

**Direction des bibliothèques**

**AVIS**

Ce document a été numérisé par la Division de la gestion des documents et des archives de l'Université de Montréal.

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

**NOTICE**

This document was digitized by the Records Management & Archives Division of Université de Montréal.

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal

# Identification des éléments morphologiques du lit dans les cours d'eau de montagne

par  
Julie Thérien

Département de Géographie  
Arts et Sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures  
en vue de l'obtention du grade de M.Sc.  
en Géographie  
option Géomorphologie fluviale

Avril, 2008

© Julie Thérien, 2008



Université de Montréal  
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulée :

**Identification des éléments morphologiques du lit dans  
les cours d'eau de montagne**

Présenté par :  
Julie Thérien

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Paul Comtois, président-rapporteur  
André Roy, directeur de recherche  
François Courschene, membre du jury

## Résumé

Bien que les cours d'eau de montagne aient fait l'objet de plusieurs études depuis les dix dernières années, de nombreuses lacunes se rapportant à la morphologie des systèmes *step-pool* et cascade découlent du fait que les techniques, méthodes et stratégies d'échantillonnage ne sont pas uniformisées rendant les comparaisons entre les différentes études difficiles. Cette recherche vise à développer et tester un protocole de levé topographique, utilisant un échantillonnage systématique par coupes transversales, sur cinq sections de cours d'eau comportant des gradients de pente variant entre 8 et 43% et un état de stabilité variable. Ce protocole permet d'uniformiser les données et de comparer les résultats entre les études. Les objectifs spécifiques de l'étude sont : 1) de tester l'applicabilité de quatre techniques d'identification des éléments morphologiques du lit soit l'identification visuelle, le *zero crossing*, la différence des formes du lit et la pente critique, sur différents systèmes fluviaux et de développer une cinquième technique permettant une classification des formes du lit; 2) d'examiner la morphologie, les relations géométriques et l'applicabilité des différentes théories sur la périodicité des *step-pools* et 3) de développer des outils d'analyse intégrant l'ensemble des informations topométriques recueillies sur le terrain. L'application des différentes techniques d'identification des formes du lit a montré que seulement la technique de la pente critique est adaptée aux milieux ayant une morphologie mixte de *step-pool* et de *step-cascade* avec une pente élevée. Toutefois, cette technique ne classe pas le *step* selon sa morphologie. L'élaboration d'une nouvelle technique dite de classification a permis de résoudre cette lacune et ainsi d'établir les différences majeures entre les deux types de morphologie. La morphologie *step-pool* semble s'ajuster selon la hauteur des *steps* et la largeur du cours d'eau tandis que la morphologie mixte *step-cascade* s'ajuste selon la hauteur et la longueur d'onde des *steps*. De plus, l'espacement entre les *steps* des cinq rivières n'est pas

périodique mais aléatoire ce qui signifie que la formation des *steps* n'est pas bien prédite par la théorie de la formation de la résistance maximale ou la théorie de l'antidune. La présence de roche d'ancrage dans les *steps* laisse supposer qu'un mécanisme de congestion des blocs ou obstacles a favorisé l'emplacement et la formation des *steps* pour les cinq cours d'eau. La méthode proposée ici et les informations qu'elle permet de générer pourront être appliquées à l'aménagement des cours d'eau de montagne et à l'élaboration de stratégies d'échantillonnage des cours d'eau ayant une pente élevée.

