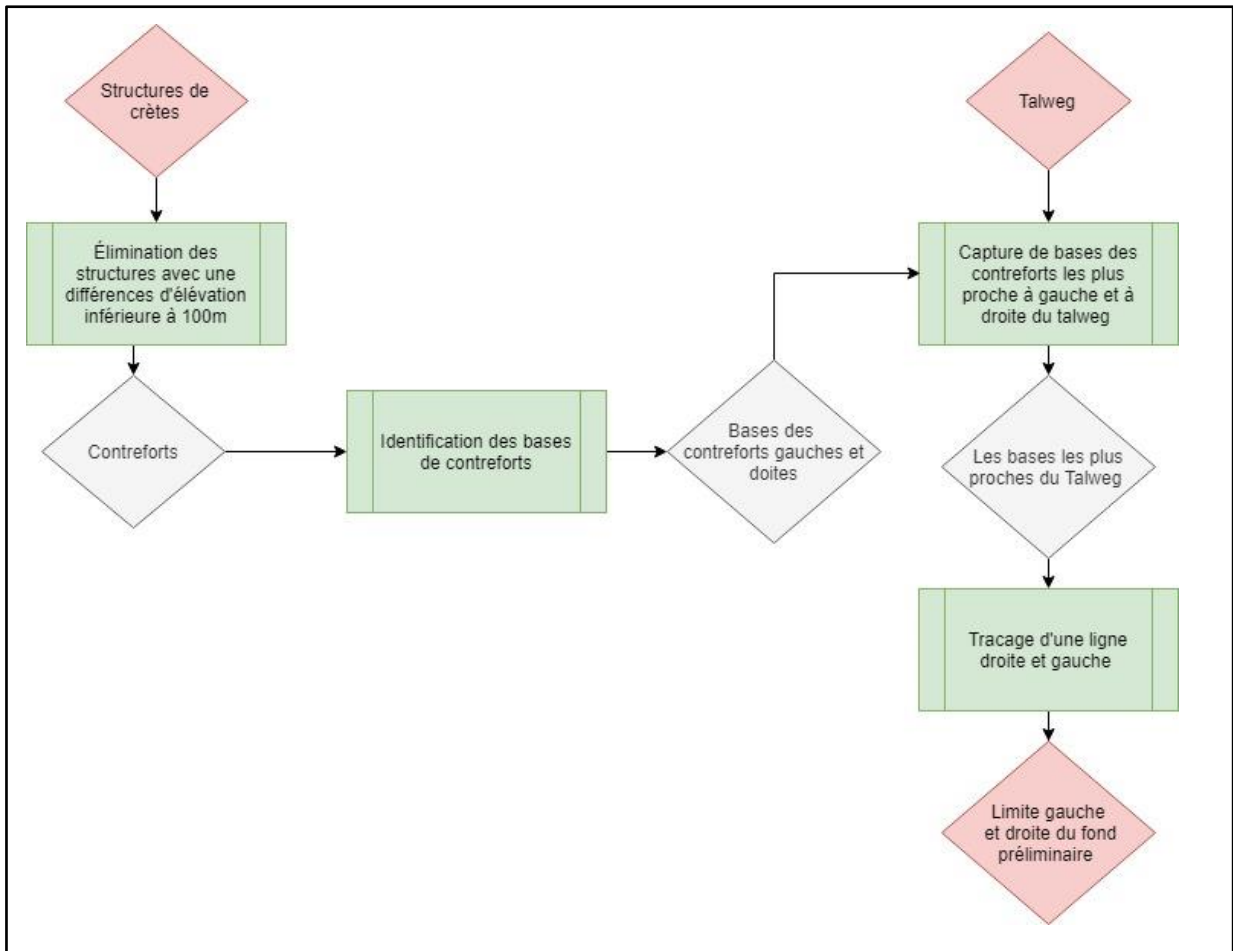


Figure 27 Modèle d'extraction du fond préliminaire

Tout d'abord, nous faisons l'association de chaque talweg avec les structures des crêtes les plus proches de lui dans son sous-bassin versant. Par la suite, nous éliminons les structures qui ne présentent pas une différence d'élévation supérieure à 100 m, soit le minimum d'élévation d'un versant de vallée glaciaire (Coles, 2014). Dans le cas où aucune des crêtes ne présente ce critère, la limite du sous-bassin versant sera utilisée comme limite du fond préliminaire (figure 28).

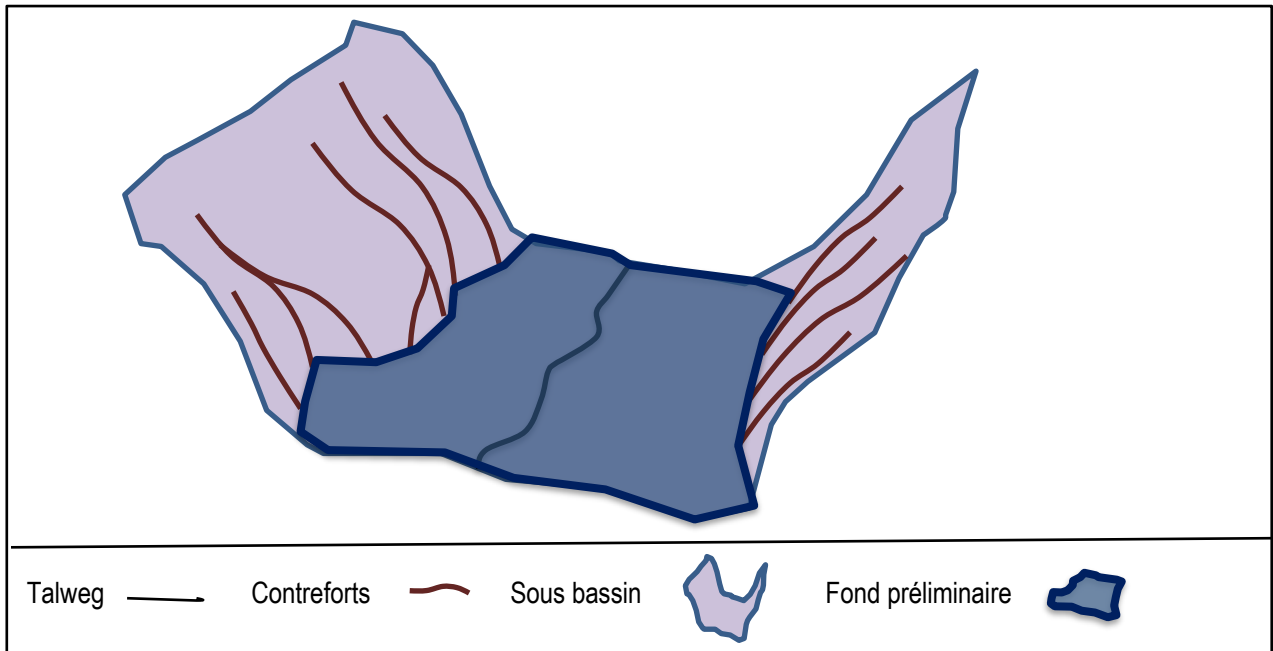


Figure 28 Le fond préliminaire

6. L'extraction du fond plat :

La technique que nous allons adopter pour l'identification du fond plat de la vallée se base sur l'extraction de toute la surface plate autour du talweg de vallée. Cette surface sera délimitée à l'aide de l'identification des ruptures de pente localisées dans le fond préliminaire à gauche et à droite du talweg (figure 29). Nous admettons que la limite du fond est marquée par un changement brusque de pente de surface autour du talweg. Nous définissons une rupture comme une variation de pente supérieure à 5 degrés (Straumann & Purves, 2011). Pour avoir un résultat plus précis, nous construisons des profils perpendiculaires au talweg qui relient les limites gauche et droite du fond préliminaire au talweg et nous découpons le talweg et les profils en des morceaux plus fins. Nous choisissons une longueur légèrement supérieure à la diagonale de pixel du MNT puisqu'il présente la longueur minimale qui couvre deux cellules de surface dans un modèle. Cela nous aide à avoir le maximum de précision pour la délimitation du fond et nous évitons aussi des valeurs nulles de pente. Dans le cas où la rupture de pente se localise dans la liaison talweg-affluent, une distance minimale qui présente la largeur de cellule raster sera prise comme largeur du fond.

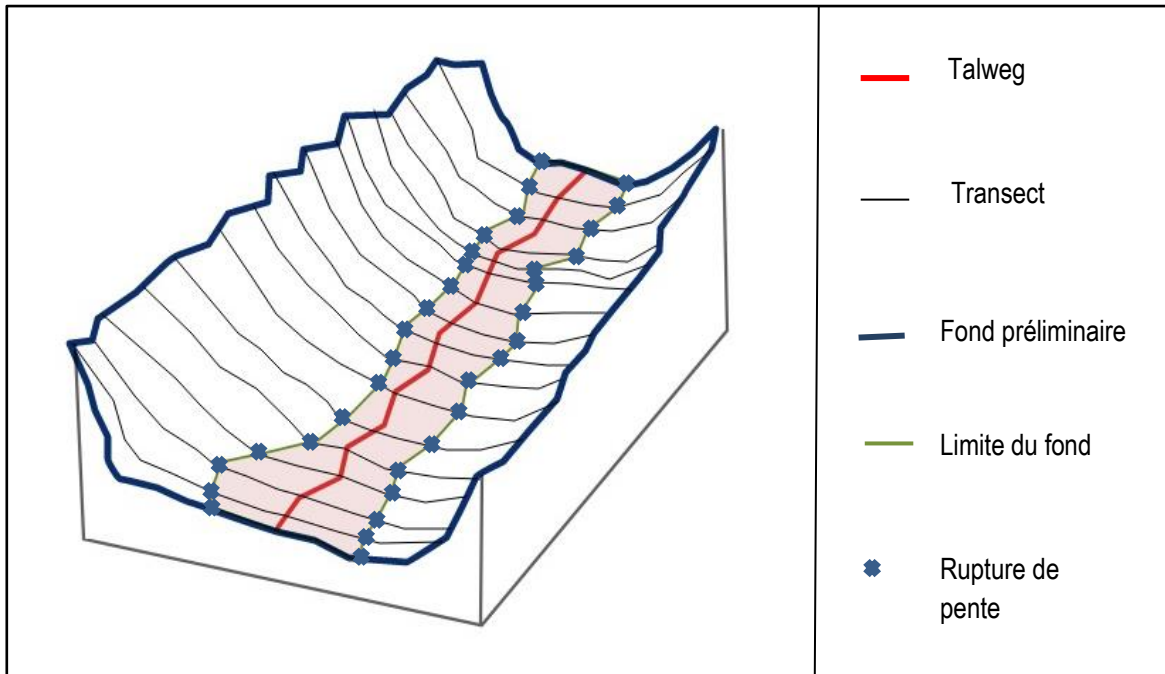


Figure 29 Extraction du fond à partir des ruptures de pente

Comme nous l'avons vu dans l'introduction, le fond de la vallée glaciaire peut contenir des déformations comme les moraines qui sont des sédiments déposés dans le fond. La forme des moraines est irrégulière, une bosse ou un monoclin selon sa position dans le système glaciaire. L'irrégularité topographique de la surface de moraines donne à cette forme une pente différente de celle de son entourage. À cet égard, le critère de pente classe les moraines comme des versants qui ne font pas partie du fond. Dans cette étape, les moraines seront considérées comme des éléments qui ne font pas partie du fond puisque nous cherchons le "fond plat" comme une forme de surface et non pas le fond en tant qu'unité géomorphologique. Après l'identification des versants et la délimitation de la vallée, la caractérisation des moraines sera plus facile avec la connaissance de leur entourage spatiale.

7. Analyse:

Après l'identification du fond et des contreforts, la zone d'étude devient plus susceptible à l'analyse géométrique et statistique. Les éléments que nous possédons sont le talweg, le fond, les contreforts et l'étendue géographique du sous-bassin versant. Cette étape consiste à analyser ces éléments d'une manière transversale (talweg et attributs) et d'une autre manière longitudinale (statistique).

a. Analyse transversale :

La figure suivante (figure 30) présente la géométrie du profil transversal accompagné par les paramètres. Le fond est caractérisé par sa largeur et son élévation moyennes. À gauche et droite du fond, se trouvent les versants représentés par les contreforts. Chaque contrefort est défini par son maximum d'élévation et par la différence d'élévation avec le fond. On trouve aussi deux autres formes de distance, la distance horizontale vers le fond et la distance verticale caractérisée par la hauteur. Le contrefort possède une longueur initiale qui présente la distance minimum entre le sommet et le fond et une longueur réelle qui présente la longueur du profil topographique formé par le contrefort.

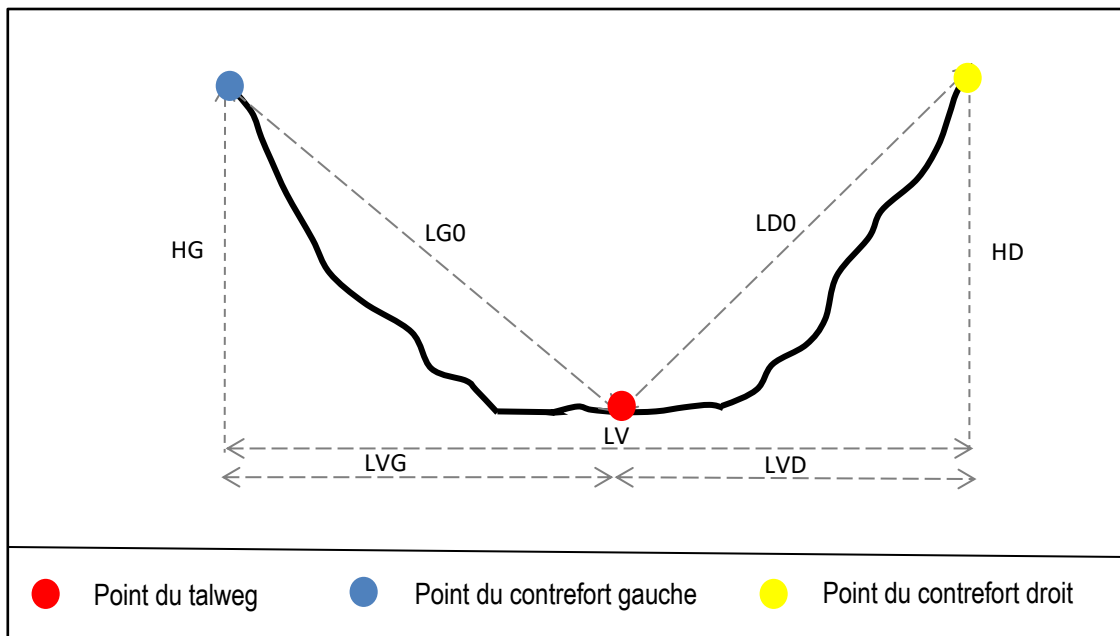


Figure 30 Profil d'analyse transversale d'une vallée

LV : largeur totale de la vallée, LDO : longueur de la plus courte ligne entre un point du contrefort droit et un point du talweg le plus proche, LVD : largeur droite de la vallée, HD : différence d'élévation entre un point de contrefort du versant droit et le point du talweg le plus proche, LG0 : longueur de la plus courte ligne entre un point du contrefort gauche et un point du talweg le plus proche, LVG : largeur gauche de la vallée, HG : différence d'élévation entre un point de contrefort du versant gauche et le point du talweg le plus proche

Cette analyse consiste à étudier l'allure des points de contreforts à gauche et à droite du talweg. Comme nous avons déjà précisé dans la première partie, l'allure de l'auge glaciaire est bien définie dans les contreforts. L'étude de la position des points de contreforts par rapport au talweg nous aide à comprendre la forme de la vallée glaciaire si elle est une vallée en V ou une vallée en U.