**Mots-clés :** *Step-pool*, cascade, morphologie, géométrie, pente

## Abstract

Although, mountain channels have been the object of a number of studies for the past ten years, many properties and concepts concerning the morphology of step-pool and cascade systems remain poorly understood. This situation is partly the result of non-uniform techniques, methods and sampling strategies, making difficult comparison among different studies. This research attempts to develop and test a research protocol of topographic survey using a systematic sampling on five reaches of streams having slope varying between 8 and 43% and a different stable state. This protocol standardizes the data collection and allows for the comparison of results among studies. More specifically, the objectives are: 1) to test the applicability of four techniques to identify bed morphological elements such as the visual identification, the zero crossing, the difference of bed forms and the critical slope, on different systems, and to develop a fifth technique which allows for the classification of bed forms; 2) to describe the morphology, the geometric relations and explore the applicability of the different theories concerning the periodicity of step-pool systems and 3) to develop a more complete analysis that integrates all the topometric informations gathered in the field. The application of different identification techniques shows that only the critical slope technique is adapted to the description of stream systems with mixed morphology including step-pool and step-cascade unites on steep slope. However, this technique does not classify the step according to its morphology. The elaboration of classification technique has allowed to resolve this problem and to clearly differentiate between the two types of morphology. The step-pool morphology seems to adjust according to the step height and channel width while the step-cascade morphology adjusts to height and wavelength of the bedforms. Furthermore, the spacing between steps is not predicted by the theories of maximum resistance or antidune on the formation of step-pool systems. The presence of keystone in the step suggests that a

mechanism of pebble congestion controls the position and formation of steps in the five systems. The protocol and information generated with the proposed protocol can be applied for the management of mountainous streams.

**Keywords:** Step-pool, cascade, morphology, geometry

## Table des matières

Résumé.....	iii
Abstract .....	v
Table des matières.....	vii
Liste des tableaux.....	ix
Remerciements.....	xvii
Introduction.....	1
1. Contexte de la recherche.....	3
1.1 Définition.....	3
1.2. Morphologie.....	4
1.3. Géométrie.....	8
1.3.1. <i>Step- pool</i> .....	15
1.3.2. Cascade.....	18
1.4. Identification des éléments morphologiques du lit.....	19
1.4.1. À partir du profil longitudinal.....	20
1.4.2. À partir du terrain.....	24
1.4.3. À partir d'un DEM.....	25
1.5. Complexité.....	31
1.5.1. Formation et stabilité des <i>steps</i> .....	31
1.5.3. Destruction des <i>steps</i> .....	37
1.6. Sommaire.....	38
2. Problématique et méthodologie.....	39
2.1. Problématique et objectifs.....	39
2.2 Méthodologie.....	41
2.2.2. Acquisition des données.....	50
2.2.3. Analyse des données.....	54
3. Résultats.....	64

3.1. Identification des formes du lit .....	68
3.1.1. Identification visuelle.....	68
3.1.2. Comparaison des techniques du <i>zero crossing</i> , de la différence des formes du lit, de la pente critique et de la classification.....	69
3.2. Géométrie.....	81
3.2.1. Relations géométriques .....	81
3.2.2. Périodicité des <i>steps</i> .....	85
3.3. Hydraulique et formes du lit .....	89
3.3.1. Coupes transversales .....	89
4. Discussion .....	97
4.1. Protocole et identification des formes du lit .....	97
4.2. Morphologie mixte <i>step-cascade</i> .....	100
4.3. Contrôle et ajustement .....	104
4.4. Formation et stabilité.....	106
Conclusion .....	109
Bibliographie.....	112