Nous basons la caractérisation de l'allure des contreforts sur les études de Coles (Coles, 2014) qui a fait une vaste analyse des vallées glaciaires dans des zones différentes de la planète. Ces études consistent à mesurer et modéliser des différents paramètres au niveau de 8005 vallées glaciaires dans l'objectif de donner des critères qui différencient cette forme de vallée des autres formes (Coles, 2014). Nous présentons ci-dessous les paramètres que nous allons utiliser pour analyser et interpréter la forme de la vallée en se basant sur les études de Coles 2014.

- La loi de puissance :

La loi de puissance est une loi développée dans le but de caractériser le profil transversal d'une vallée:

$$y = ax^b$$

Où x et y sont les distances horizontales et verticales entre un point quelconque du profil et le point d'origine présenté par le point du talweg le plus proche, a et b sont des constantes. Une augmentation de l'exposant b vers 2,0 correspond à un profil transversal de vallée glaciaire parabolique, un exposant b de 1,0 correspond à une vallée en forme de V, tandis qu'un exposant inférieur à 1,0 indique une vallée fluviale avec pentes convexes vers le haut.

En appliquant la loi de puissance, on remplace le profil transversal schématisé arbitrairement dans la majorité des cas par les contreforts associés à notre zone d'étude. Comme nous avons indiqué, les contreforts conservent mieux l'allure de l'auge glaciaire aux contraires des autres points des versants, ils sont des arêtes naturelles qui suivent la pente du versant de la vallée. Dans ce cas, l'équation de loi de puissance prend la forme suivante :

$$H = aL_v^b$$

Avec H est la différence d'élévation entre un point du contrefort et le point le plus proche du talweg, L est la distance horizontale qui sépare ces deux points. Notre analyse se fixera sur l'étude de la

constante b tandis que nous fixons la valeur de a pour une valeur de 0,000406, soit la constante a d'une forme de vallée en tuile romaine. Cette forme est mentionnée comme la forme idéale d'une parabole de l'auge d'une vallée glaciaire (Paul, 1976).

- Rapport de forme : FR

C'est le rapport entre la profondeur maximale d'une vallée et sa largeur totale dans un point donné.

$$FR = \frac{H}{L} * 100$$

Avec H la différence d'élévation entre un point du contrefort et le point le plus proche du talweg, L est la distance horizontale qui sépare ces deux points. Ce rapport doit être supérieur à 20 pour une vallée glaciaire. Dans notre cas, nous étudions la largeur partielle Lp d'un seul côté du versant et pour cela nous modifions cette équation :

$$FR = \frac{H}{Lp*2}$$

Dans ces études, Coles a conclu qu'une différenciation entre une vallée en V et en U doit inclure obligatoirement une étude simultanée de ces deux indices. Il a indiqué que seuls les points qui présentent à la fois des valeurs de FR et b supérieures à 0,2 et à 1,5 en ordre font partie de l'auge glaciaire.

b. Analyse longitudinale :

L'analyse longitudinale est une analyse générale qui consiste à étudier la distribution et la fréquence du résultat de l'analyse transversale dans tout le sous-bassin versant. L'analyse transversale permet de savoir si un point du talweg peut appartenir à une vallée glaciaire, cette analyse a comme objectif l'interprétation de la nature de la forme de relief présentée dans le sous-bassin versant pour un seul point du talweg. Toutefois, l'analyse longitudinale vise l'étude de l'appartenance des points tout le long du talweg. Cette étude permet l'interprétation de la nature de vallée dans le sous-bassin versant où elle permet aussi d'indiquer la limite entre les différents types de vallées si une vallée présente deux formes le long d'un seul talweg. Cette analyse est purement statistique, mais elle se base sur la distribution spatiale des données. Cette distribution permet le regroupement des données en plusieurs façons ce qui sert à aider à l'interprétation.

- Groupement par versant :

Les données dans ce cas sont groupées selon leur appartenance au versant droit ou au versant gauche (figure 31). Chaque point est relié à un groupe de points de contreforts gauches et droits. Ces mêmes points ont déjà le point du talweg comme point d'origine dans le calcul des coefficients d'allure des contreforts. Ce type de données vise l'étude de la symétrie de la vallée en comparant les données du versant droit et versant gauche. Une vallée glaciaire présente deux versants qui possèdent une allure des contreforts sous la forme de U.

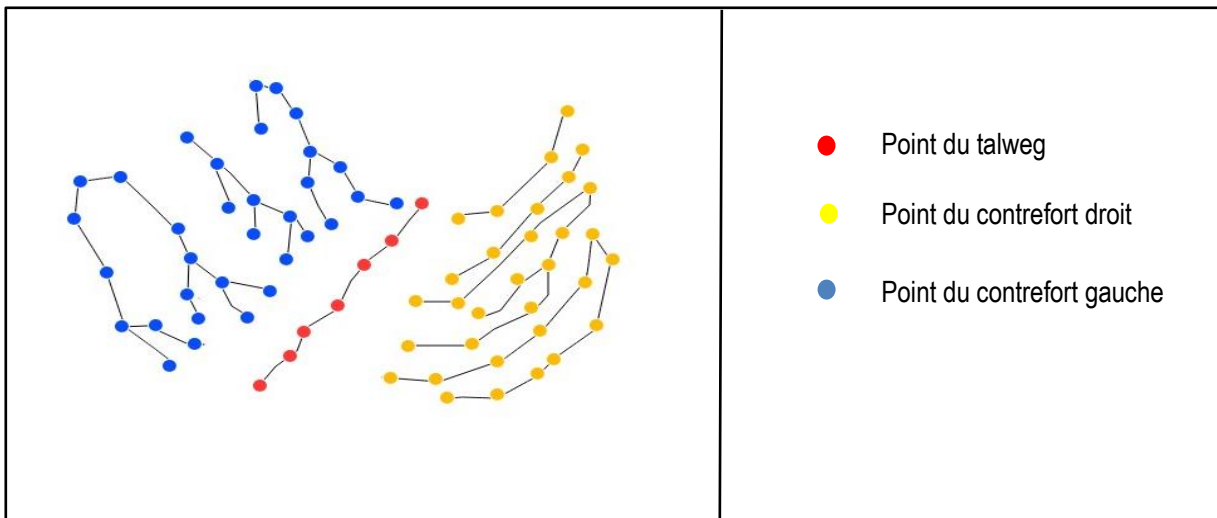


Figure 31 Groupement des points par versant

- Groupement le long du talweg :

Cette distribution vise l'étude du développement des données tout le long d'un talweg de la partie aval vers l'amont. Chaque point est relié à un groupe de données des points de contreforts gauches et droits. Ces points seront classés selon leur élévation, soit l'élévation minimum pour l'aval et l'élévation la plus haute pour l'amont. L'analyse de l'allure générale des données sert à interpréter la forme de vallée le long du talweg. Dans le cas de deux types de vallées, cette distribution sert à identifier le point limite entre les deux types.

- Fusion des sous-bassins :

Dans le cas de deux bassins versants voisins qui incluent une vallée glaciaire, cette fusion permet de grouper les données en suivant la même logique de regroupement vue précédemment. Cette étude permet de chercher la rupture entre les deux zones. Le cas échéant, les deux vallées seront collées et définies comme une seule vallée glaciaire.

8. La délimitation de la vallée et ses composants :

Après la détermination de la nature des vallées dans chaque sous bassin versant et la fusion de ceux qui contiennent la même vallée, nous nous focalisons sur la délimitation des vallées glaciaires. Les contreforts de la vallée glaciaire contiennent des ruptures de pente dans leurs sommets qui s'appellent les épaulements. Cette étape consiste à détecter les épaulements au niveau des contreforts.

La détection des épaulements se fait à partir de la détermination de la localisation des ruptures de pente au niveau des contreforts. Une fois détecté, chaque point du talweg va être relié à un épaulement gauche et un autre droit. En suivant l'indice spatial des points du talweg, deux lignes gauche et droite sont tracées pour indiquer la limite de vallée glaciaire (Figure 32). Enfin, chaque point du talweg sera relié avec une ligne gauche et une autre droite avec les 2 côtés de la vallée pour donner au géomorphologue la possibilité d'analyser les profils topographiques tout le long de la vallée glaciaire.

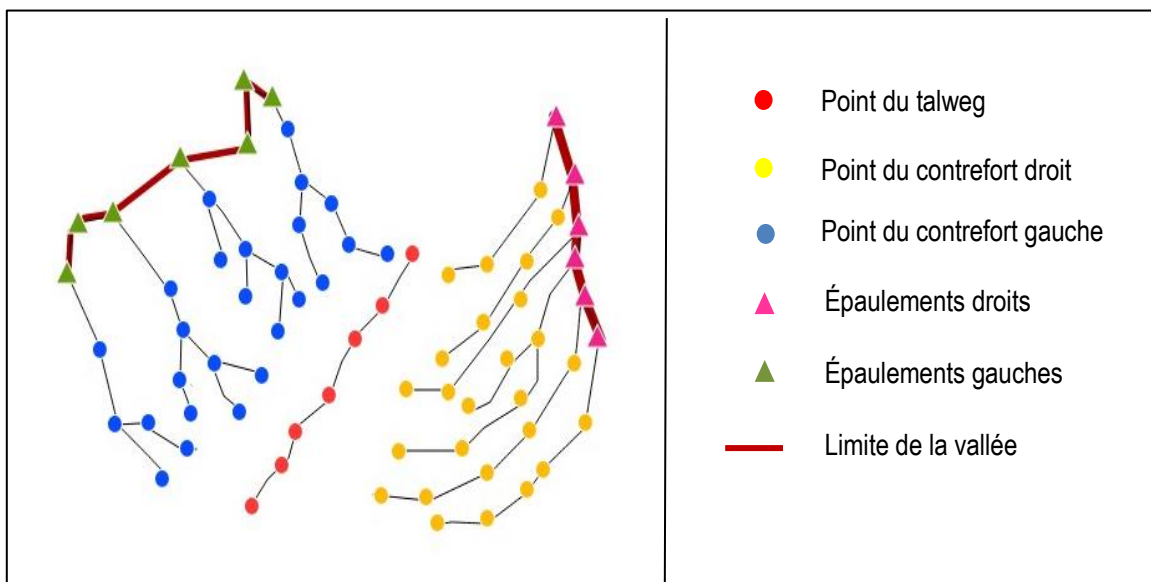


Figure 32 Délimitation de la vallée glaciaire

IV. Conclusion

a. Synthèse :

La méthode que nous avons adoptée pour notre projet présente une démarche de traitement des données basée sur la perception humaine et qui vise l'identification de la forme de vallée glaciaire. Cette démarche commence par l'analyse et la compréhension de la forme de relief dans le but de déterminer les éléments saillants qui l'ont définie. La vallée glaciaire qui nous intéresse est définie par l'assemblage de ses composants autour de saillances présentées par le réseau de drainage et le réseau de crêtes. De leur côté, les composants comme le fond et les versants sont définis par des éléments saillants qui les différencient de leur entourage.

Cette compréhension est modélisée sous la forme d'un modèle conceptuel qui présente un pont entre la cognition humaine et l'implantation informatique. Le choix de la structure de données est basé sur ce modèle. Dans notre cas, nous avons choisi les réseaux linéaires, car ils présentent mieux le terrain que des données raster. Enfin, un modèle opérationnel est développé et qui comporte toutes les étapes de traitement du MNT qui aboutissent à l'identification d'une vallée glaciaire. Ces étapes se résument dans l'identification des composants avec les éléments saillants, l'analyse de ces composants et leur assemblage et l'interprétation de la nature de la vallée. Une fois identifiée, la vallée glaciaire est délimitée à partir des épaulements.

b. Les apports de la méthode proposée et son originalité :

Nous avons présenté notre méthode d'identification automatique des vallées glaciaires à partir d'un modèle numérique de terrain. Au contraire d'autres méthodes basées sur le pixel (analyse géomorphométrique) ou sur les objets (OBIA), notre méthode se base sur les éléments saillants (talweg, contreforts et épaulements) déterminés automatiquement à partir de réseau de drainage et à partir de réseau de crêtes. De plus, l'analyse automatique de l'allure des contreforts associés au talweg et l'identification automatique des épaulements permettent l'identification et la délimitation automatiques de la vallée glaciaire. Aucune intervention d'utilisateur n'est demandée pour réaliser ces tâches au contraire des méthodes habituelles qui exigent l'intervention de l'utilisateur pour rassembler des classes et des objets autour d'un contexte afin d'identifier une forme de relief.

Aussi, la méthode proposée peut s'adapter au changement du contexte géomorphologique ou au changement de la résolution du modèle numérique de terrain. Il n'y a aucun paramètre à régler en

changeant la zone d'étude ou la résolution du modèle. Ceci est un point de différence majeure entre ce que nous proposons et les méthodes habituelles qui exigent un changement des seuils et des paramètres afin de s'adapter aux changements des résolutions ou du contexte géomorphologique.

Au niveau de l'analyse géomorphologique du terrain, la méthode proposée utilise des éléments naturels (les contreforts) pour analyser l'allure des versants d'une vallée. Ceci nous aide à éviter les transects tracés arbitrairement le long de la vallée qui exigent une intervention de l'utilisateur pour les adapter à chaque zone d'étude. De plus, les contreforts sont des éléments naturels qui préservent l'allure d'une vallée mieux que les autres parties du versant. Leur analyse exclusive parmi le reste du versant renforce la précision de l'interprétation de la forme d'une vallée.

Enfin, notre méthode permet une délimitation de la vallée glaciaire à partir de l'identification des épaulements, une délimitation finale qui se base sur des éléments naturels identifiables dans un modèle numérique de terrain. Ceci est différent d'une méthode comme l'indice valléen qui donne un indice d'appartenance aux vallées sans aucune délimitation exacte de sa forme. De plus, l'indice valléen ne permet pas la différenciation entre les vallées glaciaires et les autres vallées au contraire de notre méthode.

Chapitre 3 : Résultats

I. Introduction :

Dans cette section, nous présentons tout d'abord l'implantation informatique de notre modèle opérationnel exhibé dans la méthodologie. Cette étape du travail exige avant tout le choix des outils de traitement de données spatiales convenables à notre objectif d'automatisation du modèle. Ensuite, nous expliquons la chaîne de traitement du modèle automatique en présentant la méthode de réalisation de chaque étape.

Deuxièmement, nous présentons les résultats de l'application de notre méthode sur des modèles numériques de terrain dans trois différentes zones avec différentes résolutions. Les résultats seront présentés sous forme de cartes et de tableaux de mesures pour chaque zone d'étude. Nous validons nos résultats d'identification de vallées glaciaires avec des études effectuées par des géomorphologues qui ont étudié les mêmes zones et par les retours d'un expert-géomorphologue qui va évaluer la performance de notre méthode dans l'identification et la délimitation de la vallée.

Enfin, nous allons discuter la robustesse de notre méthode en évaluant les résultats et la démarche suivie. Cette discussion sera enrichie par les commentaires de l'expert-géomorphologue qui a évalué les résultats et le processus de notre méthode.

II. Implantation :

L'implantation informatique d'un modèle opérationnel sert à transformer les étapes du modèle en une chaîne de traitement capable à intégrer les données et à réaliser l'objectif du modèle. Dans notre cas, les données sont des modèles numériques de terrain à de différentes résolutions et notre objectif est l'identification et la délimitation des vallées glaciaires dans ces modèles. Dans les parties suivantes, nous présenterons les outils utilisés pour cette transformation ainsi que les étapes de la chaîne de traitement réalisée.