## Liste des tableaux

Tableau 1.1 Avantages et inconvénients des méthodes d'identification des formes du lit classées selon le type de données de départ.....	28
Tableau 1.2 Principales études concernant la morphologie des cours d'eau d'unité <i>step-pool</i> et cascade et les paramètres importants à tenir compte dans un protocole de recherche (W : largeur du cours d'eau).....	29-30
Tableau 2.1 Principales caractéristiques de chaque site à l'étude.....	44
Tableau 2.2 Centile de la taille des particules mesurée à partir de l'axe B (intermédiaire) des particules à la surface du lit.....	53
Tableau 3.1 Nombre de <i>steps</i> (S) et de mouilles (P) identifiés selon la méthode utilisée soit la visualisation, le <i>zero crossing</i> , la différence des formes du lit, la pente critique (Milzow, 2004) et la classification pour les cinq tronçons de rivière. Les résultats entre parenthèses sont le nombre de <i>steps</i> ou de mouilles qui ont été identifiés à la même localisation que les <i>steps</i> de la technique de classification et sur le terrain.....	80
Tableau 3.2 Moyenne des pourcentages de performance pour quatre techniques soit l'identification visuelle, le <i>zero crossing</i> , la différence des formes du lit et la pente critique. Deux pourcentages ont été calculés pour chaque technique. Le premier pourcentage (P1) est la moyenne du nombre de <i>steps</i> identifiés et bien localisés /le nombre total de <i>steps</i> identifiés. Le deuxième pourcentage (P2) est le nombre de <i>steps</i> identifiés et bien localisés/ le nombre de <i>steps</i> identifiés par la technique de classification.....	80
Tableau 3.3. Tableau 3.3 Moyenne (écart type) des variables géométriques pour chaque site. Lu et Hu correspondent à la longueur d'onde et la hauteur des unités <i>step-pool</i> tandis que Lc et Hc correspondent à la longueur d'onde et la hauteur des unités <i>step-cascade</i> . Les deux séries de valeurs pour Ls et Lc correspondent à la longueur d'onde selon Zimmermann et Church (z.c.) (2001) et Chartrand et Whiting (c.w.)(2000). .....	83
Tableau 3.4. Matrice de corrélation (r de Pearson) entre les variables décrivant la géométrie des unités <i>step-pool</i> pour les cinq sections (n=5, *=significative à 0,05 et ** = significative à 0,01).....	84

Tableau 3.5. Matrice de corrélation (r de Pearson) entre les variables décrivant la géométrie des unités *step-cascade* pour les cinq sections (n=4, \*=significative à 0,05 et \*\* = significative à 0,01).....84

Tableau 3.6. Estimation du paramètre c dans  $H/L = cS$  pour les cinq sites d'étude.....88

Tableau 3.7. Ratios moyens de la vitesse et de la largeur selon deux emplacements sur les formes soit la crête du *step* et le point le plus profond de la mouille. a correspond à  $w_i d_i / w_j d_j$ ,  $W_p$  à la largeur au niveau de la mouille et  $W_c$  la largeur au niveau de la crête du *step*.....90

Tableau 3.8. Moyenne (écart-type) des ratios de la symétrie selon la forme soit le *step* et la mouille.....95

## Liste des figures

- Figure 1.1. Profil idéalisé d'un versant à travers le réseau de drainage, types de chenaux alluviaux et processus dominants (d'après Montgomery et Buffington, 1997).....5
- Figure 1.2. Classification des types de cours d'eau en fonction de la capacité de transport et de la disponibilité des sédiments. Le *step-pool* est caractérisé par une disponibilité de sédiments inférieure à la capacité de transport (d'après Montgomery et Buffington, 1997).....7
- Figure 1.3. Schéma d'une unité *step-pool* avec les différentes méthodes de mesure de la hauteur (H) et de la longueur d'onde (L). H1 et L1 sont les mesures utilisées par Zimmermann et Church (2001), H2 et L2 celles de Chartrand et Whiting (2000) et H3 et L3 celles de Chin (1999).....9
- Figure 1.4. Variables morphométriques qui caractérisent le *step-pool* (d'après Chartrand et Whiting, 2000 et Lenzi, 2001).....9
- Figure 1.5. Différentes variables morphométriques des mouilles en milieu naturel. Z = la hauteur de chute,  $y_s$  = la profondeur maximum d'affouillement,  $l_{max}$  = la distance du point le plus profond du point de chute,  $l_s$  = la longueur de la mouille,  $l_{step}$  = la distance entre deux *steps*, S = la pente moyenne du chenal et  $S_e$  = la pente à la sortie de la mouille (d'après Comiti *et al.* 2005).....10
- Figure 1.6. Exemples de relations obtenues entre l'espacement moyen des *steps* et la pente du chenal dans les *step-pools* naturels (d'après Chin, 1999).....12
- Figure 1.7. Relation entre la hauteur du *step* et la pente du chenal : a) relation positive et b) absence de relation significative (d'après Chin, 1999 et Chartrand et Whiting, 2000).....13
- Figure 1.8. Schéma d'une unité *step-pool* (d'après Montgomery et Buffington, 1997 et Lenzi, 2001) : a) vue en coupe et b) vue en plan.....15
- Figure 1.9. Schéma d'une unité en cascade ((a) d'après Montgomery et Buffington, 1997) : a) vue en coupe et b) vue en plan.....19
- Figure 1.10. Résidus d'élévation au-dessus du lit obtenus par la technique du *zero crossing* pour Kingledoors Bars (d'après Milne, 1982). LU et SU indiquent les ondulations de large échelle et de petite échelle qui ont été identifiées comme forme individuelle du lit par cette technique.....22