1. Les outils :

Dans le cadre de notre projet, nous voulons développer un outil automatique qui peut être directement utilisable par les utilisateurs. En étudiant ce dont nous avons besoin comme outils, nous avons choisi l'utilisation de la suite de logiciels d'information géographique ESRI (Environmental Systems Research

Institute, Inc.). Le logiciel ArcGIS de ESRI possède des outils qui nous aide à extraire les réseaux et il présente une interface qui nous aide à intégrer nos propre codes Python. En plus, ArcGIS est très utilisé par les géomorphologues en tant que logiciel principal de développement et d'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG) au monde. Dans la partie suivante, nous présentons les outils développés pour chaque type de traitement.

a. Analyse et affichage :

Nous avons utilisé ArcMap pour afficher et analyser les résultats des traitements instantanés des données qui nous ont aidés au développement du modèle. ArcMap, en plus de son affichage en deux dimensions des MNT, offre des outils de géotraitement divers en plus des tableaux attributaires qui aident à l'analyse statistique des données. ArcScene aussi a été utilisé pour afficher les résultats en trois dimensions qui nous ont aidés à mieux comprendre la nature des données et par la suite à choisir des paramètres convenables.

b. Programmation:

Nous avons utilisé deux langages de programmation que nous allons présenter dans cette section. Tout d'abord, ModelBuilder est un langage de programmation visuel intégré dans le logiciel ArcGIS. Ce langage permet l'élaboration des enchainements de géotraitements permettant un traitement automatique des données géospatiales. ModelBuilder est développé essentiellement pour organiser les outils intégrés dans ArcGIS dans des chaines de traitement, mais il permet aussi l'intégration dans la chaine des codes développés avec Python.

ModelBuilder permet aussi le traitement des données par itération, ce qui nous intéresse beaucoup puisque nous voulons obtenir un modèle automatique. Ceci est accompagné avec une interface d'exécution simple, ce qui rend facile l'utilisation du modèle par l'utilisateur, quel que soit son niveau d'expertise.

Nous utilisons aussi la programmation Python dans notre projet pour développer des outils qui ne sont pas intégrés à ArcGIS. Nous utilisons la bibliothèque Arcpy qui comporte des fonctions de géotraitement permettant la lecture et la modification des données géospatiales et la bibliothèque Numpy qui permet le traitement des tableaux attributaires des classes d'entité. En plus, cette bibliothèque nous permet l'intégration des codes à la boîte d'outils d'ArcGIS et au modèle ModelBuilder entre autres.

2. Structure du modèle :

Dans cette partie, nous présentons notre modèle développé avec les outils présentés dans la première partie et qui intègre le modèle opérationnel de la méthodologie. Comme nous avons indiqué, nous pouvons diviser notre modèle automatique en deux sous-modèles : un modèle pour extraire les éléments saillants et un autre pour analyser et délimiter les vallées.

a. Modèle d'extraction des réseaux:

Cette partie est réalisée à l'aide de ModelBuilder et composée de deux sous-modèles soit le modèle d'extraction de réseau de drainage et le modèle d'extraction des crêtes. Les deux modèles mettent en application les modèles opérationnels d'extraction des réseaux déjà expliqués dans la méthodologie (figures 24 et 26). ArcGIS contient déjà dans sa boîte d'outils destinée à l'hydrologie les fonctions présentées dans les modèles opérationnels. Le modèle d'extraction de réseau de drainage permet aussi le partitionnement de l'espace en bassins versants et en sous-bassins versants. Ce partitionnement est essentiel pour analyser les cours dans des zones plus limitées que le bassin entier. Cela permet l'identification des talwegs dans la partie suivante du modèle.

b. Identification des éléments saillants :

L'objectif de ce modèle est de traiter les deux réseaux extraits dans l'étape précédente afin d'identifier les différents éléments saillants d'une manière automatique. Tout d'abord le réseau de drainage est classifié selon l'ordre d'Horton à l'aide d'un code python qui permet le calcul de la longueur cumulée de chaque cours d'eau en allant de la partie aval du bassin vers la partie amont et il permet ensuite d'associer le plus grand ordre au cours d'eau le plus long et ainsi de suite. L'ordre et la longueur cumulée sont ajoutés sous forme de colonnes au tableau attributaire de réseau de drainage. Par la suite, nous associons à chaque cours d'eau l'identifiant du sous-bassin qui le contient à l'aide d'une jointure spatiale. Selon le niveau de traitement, seuls les cours d'eau avec un ordre qui convient avec le niveau seront traités dans le reste du modèle. Ensuite, le calcul du gradient de pente moyen se fait à chaque cours d'eau afin d'identifier les talwegs.

Après l'identification des talwegs, les contreforts sont identifiés par l'extraction des lignes de crête qui se trouvent dans les sous-bassins des talwegs et avec une différence d'élévation supérieure à 100 m (la différence d'élévation minimum d'un versant d'une vallée glaciaire). Ensuite, le talweg linéaire est transformé en un ensemble de points et chaque point sera associé avec un ensemble de contreforts

gauches et droites à l'aide d'une jointure spatiale. Les contreforts sont transformés vers des points, chaque point possède comme attribut la hauteur H (différence d'élévation avec le point du talweg le plus proche) et la distance L (distance vers le point du talweg le plus proche).

c. Analyse :

Cette partie du système est structurée aussi avec ModelBuilder avec l'intégration des codes qui permet la liaison et l'automatisation de la procédure d'analyse et de délimitation. Le calcul des valeurs du coefficient b et du rapport FR est fait pour chaque point de contreforts qui sont déjà classés gauche ou droit selon leur position envers le talweg. La distance entre un point de contrefort et un point du talweg est calculée à l'aide de l'outil de calcul de distance intégrée dans le logiciel. La valeur H est calculée à partir d'une jointure spatiale et le calcul de la différence d'élévation entre les deux points. Les valeurs des coefficients b et FR sont calculées à partir des deux champs de la distance et la différence d'élévation.

Une fois calculées, les valeurs de b et FR sont groupées par structure de contreforts tout d'abord. Les valeurs moyennes de b et FR calculées sont associées au point du talweg. Chaque point est associé à des valeurs de b et FR gauche et droite. Seuls les talwegs avec des points qui possèdent des valeurs de coefficients gauche et droite similaires à celles d'une vallée glaciaire (FR supérieure à 1,2 et b supérieur à 1,5) seront classés comme des talwegs d'une vallée glaciaire. Si deux talwegs d'une vallée glaciaire sont connectés, ils seront fusionnés en un seul talweg dans le reste du système. D'autre part, si un talweg présente les caractéristiques d'une vallée glaciaire seulement dans un groupe de points et non pas dans la totalité du talweg, seuls ces points seront pris en considération dans le reste du système de sorte que la vallée glaciaire soit définie que sur une partie de la dépression seulement.

d. Délimitation de la vallée :

L'identification du talweg se fait à partir de l'identification du point dans la structure de contreforts le plus haut avec des coefficients FR et b d'une vallée glaciaire (la limite des contreforts). Ces points sont les épaulements de la vallée glaciaire qui sert à délimiter son étendue géographique. Grâce à une jointure spatiale, chaque point du talweg de la vallée glaciaire sera associé à un épaulement. Le traçage d'une ligne qui relie les deux épaulements gauche et droit sert à délimiter la vallée glaciaire.

e. Délimitation du fond plat :

Dans les vallées glaciaires, les points de contreforts les plus proches à gauche et à droite du talweg forment la limite du fond préliminaire. Nous avons développé un code qui permet le traçage du transect entre les deux limites et les points du talweg afin d'identifier les ruptures de pente les plus proches pour tracer le fond plat. La distance entre les transects est la distance minimale qui sépare deux centres de pixels dans un raster soit la longueur de la diagonale du pixel.

III. Résultats :

Dans cette section, nous présentons les résultats de l'application de notre système sur trois différentes zones d'études situées dans différentes localisations. Le tableau suivant (tableau 1) montre la localisation et la résolution du modèle numérique de terrain de chaque zone d'étude.

Tableau 1 Caractéristiques des MNT de zones d'études

Zone d'étude	Localisation	Résolution
Parc Jacques-Cartier	Québec-Canada	9mx9m
Bassin du Rhône	Suisse	30mx30m
Tonsina	Alaska-États Unis	8mx8m

1. Parc Jacques-Cartier :

a. Présentation :

Le premier modèle numérique de terrain que nous avons utilisé couvre la zone du parc Jacques-Cartier au nord-ouest de la ville de Québec (figure 33). Le parc couvre une superficie de 670 km² localisée dans la vallée de la rivière Jacques-Cartier. La résolution du modèle numérique de terrain est 9mx9m obtenu à partir du portail de l'université Laval Géoindex dédié à la diffusion des données spatiales (<https://geoapp.bibl.ulaval.ca/>) élaborées par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec.

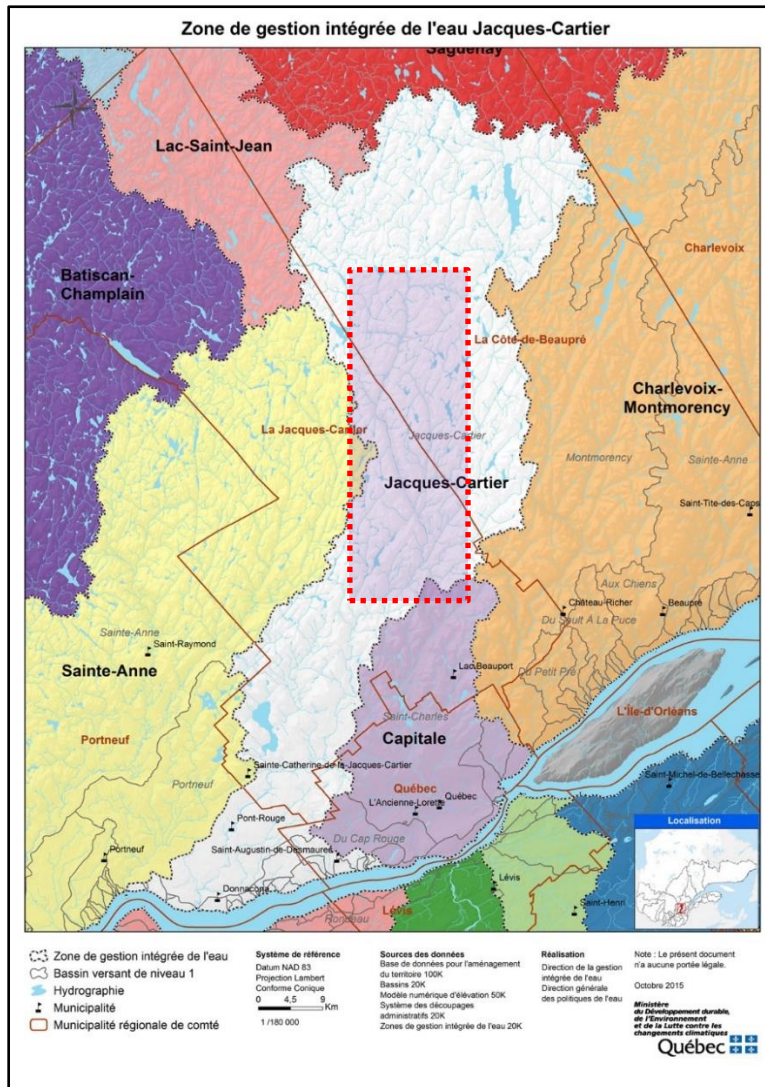


Figure 33 Localisation de la zone d'étude

(Source de la carte : <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/zones-gire/liste-carte.htm>)

b. Résultats :

❖ Identification des éléments saillants

➤ Réseau de drainage :

La carte suivante (figure 34) présente le réseau de drainage extrait dans la zone d'étude. Le réseau de drainage est classifié avec l'ordre d'Horton. La classification d'Horton montre

clairement le cours d'eau de la rivière Jacques-Cartier (en rouge) en partant de la partie aval située dans l'extrémité du bassin versant vers la partie amont située au nord-ouest de la zone d'étude.

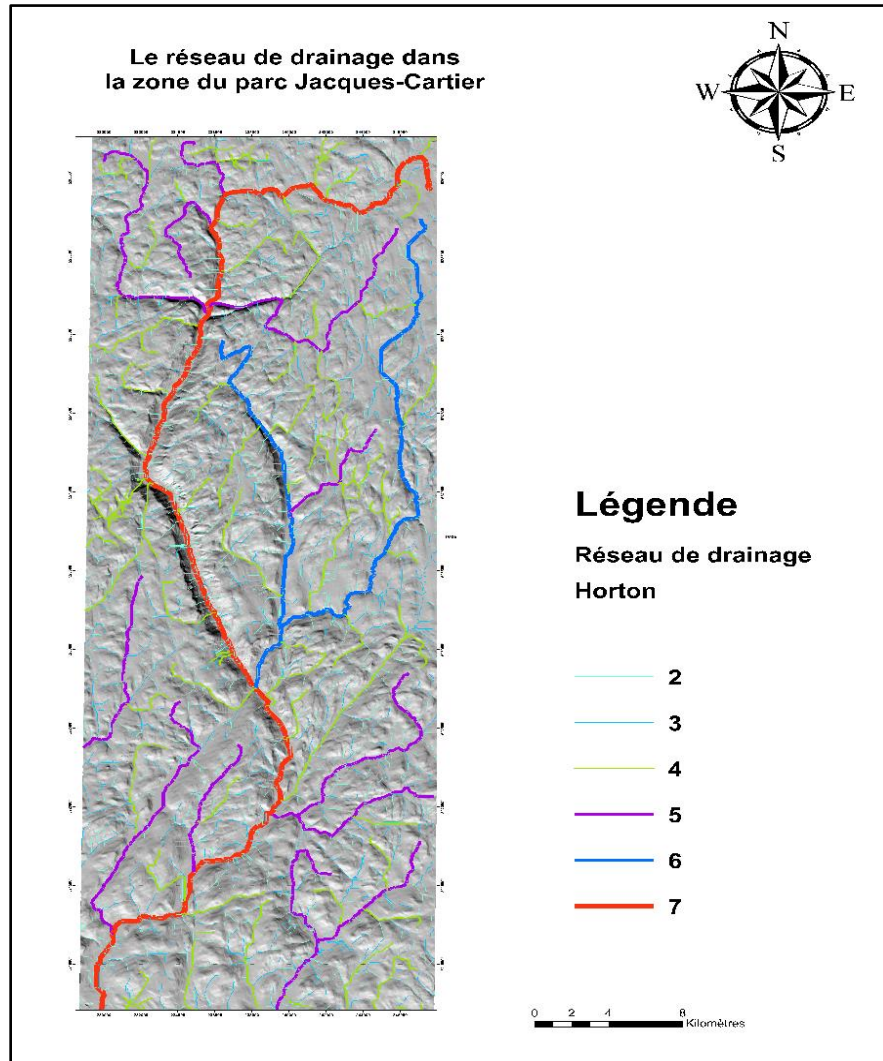


Figure 34 Le réseau de drainage de la zone classifié avec l'ordre d'Horton

➤ Les talwegs :

La carte suivante (figure 35) montre les différents talwegs identifiés dans la zone d'étude, classifiés selon le gradient de pente et associés aux sous-bassins versants. La majorité des talwegs identifiés dans la zone de la rivière Jacques-Cartier possèdent un gradient de pente faible (inférieur à 0,5 degré). Les talwegs identifiés dans les affluents de la rivière possèdent généralement un gradient de pente

supérieur à celui de la rivière. En plus, le tableau 2 nous montre les longueurs des talwegs identifiés. La longueur varie entre 16 km (talweg 0) et 33 m (talweg 14) pour l'ensemble des 27 talwegs. Seuls les talwegs avec des contreforts dans leurs bassins seront pris en compte dans le reste du modèle, peu importe la valeur de la longueur. Cela montre que notre méthode n'est pas reliée avec des seuils de longueur pour identifier les talwegs.

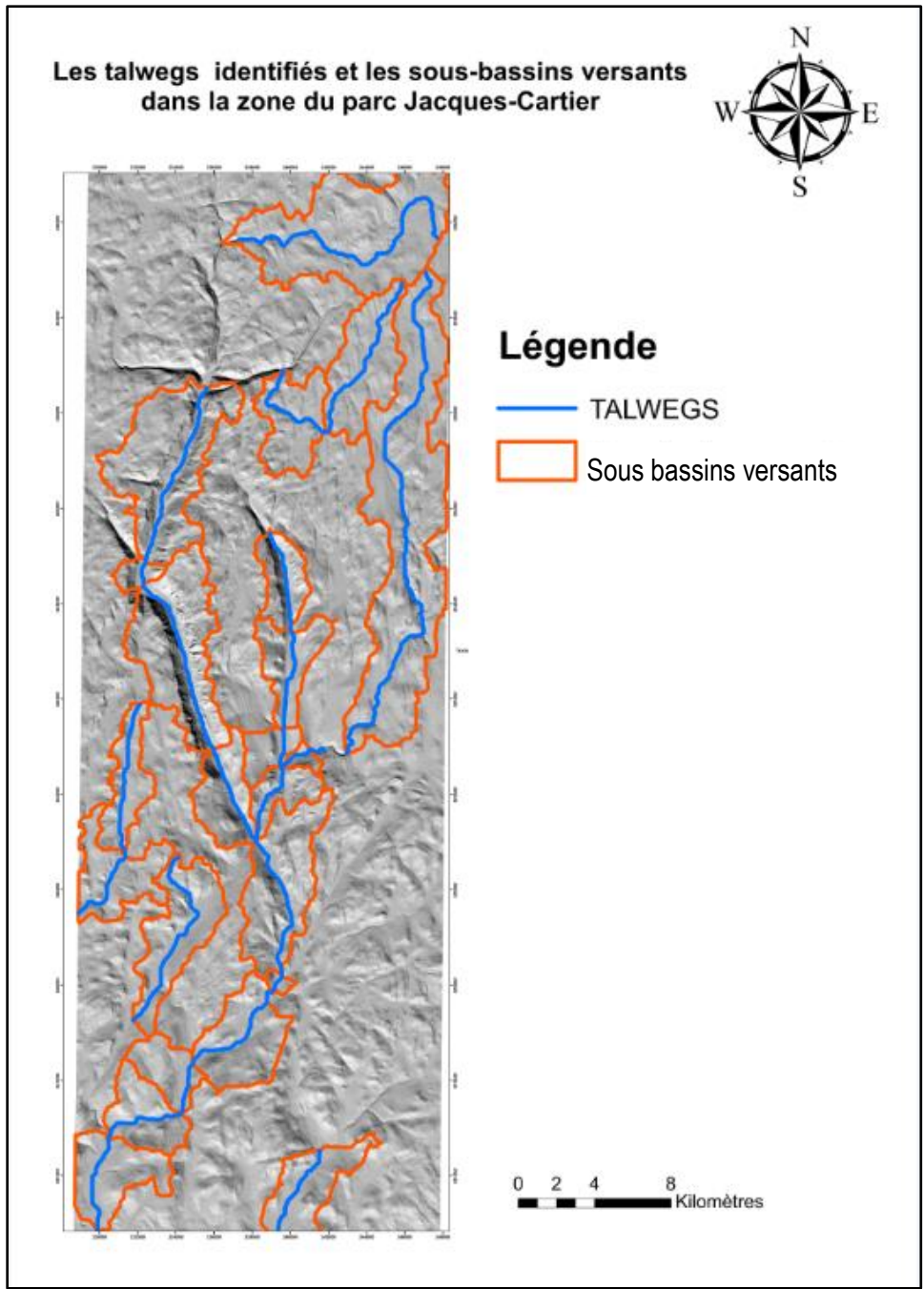


Figure 35 Les talwegs identifiés dans la zone d'étude classifié selon le gradient de pente

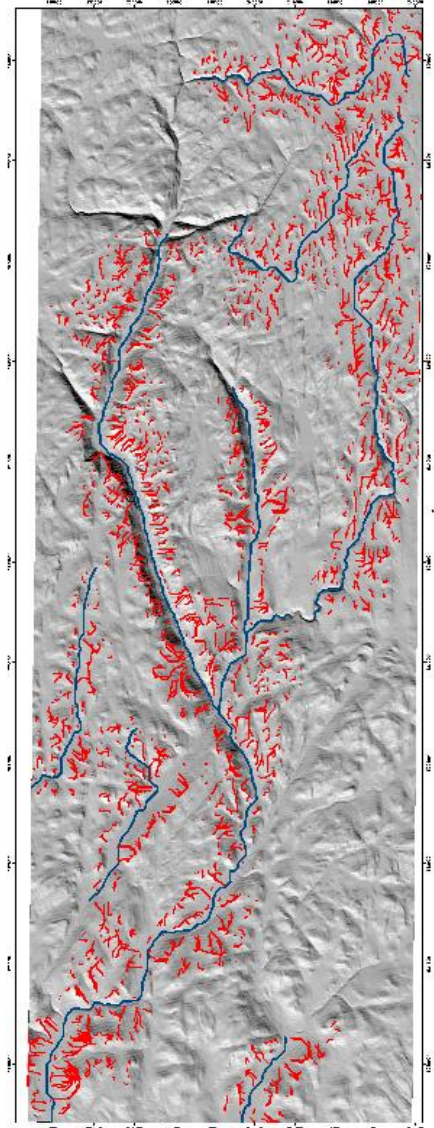
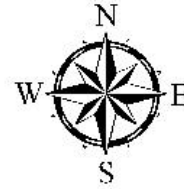
Tableau 2 Longueur des talwegs identifiés

Talweg	Longueur(m)
0	16103,752382
1	9895,688553
2	5805,998103
3	215,14975
4	10136,118855
5	11,832407
6	1382,299219
7	5769,158044
8	5378,595192
9	9981,408237
10	30714,178322
11	3168,239903
12	1973,089879
13	4420,793246
14	33,4671
15	5451,237019
16	8537,451805
17	4552,220392
18	8269,198065
19	1739,400048
20	47,329627
21	10997,720408
22	5829,740725
23	2795,195844
24	4711,765639
25	5270,522454
26	5305,296045

➤ Les contreforts :

La carte présentée dans la figure 36 montre les contreforts identifiés dans les sous-bassins associés aux talwegs. Ces contreforts sont extraits à partir du réseau de crêtes. De plus, la figure 37 nous montre l'agencement spatial de contreforts et le talweg. Nous pouvons remarquer l'allure des contreforts à gauche et à droite du talweg. Les coefficients b et FR servent à étudier cette allure pour identifier les contreforts de la vallée glaciaire.

**Les cotreforts identifiés dans
la zone du parc Jacques-Cartier**



Légende

- Contreforts
- TALWEGS

0 2 4 8
Kilomètres

Figure 36 Les cotreforts associés aux talwegs identifiés

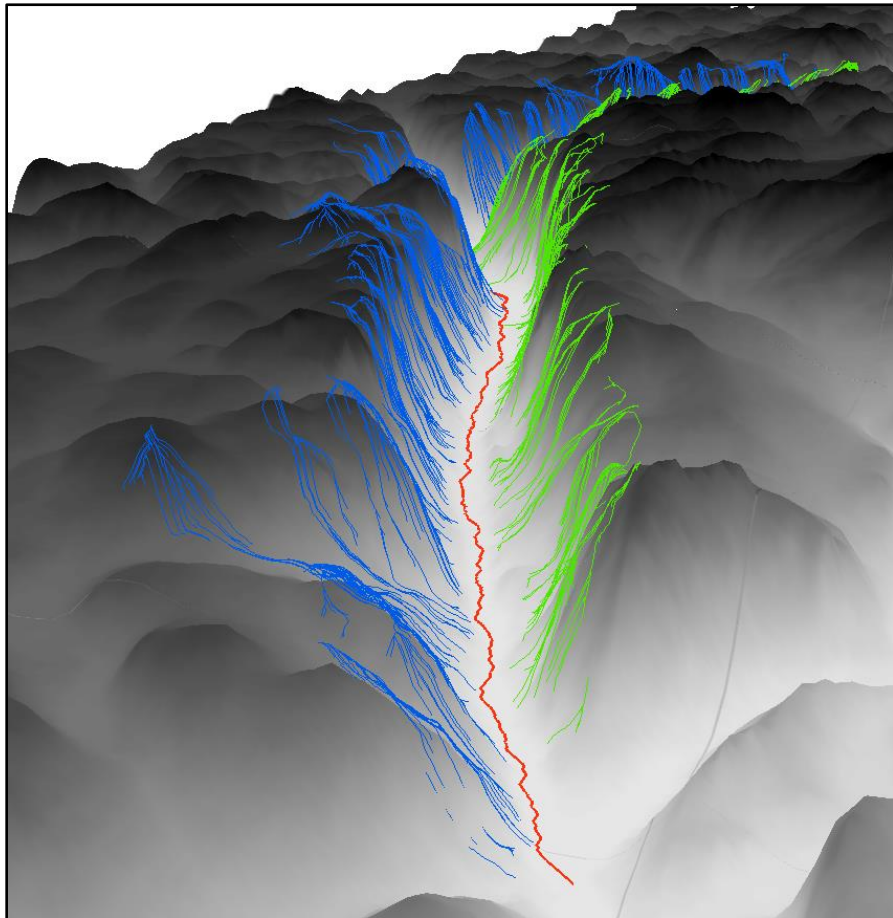


Figure 37 Contreforts gauches et droits associés au talweg

➤ Analyse :

Le tableau suivant (tableau 3) nous montre les valeurs de b et FR calculées pour chaque talweg. Seuls quatre talwegs (3,4,5 et 7) possèdent des valeurs de coefficients d'une vallée glaciaire soit une valeur de b supérieure à 1,5 combinée avec une valeur de FR supérieure à 0,2. Ces talwegs sont considérés comme des talwegs d'une vallée glaciaire. Les talwegs 3,4 et 5 sont connectés, ils sont donc considérés comme un seul talweg d'une vallée glaciaire soit la vallée glaciaire Jacques-Cartier. Le talweg 7 présente une autre vallée glaciaire localisée dans le nord de la rivière Sautariski.

Tableau 3 Moyenne de b et FR associée à chaque talweg

OID	Moyenne de b	Moyenne de FR
0	1,839853	0,064385
1	1,817209	0,04505
2	1,81984	0,056887
3	2,001421	0,219024
4	2,037871	0,214989
5	2,106351	0,260652
6	1,984195	0,149182
7	2,023766	0,231261
8	1,896357	0,085384
9	2,066994	0,163563
10	1,951462	0,135608
11	2,007412	0,1348
12	2,011492	0,163188
13	2,014647	0,182386
14	1,922679	0,070624
15	1,86191	0,064447
16	1,930209	0,122149
17	2,033375	0,158469
18	1,890619	0,088938
19	1,938886	0,10075
20	1,90243	0,101779
21	1,868235	0,098624
22	1,634473	0,030433
23	1,929214	0,108671
24	1,833724	0,075476
25	1,882308	0,091748

❖ Délimitation de la vallée

➤ Les épaulements :

La figure 38 nous montre les épaulements identifiés à gauche et à droite des talwegs dans la zone d'étude. Nous pouvons remarquer que les épaulements délimitent les versants des vallées glaciaires. La connexion automatique de ces éléments nous aide à délimiter la forme entière de la vallée glaciaire dans cette zone.

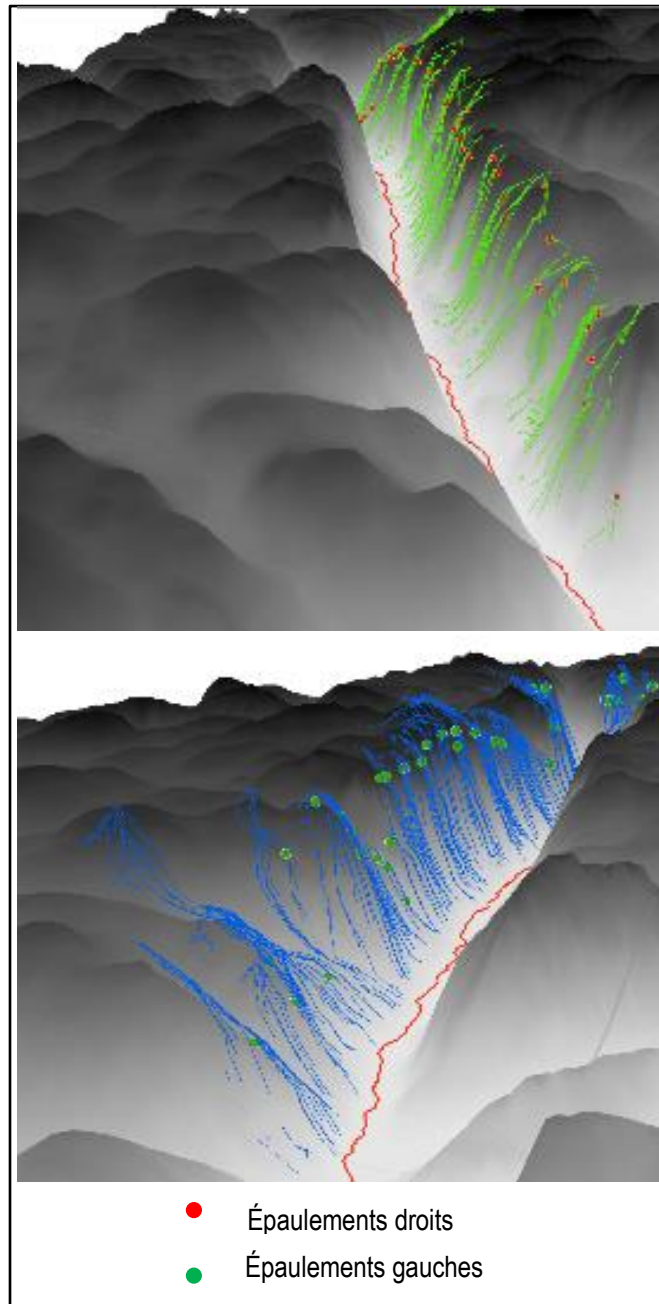


Figure 38 Épaulements gauches et droits associés au talweg

➤ Délimitation de la vallée glaciaire :

La connexion des épaulements gauches et droits de la vallée glaciaire sert à la délimiter comme nous pouvons voir dans la figure 39 et 40. Les lignes délimitent les versants de deux vallées glaciaires (la vallée glaciaire Jacques-Cartier et la vallée glaciaire de la rivière Sautariski) et définissent leur étendue géographique ce qui correspond à notre objectif de l'application de ce modèle.