- Figure 1.11. Technique pour identifier les formes du lit selon les maximums et minimums absolus en utilisant les changements d'élévation  $E_i$  (d'après O'Neill et Abrahams, 1984).....23
- Figure 1.12. Exemples de profils transversaux (gauche) et cartes de localisation des profils (droite) (d'après Lin et Oguchi, 2006).....26
- Figure 1.13. La résistance maximale proposée par Abrahams *et al.* (1995) à partir de données sur la hauteur (H) et l'espacement entre les *steps* (L) mesurées en laboratoire et en milieu naturel (d'après Curran et Wilcock, 2005).....33
- Figure 1.14. Le diagramme de stabilité de l'antidune proposé par Kennedy (1963). Les résultats en milieu naturel et en laboratoire des chenaux de *step-pools* de plusieurs chercheurs sont reproduits sur le graphique. L'aire entre les courbes représente la zone stable de formation des antidunes (d'après Curran et Wilcock, 2005).....34
- Figure 1.15. Histogramme de l'espacement des *steps* rapporté par Whittaker et Jaeggi (1982), Whittaker (1987), Grant *et al.* (1990), Chin (1994), Abrahams *et al.* (1995), Billi *et al.* (1995), Rosport et Dittrich (1995), D'Agostino et Lenzi (1997), Chartrand et Whiting (2000), Zimmermann et Church (2001) et MacFarlane et Wohl (2003). Une distribution de Poisson modifiée est ajustée aux données (d'après Curran et Wilcock, 2005).....36
- Figure 1.16. Modèle conceptuel du développement de la structure du lit du chenal et de l'organisation à la suite d'un ajout de sédiments (*sediment pulse*) dans les rivières à lit de gravier. Le schéma montre les trajectoires estimées des changements de la morphologie du chenal à travers une gamme de pente (d'après Madej 1999).....36
- Figure 2.1. Pente et taille de particules correspondant aux *step-pools* étudiés en milieu naturel et retrouvés dans la synthèse de Lamarre (2006). Les triangles rouges représentent les *step-pools* à l'étude dans ce mémoire (adapté de Lamarre 2006).....40
- Figure 2.2. Localisation des ruisseaux Spruce, Deloges et Portes de l'Enfer. Les segments bleus représentent les cours d'eau, les courbes grises représentent la topographie et les segments noirs le réseau routier. (Digital Chart of the World, 1993; version 1 :1 000 000).....45