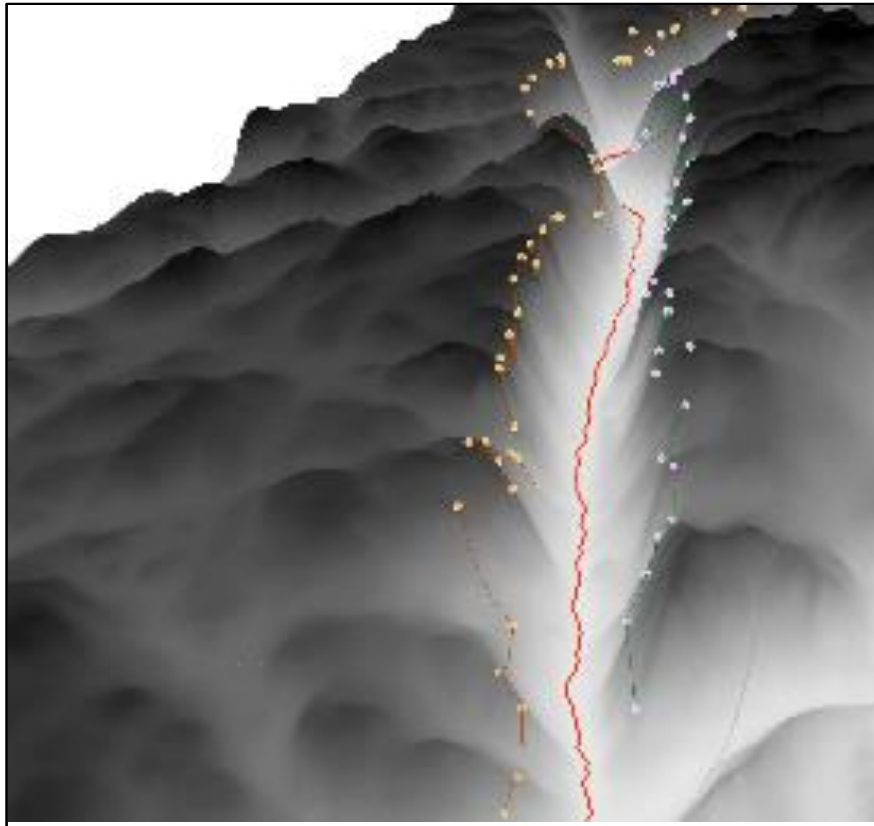


Figure 39 Limite de la vallée Jacques-Cartier en 3D

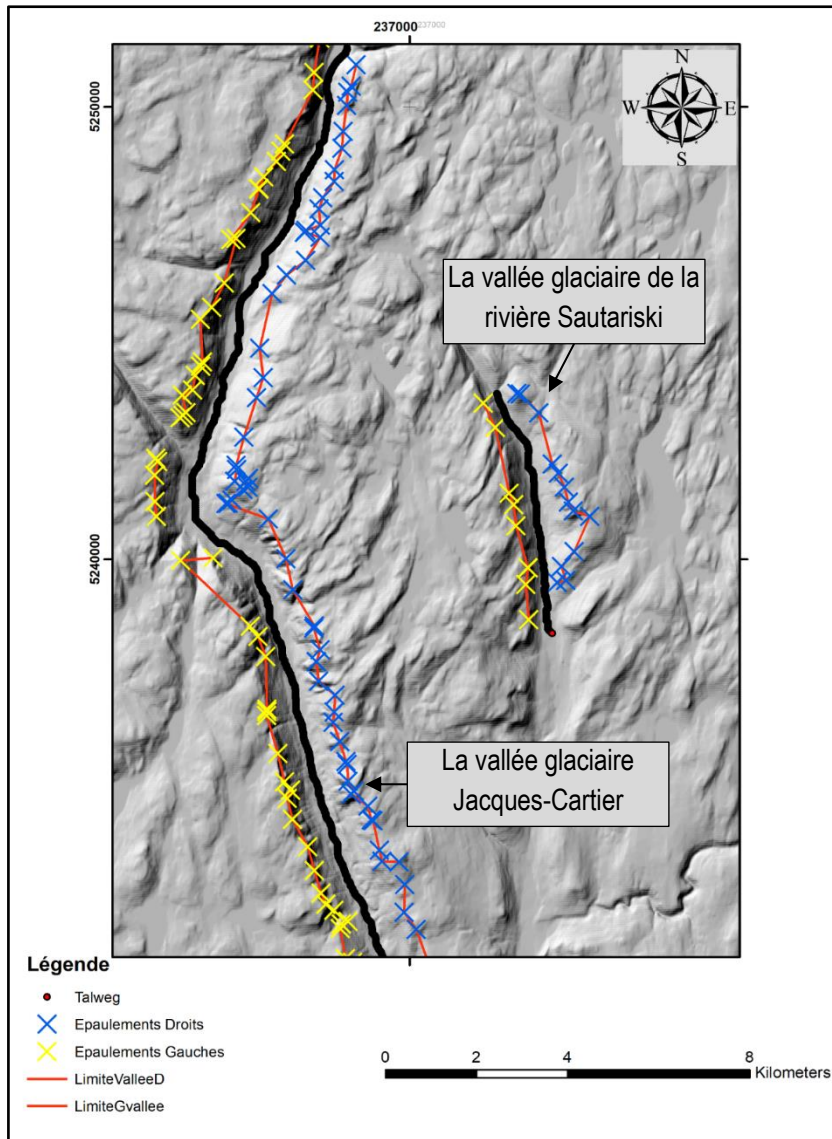


Figure 40 La limite des deux vallées identifiées dans la zone d'étude

➤ Le fond plat :

La figure suivante (figure 41) présente le fond plat identifié dans la vallée Jacques-Cartier. Le fond est délimité par deux lignes gauches et droites qui permettent la délimitation de la vallée et le calcul de sa largeur dans chaque point du talweg.

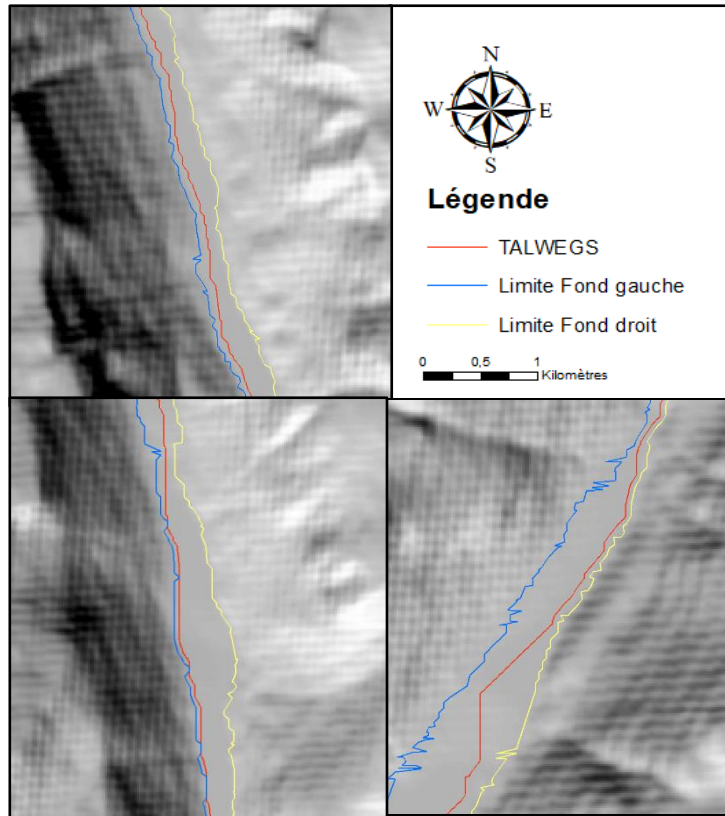


Figure 41 Fond plat délimité dans la vallée glaciaire du Jacques-Cartier

c. Validation :

D'une part, la description des paysages dans la réserve faunique de Laurentides-Québec dans (Arbour, 2008) confirme la présence de deux vallées glaciaires dans le bassin versant de la rivière Jacques-Cartier. Les deux vallées sont la vallée glaciaire Jacques-Cartier et la vallée de la rivière Sautariski. Les deux vallées sont des vallées glaciaires qui possèdent des sédiments d'origine glaciaires. La figure suivante (figure 42) montre la localisation des deux vallées d'après Arbour (Arbour, 2008). Les deux vallées décrites ont la même localisation que les deux vallées identifiées par notre système. Dans le cas de la vallée Sautariski, seule la partie nord est une vallée glaciaire ce qui valide notre identification.

D'autre part et d'après l'expert-géomorphologue, Patrick Lajeunesse, l'identification et la délimitation faites par notre système conviennent parfaitement avec la réalité du terrain. Le modèle a réussi à identifier la localisation et l'étendue exactes des deux vallées glaciaires du bassin de la rivière Jacques-Cartier. Cela confirme la précision des résultats de l'application du modèle dans la première zone d'étude.

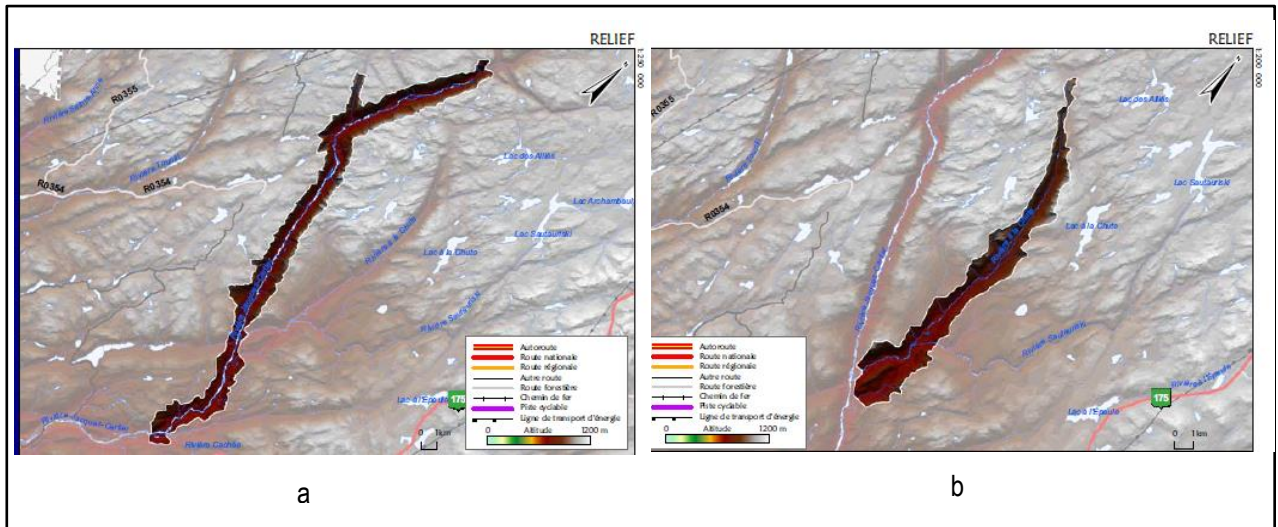


Figure 42 les deux vallées glaciaires dans le bassin versant de la rivière Jacques-Cartier : (a) La vallée Jacques-Cartier
 (b) la vallée Sautariski à la Chute (Arbour, 2008)

2. Bassin du Rhône:

a. Présentation :

Le modèle numérique de terrain de la deuxième zone d'étude couvre le bassin versant du fleuve du Rhône dans le territoire suisse. Le MNT a une résolution de 30mx30m différente de celle de la première zone d'étude (9mx9m) et il a comme source le site de l'Institut d'études géologiques des États-Unis (<https://www.usgs.gov>) qui offre des modèles numériques de terrain gratuits. La figure 43 montre la localisation de la zone d'étude dans une carte qui comporte tout le bassin de la rivière du Rhône. Cette zone appartient aux Alpes suisses occidentales qui se caractérisent par des formes de relief glaciaire.

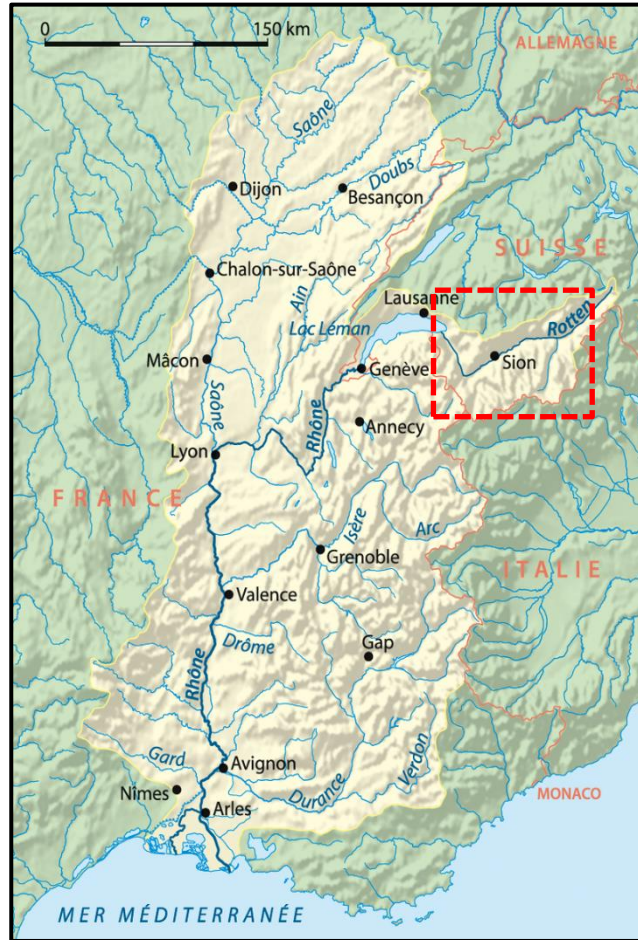


Figure 43 Localisation de la zone d'étude dans le bassin versant du fleuve du Rhône

b. Résultat :

➤ Réseaux :

La carte suivante présente le réseau de drainage (figure 44) identifié dans la zone d'étude. Nous pouvons remarquer que le fleuve du Rhône prend l'ordre d'Horton le plus élevé soit 7. Une grande partie du fleuve dans la partie orientale a une direction nord-est sud-ouest, cette direction change de 90 degrés vers le nord-ouest dans la partie occidentale.

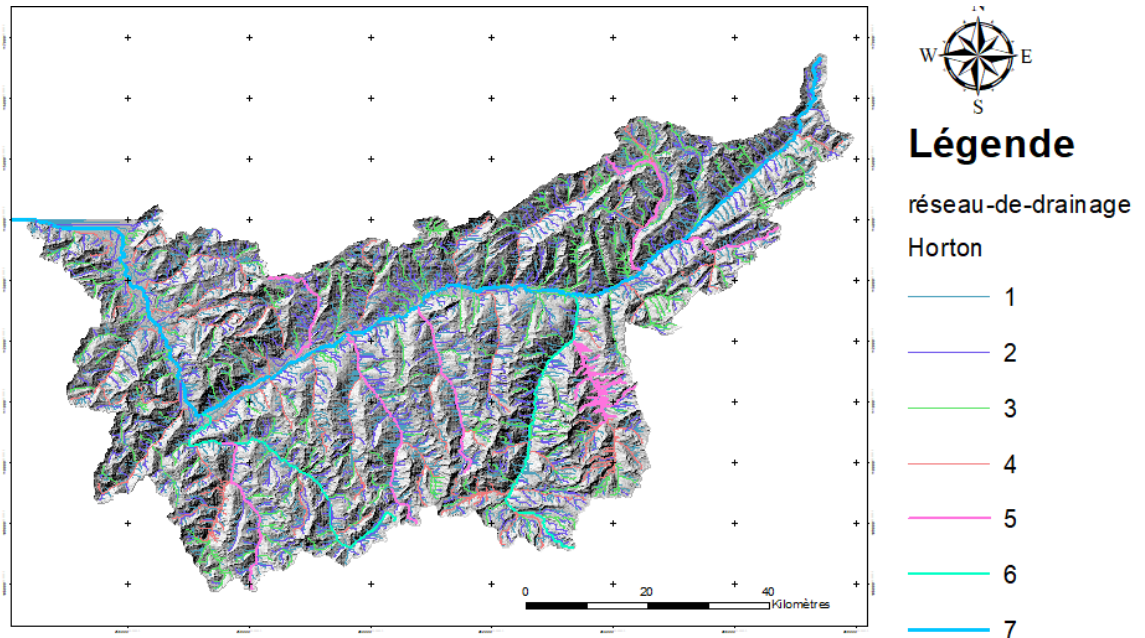


Figure 44 Réseau de drainage identifié dans la zone d'étude

➤ Talweg et contreforts :

Le tableau 4 montre la moyenne de gradient de pente des cours d'eau dans la zone. Le seul talweg identifié dans la zone qui possède un gradient de pente inférieur à 1,5 degré est présenté dans la carte dans la figure 45. Le talweg est associé à un ensemble de contreforts gauches et droits.

Tableau 4 Longueur et la moyenne de gradient de pente des talwegs identifiés

OID	Gradient	Longueur (Km)
0	1,936087	70,256439
1	1,67473	57,006382
2	1,27151	73,104039

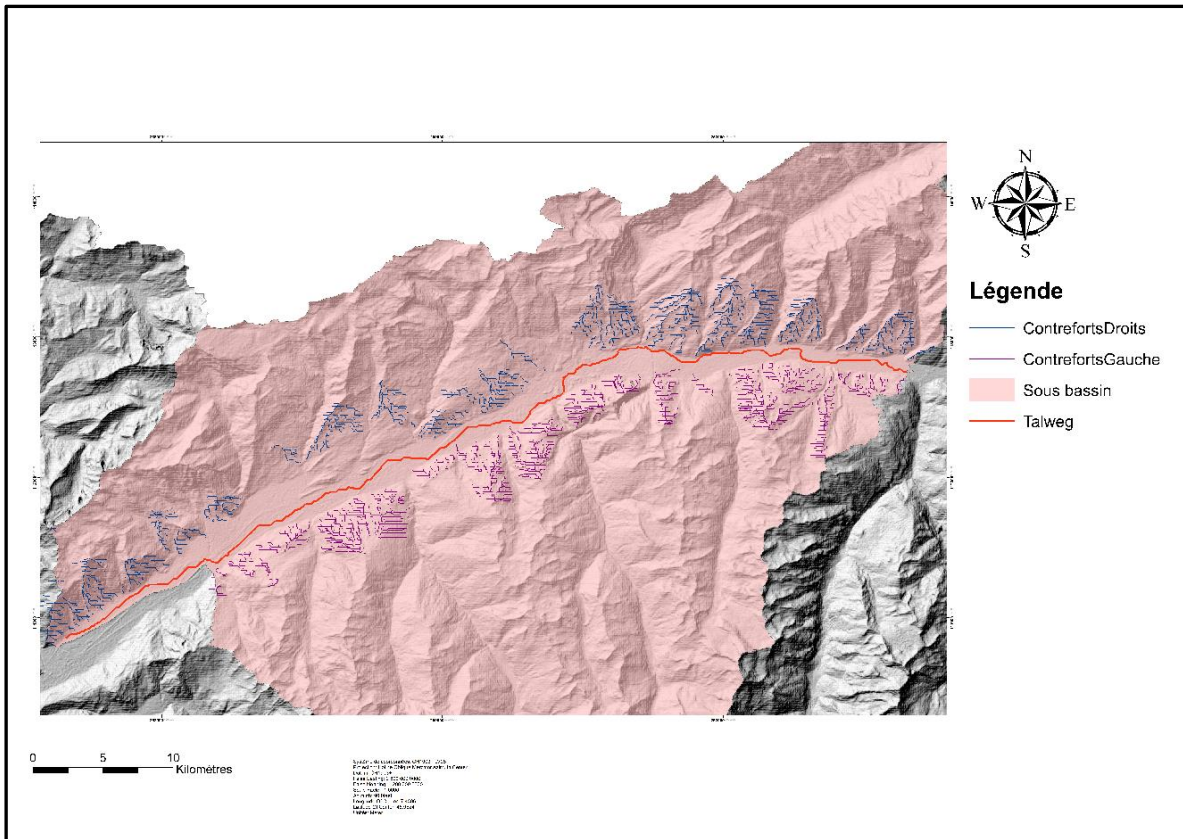


Figure 45 Les contreforts associés au talweg identifié

➤ Analyse :

Le tableau 5 présente les valeurs de coefficient b et le rapport FR des contreforts associés au talweg. Les valeurs montrent que l'allure des contreforts gauches et droits correspond à une vallée glaciaire.

Tableau 5 Coefficients de l'allure des contreforts gauches et droits

Contreforts	b	FR
Gauches	1,87	0,22
Droits	1,86	0,22

- Identification des épaulements et délimitation de la vallée glaciaire :

La carte suivante (figure 46) montre les intersections des épaulements avec les contreforts identifiés à gauche et à droite du talweg. Les deux lignes vertes et bleues présentent les limites droite et gauche de la vallée interprétée à partir des épaulements.

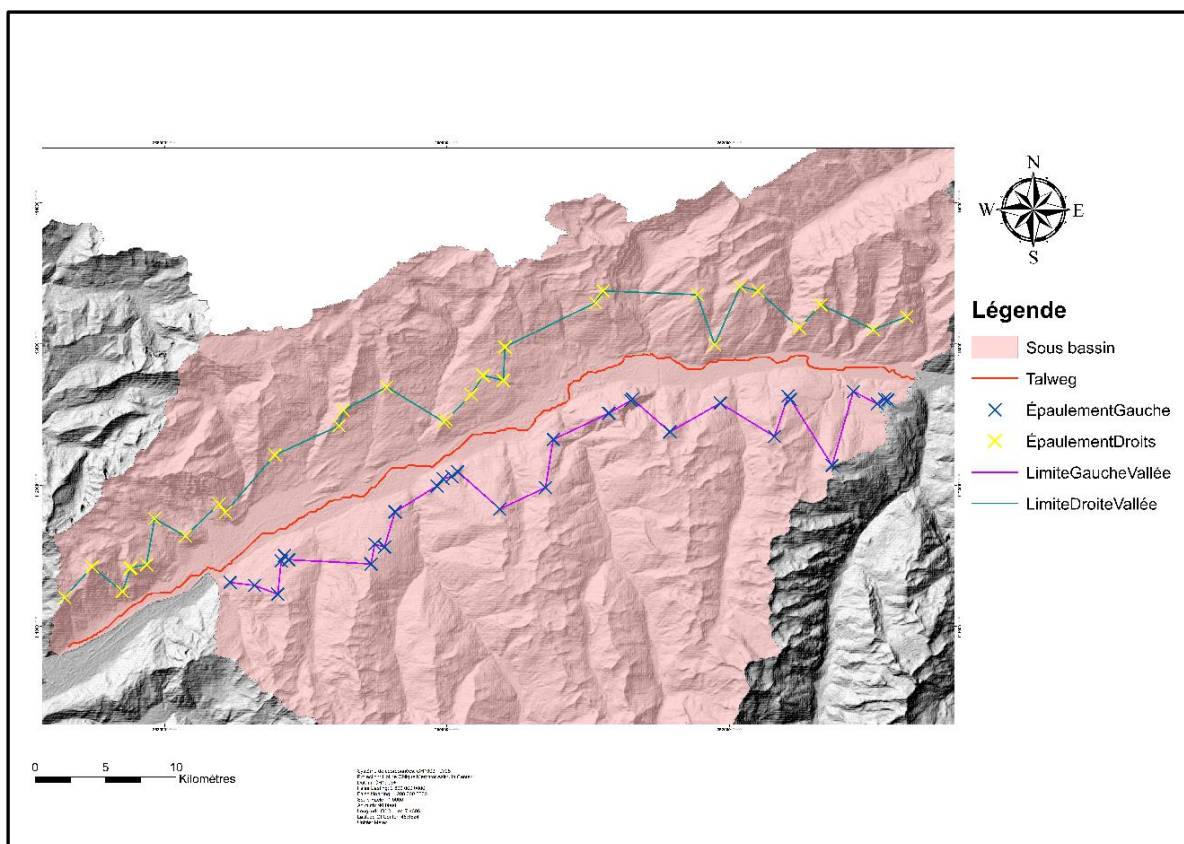


Figure 46 La délimitation de la vallée du Rhône

c. Validation :

D'après la description du bassin de la rivière du Rhône fait dans (Stutenbecker et al., 2016), le fleuve du Rhône passe à travers une vallée glaciaire entre Brique et Saint-Maurice. La longueur du talweg de la vallée est environ 80 km. La carte suivante (figure 47) montre la distribution des sédiments glaciaires dans le bassin du Rhône en suisse. La zone délimitée par notre modèle est marquée par des sédiments glaciaires dans la carte qui marquent la présence d'une vallée glaciaire. Les travaux cités

précédemment approuvent aussi les résultats de notre modèle qui a réussi à identifier la vallée glaciaire du Rhône.

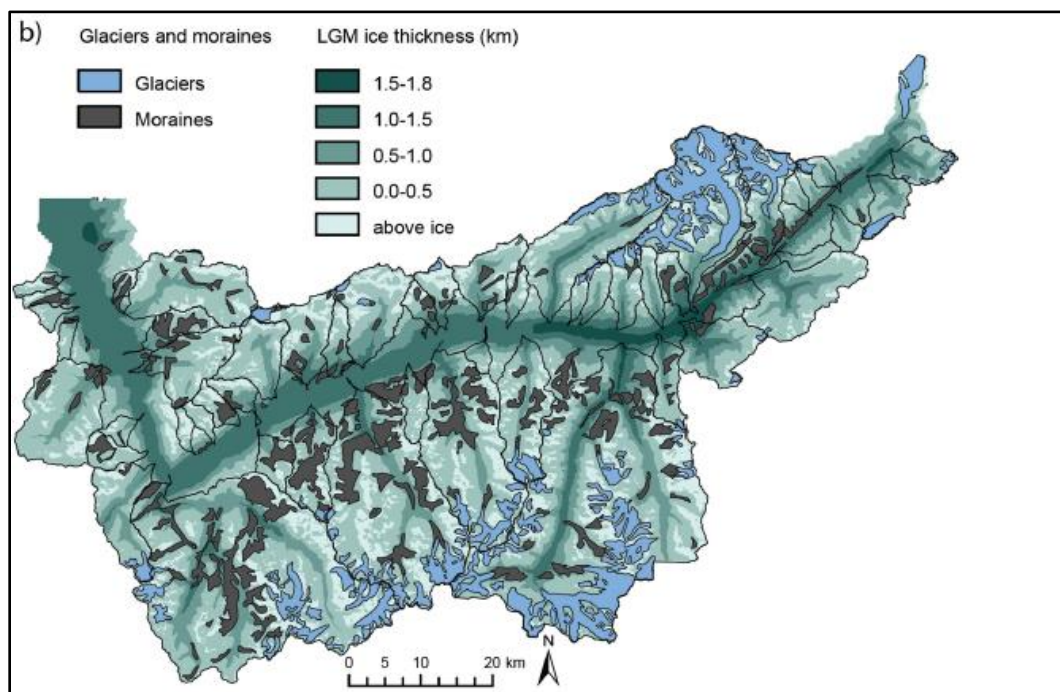


Figure 47 La distribution des sédiments glaciaires dans le bassin du Rhône (Stutenbecker et al., 2016)

D'après l'expert géomorphologue Patrick Lajeunesse, la délimitation de la vallée du Rhône faite automatiquement par notre système est une délimitation acceptable pour cette vallée. La délimitation n'est pas assez précise à cause de la distance entre les épaulements qui sont éloignés dans cette zone au contraire de la zone de la vallée du Jacques-Cartier.

Malgré le changement du contexte géomorphologique vers les Alpes suisses et le changement de la résolution du modèle numérique de terrain, notre modèle automatique a identifié et a délimité la vallée glaciaire située dans la zone d'étude. Le modèle a donné des résultats précis au niveau de l'identification de la vallée du Rhône et il a généré une délimitation acceptable selon l'expert géomorphologue.

3. Bassin de la rivière Tonsina-Alaska :

a. Présentation :

Le modèle numérique de terrain de la troisième zone d'étude couvre le bassin versant de la rivière de Tonsina au sud-ouest de l'Alaska. Le MNT a une résolution de 8mx8m différente de celle de la première zone d'étude (9mx9m) et la deuxième (30mx30m). Sa source est le site de l'Institut d'études géologiques des États-Unis (<https://www.usgs.gov>) qui offre des modèles numériques de terrain gratuits. La figure 48 montre la localisation de la zone d'étude dans une carte qui comporte tout le bassin du fleuve Copper qui a comme affluent la rivière de Tonsina.

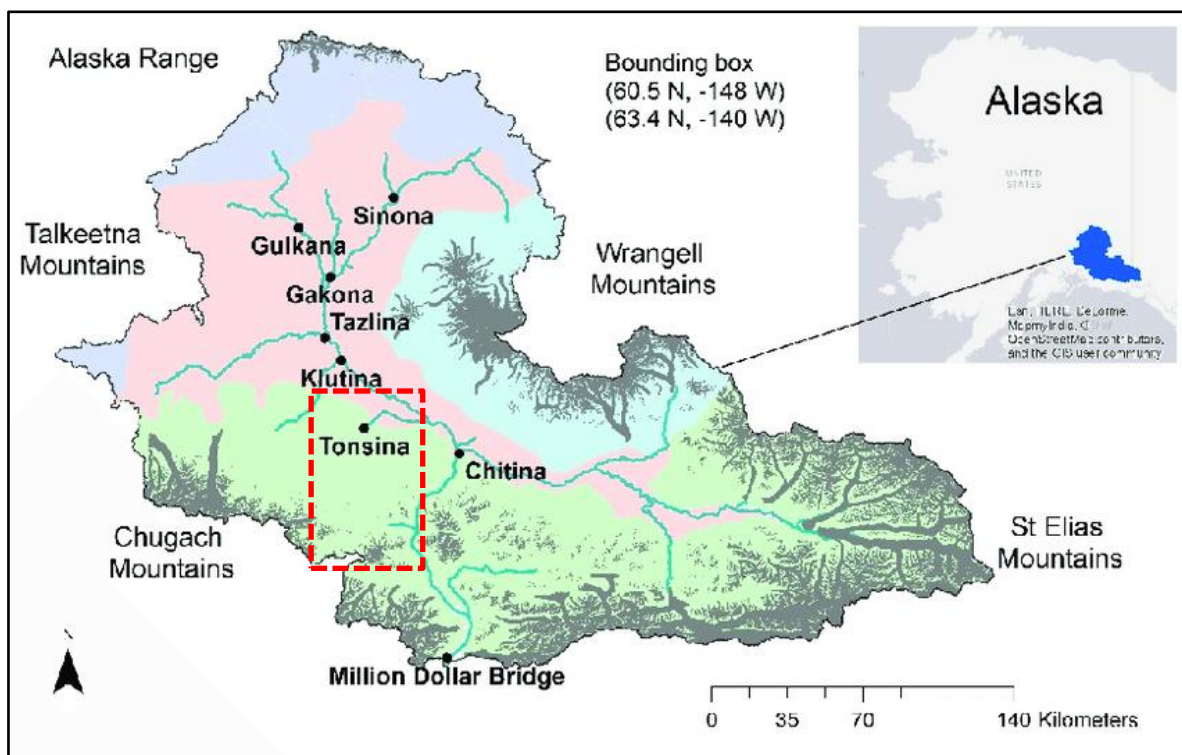


Figure 48 La localisation de la troisième zone d'étude (Stillwater Sciences, 2007)

b. Résultats :

➤ Réseaux :

La figure 49 montre le réseau de drainage identifié dans la zone d'étude. Nous pouvons remarquer que la rivière de Tonsina est présentée par l'ordre 8 d'Horton et elle passe à travers tout le bassin en suivant une direction sud-ouest nord-est. Dans la partie sud du bassin, la rivière passe à travers un lac appelé lac Tonsina.