- Figure 2.3. Localisation des torrents Armancette et des Tours. Les segments bleus représentent les cours d'eau, les courbes grises représentent la topographie et les segments noirs le réseau routier. (Digital Chart of the World, 1993; version 1 : 1 000 000).....46
- Figure 2.4. Photos du torrent des Tours (haut) et du torrent Armancette (bas).....47
- Figure 2.5. Photos montrant les berges du torrent des Tours (haut) et du torrent Armancette (bas).....48
- Figure 2.6. Photos des trois ruisseaux : ruisseau Spruce (haut), ruisseau Portes de l'Enfer (bas gauche) et ruisseau Deloges (bas droite).....49
- Figure 2.7. Station Totale tachéométrique.....52
- Figure 2.8. Courbes de fréquence cumulée de la distribution granulométrique de l'axe B (intermédiaire) des particules à la surface du lit.....53
- Figure 2.9. Schématisation des critères d'identification de la technique de classification pour identifier l'unité *step-pool* (S-P) et l'unité *step-cascade* (S,C,C).....57
- Figure 2.10. Calcul de la longueur d'onde et de la hauteur selon deux méthodes soit L unité, L cascade et H unité, H cascade. L unité désigne la longueur d'onde entre deux unités soit la distance entre la crête du *step* le plus élevé de chaque unité. L cascade correspond à la distance entre la crête des cascades dans une unité mixte *step-cascade*. H unité désigne la hauteur entre la crête du *step* et le point le plus bas de l'unité dans la mouille. H cascade définit la hauteur entre la crête de la cascade et le point le plus bas en aval de la cascade.....59
- Figure 3.1. Modèle d'élévation numérique du torrent des Tours (a), torrent Armancette (b), ruisseau Spruce (c), ruisseau Portes de l'Enfer (d) et ruisseau Deloges (e). Les lignes noires sur les profils des trois ruisseaux représentent les *steps* identifiés par la technique d'identification visuelle.....65-67
- Figure 3.2. Profil des résidus des élévations du torrent des Tours (a), torrent Armancette (b), ruisseau Spruce (c), ruisseau Portes de l'Enfer (d) et ruisseau Deloges (e). Les deux premières techniques d'identification des éléments morphologiques du lit sont présentées. La technique du *zero crossing* est représentée par l'alternance de barre noire (mouille) et blanche (*step*) au-dessus des profils. La technique de différences des formes du lit est représentée par les trois tolérances décrites dans la légende.....72-74

Figure 3.3. Histogrammes de toutes les pentes entre deux points adjacents de l'amont vers l'aval pour les cinq sections de rivière. La pente critique de chaque site est identifiée par une flèche.....77

Figure 3.4. Représentation des résultats des techniques de la pente critique et de la classification sur les profils des résidus du torrent des Tours (a), du torrent Armancette (b), du ruisseau Spruce (c), du ruisseau Portes de l'Enfer (d) et du ruisseau Deloges (e). Les *steps* identifiés par la pente critique sont marqués par un x tandis que les formes identifiées par la technique de la classification sont marquées par S-P pour les unités *step-pool* et S et C pour les unités mixte *step-cascade*.....78-79

Figure 3.5. Analyse spectrale pour le torrent des Tours (a), le torrent Armancette (b), le ruisseau Spruce (c), le ruisseau Portes de l'Enfer (d) et le ruisseau Deloges (e). La ligne grise indique l'intervalle de confiance de 95%.....85

Figure 3.6. Dispersion des *steps* selon l'espacement et la hauteur pour le torrent des Tours (a), le torrent Armancette (b), le ruisseau Spruce (c), le ruisseau Portes de l'Enfer (d) et le ruisseau Deloges (e). Les *steps* utilisés sont ceux des deux morphologies.....87

Figure 3.7. Histogramme de distribution de l'espacement entre les *steps* pour le torrent des Tours (a), le torrent Armancette (b), le ruisseau Spruce (c), le ruisseau Portes de l'Enfer (d) et le ruisseau Deloges (e). Les *steps* utilisés sont ceux des deux morphologies.....87

Figure 3.8. Relation entre la pente et la résistance maximale proposée par Abrahams *et al.* (1995) à partir de données sur la hauteur (H) et l'espacement entre les *steps* (L) mesurées en laboratoire et en milieu naturel (d'après Currant et Wilcock, 2005).....89

Figure 3.9. Diagramme représentant l'aire de la section en fonction de la distance vers l'aval pour le torrent des Tours (a), le torrent Armancette (b), le ruisseau Spruce (c), le ruisseau Portes de l'Enfer (d) et le ruisseau Deloges (e). L'aire de la section est calculée pour chaque coupe transversale selon  $Wd = A$ . Les *steps* identifiés par la technique de classification sont représentés par un S.....93-94