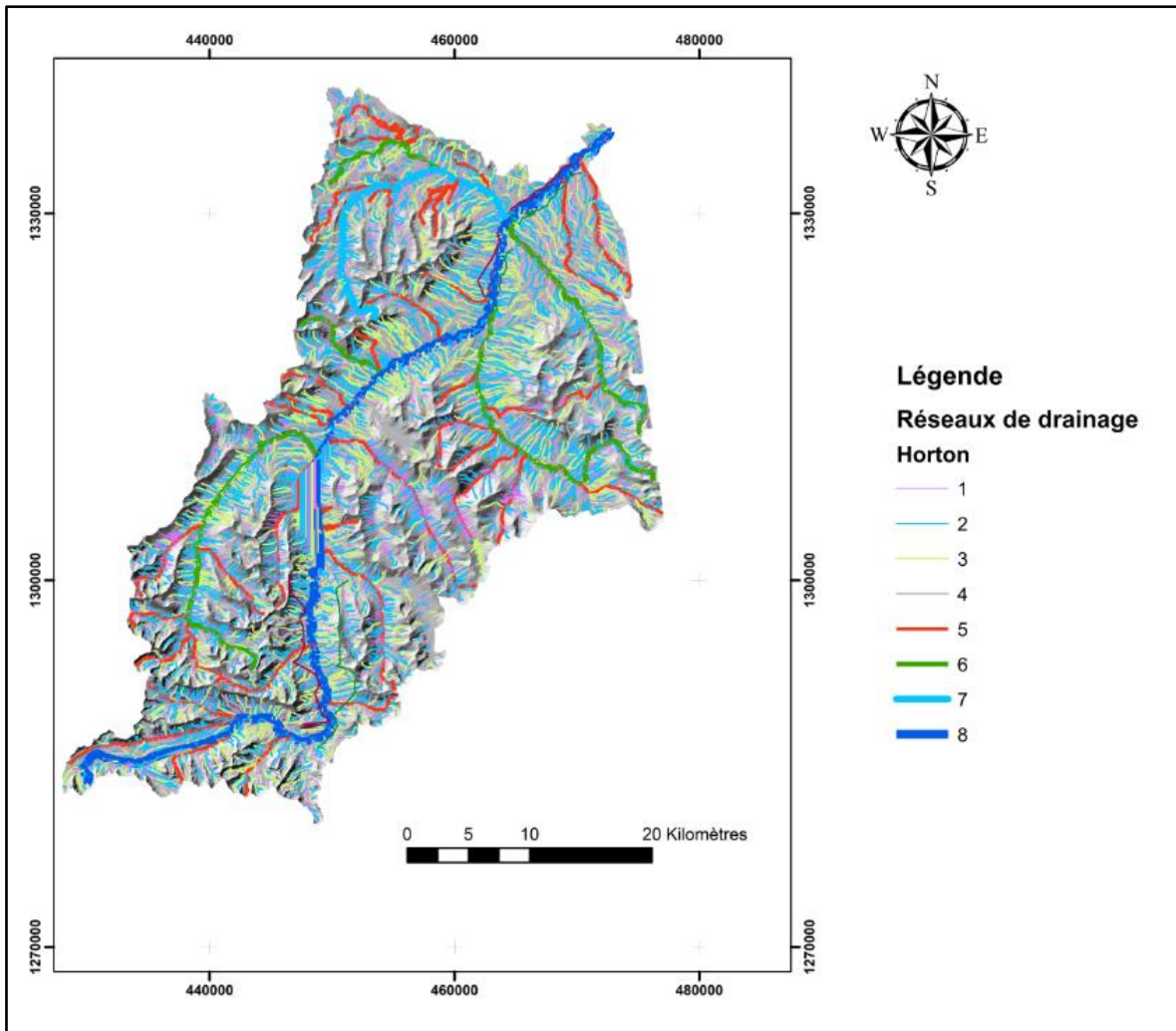


Figure 49 Réseau de drainage identifié dans la troisième zone d'étude

➤ Analyse :

La majorité des cours d'eau dans la zone ont un gradient inférieur à 1,5 degré, donc ils sont des talwegs potentiels d'une vallée glaciaire. Toutefois, le calcul des coefficients donne un seul talweg d'une vallée glaciaire. Ce talweg est localisé dans la zone sud-ouest du bassin de la rivière. Les coefficients sont présentés dans le tableau suivant (tableau 6).

Tableau 6 Les coefficients *b* et *FR* des contreforts associés au talweg

Contreforts	<i>b</i>	FR
Gauches	1,87	0,21
Droits	1,91	0,23

➤ Délimitation de la vallée :

La carte suivante (figure 50) montre la délimitation de la vallée glaciaire dans le sud-ouest du bassin de la rivière Tonsina à l'Alaska. La vallée est composée de deux parties, une partie formée dans la masse rocheuse de la montagne (partie sud) et une autre formée par le creusement du fond par le glacier (partie nord).

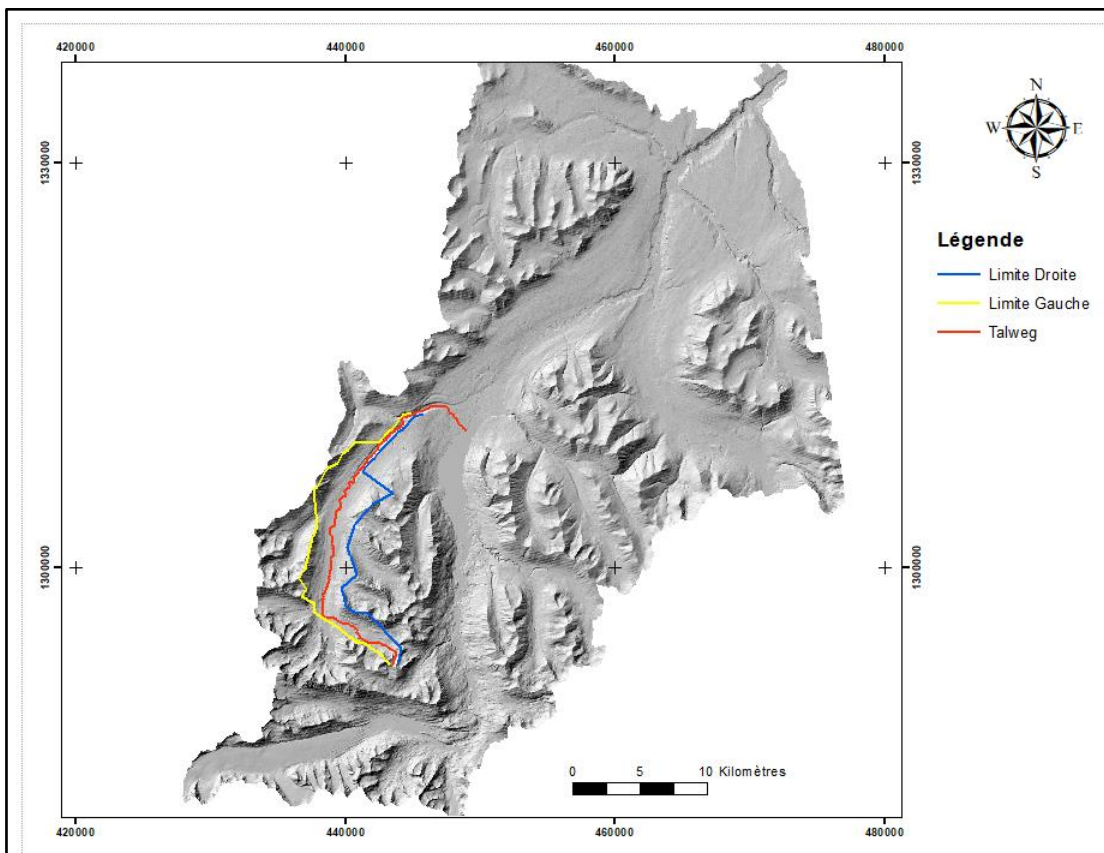


Figure 50 Délimitation de la vallée glaciaire dans la troisième zone d'étude

c. Validation :

Bien que cette zone appartienne à un système glaciaire, nous avons identifié une seule vallée glaciaire dans la partie sud-est de la zone d'étude. L'expert-géomorphologue Patrick Lajeunesse a expliqué le fait de ne pas identifier toutes les vallées glaciaires dans cette zone par deux raisons. D'une part, il n'y a pas assez de dénivelés dans le bassin de la rivière Tonsina qui permettent la manifestation géomorphologique de l'érosion glaciaire. La seule partie qui présente un dénivelé assez important est dans la zone sud-ouest où le modèle a réussi à identifier la vallée glaciaire. D'autre part, les sédiments du bassin sont des sédiments friables qui ne préservent pas l'allure de la vallée causée par l'érosion glaciaire. Les vallées dans cette zone sont des vallées glaciaires qui ne possèdent pas l'allure et la forme des vallées glaciaires à cause de la nature de sédiments du bassin.

Le modèle a réussi à identifier la seule vallée glaciaire qui possède l'allure et la forme d'une vallée glaciaire. Le reste des vallées sont comblées par des sédiments qui empêchent leur identification à partir d'un modèle numérique de terrain.

IV. Discussions :

Dans cette section, nous discutons la performance de notre méthode automatique d'identification des vallées glaciaires. Nous discutons en général la qualité des résultats obtenus selon l'évaluation d'un expert-géomorphologue. Ensuite, nous revenons sur le degré de robustesse de la méthode d'identification automatique.

a. Qualité des résultats :

D'après l'expert-géomorphologue Patrick Lajeunesse qui a évalué les résultats de trois zones d'étude, notre système a réussi à identifier et à délimiter les vallées glaciaires dans les zones étudiées. Le modèle a permis d'identifier correctement les vallées glaciaires du bassin de la rivière Jacques-Cartier et la vallée du Rhône. Aussi, il a identifié la seule vallée glaciaire qui présente l'allure et la forme des vallées glaciaires dans le bassin de la rivière Tonsina. Les résultats prouvent selon lui la performance de la méthode utilisée par notre modèle automatique.

Nous pouvons dire que le modèle automatique d'identification des vallées glaciaires a réussi à donner des résultats satisfaisants dans les trois zones d'études. Notons qu'il s'agit de trois zones qui appartiennent à des contextes géomorphologiques différents (Québec-Canada, Alpes-Suisse, Alaska-

États-Unis). De plus, les modèles numériques de terrain qui couvrent les trois zones possèdent différentes résolutions. Malgré cela, le modèle a donné des résultats satisfaisants dans les trois zones d'étude.

Rappelons que l'application du modèle automatique ne demande aucune expertise ou connaissance du terrain. La méthode automatique est destinée à tous les utilisateurs qui visent l'identification de la vallée glaciaire et elle ne demande aucun réglage pour la mettre en œuvre.

b. Robustesse de la méthode :

Notre méthode est basée sur l'identification des éléments saillants à partir du réseau de drainage et du réseau de crêtes et l'analyse de son assemblage spatial. Cette analyse a permis l'identification et la délimitation de la vallée glaciaire. D'abord, les réseaux de drainage et les réseaux de crêtes identifiés par le modèle ont couvert tout le terrain de différentes zones et ils ont permis un partitionnement de l'espace (bassin et sous-bassins versants) qui a aidé dans le processus du traitement de données. De plus, la structure des réseaux possède des relations spatiales entre ses différentes parties qui ont permis l'identification des éléments saillants et de l'assemblage spatial des composants. La structure vectorielle présentée par les réseaux a ajouté trois concepts à notre méthode qui ne sont pas présentés dans les méthodes classiques basées sur le pixel :

Premièrement, l'automatisation entière du processus de l'identification d'une forme de relief comme la vallée glaciaire. Notre méthode n'exige aucune intervention de l'utilisateur pour identifier la forme de la vallée à partir d'un MNT. En fait, l'extraction des vallées glaciaires se fait automatiquement à l'aide d'un modèle automatique intégré à l'ArcGIS. Deuxièmement, la structure de deux réseaux possède des relations topologiques entre ses différentes parties qui facilitent l'analyse de l'assemblage spatial des composants. Troisièmement, les réseaux présentent un support qui permet la présentation des éléments naturels qui définissent la saillance de la vallée glaciaire (talweg et contreforts).

D'autre part, les éléments saillants identifiés à partir des réseaux et surtout les contreforts ont permis l'analyse et l'identification des vallées glaciaires dans la zone étudiée. L'étude de l'assemblage des versants avec le fond traduit avec l'association des contreforts avec le talweg a présenté la clé majeure pour identifier les vallées glaciaires. D'après l'expérience de plusieurs méthodes pour différencier entre vallée glaciaire et fluviale, nous pouvons dire que l'étude de l'allure des contreforts à gauche et à droite du talweg utilisée dans notre méthode est la meilleure méthode pour identifier une vallée glaciaire.

Cette méthode est basée sur des études robustes avec des coefficients géométriques de différenciation entre les différents types de vallées. De plus, les contreforts sont des éléments qui se trouvent dans la nature et qui préservent l'allure de la vallée mieux que les autres parties du versant. Les contreforts aident aussi à l'identification des épaulements qui permettent la délimitation de la vallée glaciaire. Cette délimitation est basée sur la nature des épaulements qui présentent la limite de l'auge glaciaire et la limite de l'étendue géographique de la vallée glaciaire entre autres.

Enfin, les résultats d'application et les retours de l'expert-géomorphologue approuvent la robustesse de notre méthode d'identification automatique des vallées glaciaires. L'utilisation des éléments qui définissent la forme de la vallée dans la réalité (talweg et contrefort) et l'étude de leur assemblage a renforcé notre méthode automatique. Cet assemblage qui n'a été étudié dans aucune autre méthode d'identification automatique des formes de relief a été approuvé par notre méthode. En définitive, nous pouvons dire que la méthode a confirmé l'hypothèse de la recherche développée au début de ce travail et qui se base sur la saillance des composants de la vallée glaciaire et leur assemblage spatial.

V. Conclusion :

La méthodologie a été implantée avec des outils informatiques destinés au traitement des données spatiales. L'implantation nous a donné un modèle automatique capable d'identifier des vallées glaciaires à partir d'un MNT. L'application du modèle a donné des résultats satisfaisants validés selon des travaux effectués dans les mêmes zones d'études et selon l'évaluation d'un expert-géomorphologue. Malgré le changement du contexte géomorphologique et le changement de la résolution entre les deux zones, le modèle a été capable d'identifier les vallées glaciaires dans les trois zones. Cela confirme sa robustesse et sa fiabilité en termes d'identification des vallées glaciaires à partir d'un MNT. Enfin, nous pouvons dire que le modèle automatique atteint les objectifs tracés dans l'introduction. Cela confirme la robustesse de l'hypothèse de recherche basée sur l'idée de saillance.

Conclusion

Notre projet a pris cinq sessions pour achever cette étape et il est passé par des périodes de recherches, d'expériences, de conception et d'application. Dans cette section du mémoire, nous tirons des conclusions inspirées du déroulement du projet, de l'exécution et des résultats. De plus, nous présentons des retours sur notre méthode qui pourraient inspirer d'autres chercheurs dans le domaine de l'étude des formes de relief.

❖ Synthèse :

Dans le début du projet, nous avons constaté à partir de l'état de l'art que nous ne sommes pas capables d'identifier automatiquement la forme d'une vallée glaciaire à partir d'un MNT. Les méthodes existantes étaient incapables de réaliser cette tâche à cause de l'exigence d'une intervention de l'utilisateur ou elles n'étaient pas capables de différencier entre les différents types de vallées. Face à cette problématique, nous avons développé une hypothèse basée sur l'idée de la saillance des composants et de l'assemblage spatiale de la vallée glaciaire. Nous avons visé l'obtention d'une méthode d'identification automatique des vallées glaciaires à partir de ses éléments saillants. Pour réaliser cet objectif, nous avons développé la méthode présentée dans le deuxième chapitre en modélisant les composants de la vallée glaciaire et l'assemblage de ses éléments saillants. Un modèle opérationnel a été développé pour identifier automatiquement les éléments présentés dans le modèle conceptuel et pour la délimitation de la vallée entre autres.

Notre modèle automatique d'identification des vallées glaciaires se résume en trois étapes : premièrement, l'extraction du réseau de drainage et du réseau de crêtes à partir d'un MNT. Deuxièmement, l'identification des talwegs potentiels de vallées glaciaires à partir de réseau de drainage et l'étude de l'allure des contreforts associés aux talwegs afin d'identifier ceux d'une vallée glaciaire. Troisièmement, l'identification des épaulements et la délimitation de la vallée glaciaire et son fond plat. L'application de la méthode sur différentes zones a donné des résultats d'identification et de délimitation satisfaisants malgré le changement de la résolution des modèles numériques de terrain et le changement du contexte entre les différentes zones. Les résultats sont approuvés par un expert-geomorphologue et avec des études réalisées dans les mêmes zones. À cet égard, nous pouvons dire que notre méthode basée sur l'idée des éléments saillants a donné des résultats d'une manière

totalemment automatique au contraire de la méthode de l'analyse géomorphométrique ou l'OBIA qui exige l'intervention de l'utilisateur.

❖ Contributions :

Après son application dans de différentes zones d'étude, nous pouvons dire que notre méthode a été capable d'identifier automatiquement et sans l'intervention de l'utilisateur les vallées glaciaires à partir d'un modèle numérique de terrain. Cette tâche était irréalisable avec les méthodes existantes comme l'analyse géomorphométrique ou l'OBIA qui exigent l'intervention de l'utilisateur pour rassembler des éléments homogènes autour d'un contexte pour identifier la forme entière d'une forme de relief comme la vallée glaciaire. L'originalité de notre méthode et qui a permis la réalisation de cette tâche se résume dans le fait d'utiliser les éléments saillants des composants de la vallée glaciaire pour identifier sa forme et la délimiter. Les contreforts et le talweg qui sont les éléments saillants de la vallée glaciaire présentent la clé majeure pour comprendre la nature de la vallée en étudiant leur allure et leur assemblage spatial. Cette idée était utilisée partiellement dans le calcul de l'indice valléen de Straumann et Purves (2011) (utilisation des talwegs) mais sans la délimitation définitive de la vallée et sans la différenciation entre les différents types de vallées. Le talweg et les contreforts présentent le squelette de la vallée glaciaire. Ce squelette est identifiable à partir des réseaux de drainage et de réseau de crêtes indépendamment de la résolution du MNT. L'analyse de l'assemblage talwegs-contreforts par le biais des coefficients dédiés pour l'identification de la vallée glaciaire a permis une identification automatique de sa forme sans aucune intervention de l'utilisateur. De plus, la limite de la forme de la vallée qui a été un problème pour une méthode comme l'indice valléen a été résolue par notre méthode par l'identification des épaulements qui sont des éléments naturels identifiables à partir des contreforts.

D'autre part et d'après notre expérience cumulée dans ce projet, nous pouvons affirmer que l'utilisation des données vectorielles pour étudier des formes de relief complexes comme la vallée glaciaire aide énormément dans son identification. Les réseaux ajoutent les relations spatiales aux différentes parties de terrain et permettent l'identification des éléments saillants qui présentent des squelettes pour les composants de la vallée glaciaire. L'analyse de l'allure des contreforts qui a permis l'interprétation de la nature de la vallée est non réalisable dans le cas des données raster. Les réseaux donnent la capacité d'extraire des relations géométriques et topologiques qui permet une analyse de la forme de

relief au contraire des données raster qui sont le seul type de données utilisé dans les méthodes d'analyse géomorphométriques.

❖ Les perspectives :

Ce projet n'est qu'un début de l'application de l'idée de la saillance inspirée de la cognition humaine dans les méthodes d'identification des formes de relief. Plusieurs thèmes peuvent être des sujets de recherche intéressants. Nous citons les perspectives suivantes à l'égard de ceux qui veulent continuer la recherche dans ce domaine : premièrement, l'application du modèle automatique d'identification des vallées glaciaires sur des données massives. Cela permet l'analyse des zones vastes qui présente une région ou toute une chaîne de montagnes sans l'intervention de l'utilisateur. Secondement, l'identification et la délimitation des composants secondaires de la vallée glaciaire comme les moraines et la pente douce à partir des résultats du modèle. La délimitation devient plus facile avec la délimitation de la vallée, du fond et du versant. La zone de recherche devient limitée avec la possibilité d'intégrer les relations topologiques avec les autres composants de la vallée pour comprendre la nature des autres composants secondaires. Troisièmement, l'application de l'idée de saillance sur d'autres formes de relief complexes. Nous pouvons modéliser les éléments saillants des autres formes de relief complexes afin de les identifier. Cela peut être appliqué sur des formes de relief glaciaires comme les cirques et les vallées suspendues. De plus, l'identification et la délimitation de la vallée glaciaire aident beaucoup dans le processus de l'identification de ces formes puisqu'elle présente le composant principal du système.

Enfin, ce projet a présenté une étape dans le domaine de l'identification automatique des formes de relief qui nous a beaucoup intéressé. Aujourd'hui, nous ajoutons à ce domaine cet ouvrage modeste qui pourra aider les prochains chercheurs à tirer des idées et à réaliser leurs recherches. Que ce soit en géomatique ou géomorphologie, ce travail présente des contributions qui pourraient nous inspirer à avancer dans la recherche scientifique.

Bibliographies

- Al-Saady, Y. I., Al-Suhail, Q. A., Al-Tawash, B. S., & Othman, A. A. (2016). Drainage network extraction and morphometric analysis using remote sensing and GIS mapping techniques (Lesser Zab River Basin, Iraq and Iran). *Environmental Earth Sciences*, 75(18), 1-23.
<https://doi.org/10.1007/s12665-016-6038-y>
- Alain Dupéret, Benoît Deffontaines, O. P. (2014). *Criteres geomorphometriques issus des modeles numeriques de terrain au service des applications hydrologiques*. (December).
- Anders, N. S., Seijmonsbergen, A. C., & Bouten, W. (2011a). Segmentation optimization and stratified object-based analysis for semi-automated geomorphological mapping. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 2976-2985. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.007>
- Anders, N. S., Seijmonsbergen, A. C., & Bouten, W. (2011b). Segmentation optimization and stratified object-based analysis for semi-automated geomorphological mapping. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 2976-2985. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.007>
- Anderson, R. S., Molnar, P., & Kessler, M. A. (2006). Features of glacial valley profiles simply explained. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 111(1).
<https://doi.org/10.1029/2005JF000344>
- Arbour, D. (2008). *Paysages du plateau et des vallées de la réserve faunique des laurentides*.
- Band, L. E. (1999). Spatial Hydrography and Landforms. *Geographical Information Systems*, 1, 527-542. Consulté à l'adresse Band1999GIS.pdf
- Benz, U. C., Hofmann, P., Willhauck, G., Lingenfelder, I., & Heynen, M. (2004). Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58(3-4), 239-258.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2003.10.002>
- Chorowicz, J., Ichoku, C., Riazanoff, S., Kim, Y. -J., & Cervelle, B. (1992). A combined algorithm for automated drainage network extraction. *Water Resources Research*, 28(5), 1293-1302.
<https://doi.org/10.1029/91WR03098>

- Coles, R. J. (2014). *The cross-sectional characteristics of glacial valleys and their spatial variability*. 305. Consulté à l'adresse <http://theses.whiterose.ac.uk/5452/>
- D'Oleire-Oltmanns, S., Eisank, C., Drăguț, L., & Blaschke, T. (2013a). An object-based workflow to extract landforms at multiple scales from two distinct data types. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(4), 947-951. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2254465>
- D'Oleire-Oltmanns, S., Eisank, C., Drăguț, L., & Blaschke, T. (2013b). An object-based workflow to extract landforms at multiple scales from two distinct data types. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(4), 947-951. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2254465>
- De Reu, J., Bourgeois, J., Bats, M., Zwertvaegher, A., Gelorini, V., De Smedt, P., ... Crombé, P. (2013). Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. *Geomorphology*, 186, 39-49. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.015>
- Dekavalla, M., & Argialas, D. (2017). Evaluation of a spatially adaptive approach for land surface classification from digital elevation models. *International Journal of Geographical Information Science*, 31(10), 1978-2000. <https://doi.org/10.1080/13658816.2017.1344984>
- Drăguț, L., & Eisank, C. (2011). Object representations at multiple scales from digital elevation models. *Geomorphology*, 129(3-4), 183-189. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.003>
- Evans, I. S. (2012). Geomorphometry and landform mapping: What is a landform? *Geomorphology*, 137(1), 94-106. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.029>
- Florinsky, I. V. (2017). An illustrated introduction to general geomorphometry. *Progress in Physical Geography*, 41(6), 723-752. <https://doi.org/10.1177/0309133317733667>
- García Ruiz, J. M. (2016). Landforms of the earth: An illustrated guide. Dans *Cuatremario y Geomorfologia* (Vol. 30).
- Gerçek, D., Toprak, V., & Strobl, J. (2011). Object-based classification of landforms based on their local geometry and geomorphometric context. *International Journal of Geographical Information Science*, 25(6), 1011-1023. <https://doi.org/10.1080/13658816.2011.558845>

- Gilbert, J. T., Macfarlane, W. W., & Wheaton, J. M. (2016). The Valley Bottom Extraction Tool (V-BET): A GIS tool for delineating valley bottoms across entire drainage networks. *Computers and Geosciences*, 97, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.07.014>
- Guilbert, E., Moulin, B., & Murcia, A. C. (2016). A CONCEPTUAL MODEL for the REPRESENTATION of LANDFORMS USING ONTOLOGY DESIGN PATTERNS. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3(July), 15-22. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-2-15-2016>
- Han, H., Chung, W., Song, J., Seol, A., & Chung, J. (2016). A terrain-based method for selecting potential mountain ridge protection areas in South Korea. *Landscape Research*, 41(8), 906-921. <https://doi.org/10.1080/01426397.2016.1173657>
- Harbor, J. M. (1992). Numerical modeling of the development of U-shaped valleys by glacial erosion. *Geological Society of America Bulletin*, 104(10), 1364-1375. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1992\)104<1364:NMOTDO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1992)104<1364:NMOTDO>2.3.CO;2)
- Hengl, T., & MacMillan, R. A. (2009). Geomorphometry-a key to landscape mapping and modelling. *Developments in Soil Science*, 33(C), 433-460. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00019-6](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00019-6)
- Li, Z. (2006). *Algorithmic Foundation of Multi-Scale Spatial Representation* (1st Editio).
- Livers, B., & Wohl, E. (2015). An evaluation of stream characteristics in glacial versus fluvial process domains in the Colorado Front Range. *Geomorphology*, 231, 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.12.003>
- MacMillan, R. A., Jones, R. K., & McNabb, D. H. (2004). Defining a hierarchy of spatial entities for environmental analysis and modeling using digital elevation models (DEMs). *Computers, Environment and Urban Systems*, 28(3), 175-200. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(03\)00019-X](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(03)00019-X)
- MacMillan, R. A., & Shary, P. A. (2009). Landforms and landform elements in geomorphometry. *Developments in Soil Science*, 33(C), 227-254. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00009-3](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00009-3)
- Maier, K. L., Johnson, S. Y., & Hart, P. (2018). Controls on submarine canyon head evolution:

- Monterey Canyon, offshore central California. *Marine Geology*, 404(January), 24-40.
<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.06.014>
- Normandeau, A., Lajeunesse, P., & St-Onge, G. (2015). Submarine canyons and channels in the Lower St. Lawrence Estuary (Eastern Canada): Morphology, classification and recent sediment dynamics. *Geomorphology*, 241, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.023>
- Paul, V. (1976). Les glaciers des Alpes occidentales. *Revue de géographie alpine*, 64(1), 121-123.
- Pedersen, G. B. M. (2016a). Semi-automatic classification of glaciovolcanic landforms: An object-based mapping approach based on geomorphometry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 311, 29-40. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.12.015>
- Pedersen, G. B. M. (2016b). Semi-automatic classification of glaciovolcanic landforms: An object-based mapping approach based on geomorphometry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 311, 29-40. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.12.015>
- Pike, R. J., Evans, I. S., & Hengl, T. (2009). Chapter 1 Geomorphometry: A Brief Guide. *Geomorphometry: concepts, software, applications*, 33(1944), 3-30.
[https://doi.org/10.1016/s0166-2481\(08\)00001-9](https://doi.org/10.1016/s0166-2481(08)00001-9)
- Reuter, H. I., & Nelson, A. (2009). Geomorphometry in ESRI packages. *Developments in Soil Science*, 33(C), 269-291. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00011-1](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00011-1)
- Robb, C., Willis, I., Arnold, N., & Gudmundsson, S. (2015). A semi-automated method for mapping glacial geomorphology tested at Breidamerkurjökull, Iceland. *Remote Sensing of Environment*, 163, 80-90. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.03.007>
- Rosgen, D. (1996). Stream Classification & Valley Types. *Trail Creek Watershed Assessment & Conceptual Restoration Plan*, 4, 1-22.
- Schillaci, C., Braun, A., & Kropacek, J. (2015). Terrain analysis and landform recognition. *British Society for Geomorphology*, 2(August), 1-18. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3895.2802>
- Seddik, H., Greve, R., Sugiyama, S., & Naruse, R. (2009). *Numerical simulation of the evolution of*

glacial valley cross sections. 1-14. Consulté à l'adresse <http://arxiv.org/abs/0901.1177>

- Sinha, G., & Mark, D. M. (2010). Cognition-Based Extraction and Modelling of Topographic Eminences. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 45(2), 105-112. <https://doi.org/10.3138/carto.45.2.105>
- Stahr, A., & Langenscheidt, E. (2015). Landforms of high mountains. Dans *Landforms of High Mountains*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-53715-8>
- Stillwater Sciences. (2007). *Copper River Watershed Salmon Habitat Monitoring Plan Development: Results from Tonsina River Basin Field Reconnaissance*.
- Straumann, R. K., & Purves, R. S. (2011). Computation and elicitation of valleyiness. *Spatial Cognition and Computation*, 11(2), 178-204. <https://doi.org/10.1080/13875868.2010.537797>
- Stutenbecker, L., Costa, A., & Schlunegger, F. (2016). Lithological control on the landscape form of the upper Rhône Basin, Central Swiss Alps. *Earth Surface Dynamics*, 4(1), 253-272. <https://doi.org/10.5194/esurf-4-253-2016>
- Wang, D., Laffan, S. W., Liu, Y., & Wu, L. (2010). Morphometric characterisation of landform from DEMs. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(2), 305-326. <https://doi.org/10.1080/13658810802467969>
- Weiss, A. D., & Conservancy, T. N. (2000). *TNC_tpi-poster-tnc_18x22*. 200. https://doi.org/http://www.jennessent.com/downloads/TPI-poster-TNC_18x22.pdf
- Zhao, Y., Wu, P., Li, J., Lin, Q., & Lu, Y. (2019). A new algorithm for the automatic extraction of valley floor width. *Geomorphology*, 335, 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.03.015>