Figure 4.1. Potentiel d'énergie dissipée selon la morphologie *step-pool* (haut) et mixte *step-cascade* (bas).....104

Figure 4.2. Progression des cinq cours d'eau à l'étude selon la stabilité et la pente.....107

## Liste des symboles

A	Aire de la coupe transversale ( $m^2$ )
a	ratio de vitesse = $w_i d_i / w_j d_j$
$\beta_c$	Pente critique
c	Paramètre d'escarpement non dimensionnel
C	Cascade
d	Profondeur moyenne (m)
$D_i$ ou $D_x$	Diamètre du $i^e$ ou $x^e$ percentile d'une distribution de taille des particules (mm)
$D_m$	Taille médiane des particules (mm)
E	Changement d'élévation (m)
g	Accélération gravitationnelle ( $m^2/s$ )
H	Hauteur d'un <i>step</i> (m)
$h_s$	Changement cumulatif d'élévation de la surface de l'eau (m)
K	Hauteur d'une particule au dessus du lit (m)
L	Longueur d'onde ou distance entre deux <i>steps</i> (m)
m	Masse
N	Nombre d'objets ou taille de l'échantillon
PE	Potentiel de dissipation de l'énergie (%)
$p_x$	Position d'un point
Q	Débit du cours d'eau ( $m^3/s$ )
$Q_{bf}$	Débit du cours d'eau plein bord ( $m^3/s$ )
r	Coefficient de corrélation
S	Pente du lit (%)
S	<i>Step</i>
S-P	<i>Step-pool</i>

$S_d$	Cumulatif des changements d'élévation (m)
T	Seuil de tolérance
v	Vitesse de l'écoulement ( $m^2/s$ )
W	Largeur du cours d'eau au niveau plein bord (m)
$W_p$	Largeur à la mouille au niveau plein bord (m)
$W_s$	Largeur à la crête du <i>step</i> au niveau plein bord(m)
Z	Hauteur de chute (m)
$\theta$	Pente ( $^\circ$ )

## Remerciements

Je remercie avec enthousiasme et respect :

- André, pour m'avoir donné la chance de vivre cette expérience, pour ta confiance en moi et ta grande intelligence. La chaire pour son support financier.

- Tout ceux et celles du laboratoire, Geneviève, Bruce, Jay, Katherine, Hélène qui m'ont accompagnée sur le terrain et m'ont aidée de n'importe quelle manière. Hélène merci d'avoir fait une si belle thèse qui fut mon livre de chevet longtemps. Les amis(es) du lab de pédo qui m'ont permis quelques/plusieurs moments de détente.

- Jay et Nina pour m'avoir fait sourire.

- Damien Rice pour son soutien musical.

- Tous ceux qui m'ont encouragée malgré l'incompréhension et la surprise lorsque je leur disais : moi j'étudie les rivières.

- Ma mère pour sa fameuse question : qu'est-ce que tu fais Julie?

- Mary, pour ses jokes plates.

## Introduction

Le milieu montagneux est étudié depuis longtemps par différents domaines de recherche tels que la biologie, l'ingénierie, l'écologie, l'aménagement et la géomorphologie fluviale. L'engouement pour les cours d'eau à lit de graviers avec un fort gradient de pente a débuté vers le début des années 80 avec les travaux de Hey *et al.* (1982), Thorne *et al.* (1987) et Billi *et al.* (1992). La parution du livre *Mountain Rivers* écrit par Ellen Wohl en 2000 est l'exemple parfait de l'importance qu'ont acquise les cours d'eau de montagne dans le domaine de la géomorphologie fluviale. De plus, l'élaboration de classifications morphologiques des cours d'eau telles que celles de Grant *et al.*, (1990), Montgomery et Buffington (1997) et plus récemment de Thompson *et al.*, (2006, 2007) a permis de distinguer les processus des cours d'eau de montagne de ceux des cours d'eau à faible gradient de pente. Thompson *et al.* (2007) ont montré que l'augmentation des pressions humaines et des perturbations du paysage sur les cours d'eau de montagne ont des effets directs sur les processus des cours d'eau de fond de vallée. Dans ce contexte, la compréhension des cours d'eau de montagne et de leurs réponses aux changements environnementaux et anthropiques est essentielle pour l'aménagement et la restauration tant au niveau des cours d'eau de tête que de ceux de fond de vallée. De plus, Thompson *et al.* (2007) ont montré que le type de morphologie reflète ou influence le potentiel d'habitat physique et la biodiversité d'un cours d'eau. Dans ce sens, il est important d'identifier clairement les unités morphologiques des cours d'eau de montagne telles que le *step-pool*<sup>1</sup>, la cascade ou le seuil-mouille afin de connaître la variabilité du potentiel d'habitat d'un tronçon ou de la totalité du cours d'eau.

---

<sup>1</sup> Le terme *step-pool* sera utilisé ici malgré sa linguistique/origine anglaise. Nous utilisons le terme *step-pool* tel que Bravard et Petit (1997) et Lamarre (2006) l'ont utilisé en français afin d'uniformiser la terminologie.

Ce projet de recherche s'inscrit dans une des trois tendances, identifiées par Chin et Wohl (2005), s'étant récemment développées au sujet de la morphologie des cours d'eau de montagne. Cette tendance insiste sur la combinaison des formes et processus afin d'expliquer la morphologie du cours d'eau dans les bassins de drainage. Le mémoire qui suit tente de tester si l'application d'un même protocole de recherche permet une uniformisation des méthodes d'identification des éléments morphologiques du lit et leur caractérisation. De plus, le protocole sera appliqué sur des sections de cours d'eau comportant différents gradients de pente et des états de stabilité divers, soit de très stable à peu stable. Le mémoire se divise en quatre sections. La première section présente le contexte de l'étude. Nous avons procédé à une vaste recension de la littérature afin de bien cerner les lacunes et les besoins concernant l'étude des cours d'eau de montagne et d'établir les objectifs de l'étude. Le chapitre 2 décrit la problématique et la méthodologie nécessaire dans un contexte d'uniformisation du protocole de recherche. Le chapitre 3 présente les résultats tirés des différentes techniques d'identification des formes du lit et les relations géométriques qui caractérisent les cours d'eau. Nous terminons par une discussion sur le protocole de recherche et les caractéristiques propres aux cours d'eau de montagne et à la morphologie retrouvée.

## 1. Contexte de la recherche

Ce chapitre a comme objectif de faire ressortir plusieurs questions concernant les cours d'eau formés de *step-pools* et de cascades, deux types caractéristiques du milieu montagneux, afin de mieux comprendre la problématique du projet de recherche. Nous définirons, tout d'abord, le concept de cours d'eau de montagne pour ensuite aborder plus en détails les différentes morphologies retrouvées. Par la suite, nous concentrerons notre attention sur la morphologie en *step-pool* et en cascade afin de définir leur géométrie. Suivra une section sur les différentes techniques d'identification des éléments morphologiques du lit. Finalement, nous illustrerons la complexité de ces morphologies tant au niveau de leur formation que de leur destruction.

### 1.1 Définition

On définit un cours d'eau de montagne comme un cours d'eau localisé dans une région montagneuse ayant un gradient de pente supérieur ou égal à 0,02 m/m sur la majorité de son profil longitudinal (Wohl, 2000). Pour catégoriser ces cours d'eau, il existe différentes approches qui reposent sur les caractéristiques du régime hydrologique, le gradient de pente du cours d'eau, les formes du lit, le profil du cours d'eau et le régime climatique. Toutefois, on s'entend sur les caractéristiques générales qui différencient les rivières de montagne des autres rivières. Au delà de son fort gradient de pente, un cours d'eau de montagne se caractérise aussi par :

- Une forte résistance du chenal et une rugosité sédimentaire élevée due à la présence de blocs ou de cailloux moins présents dans les cours d'eau à faible gradient de pente;
- Une turbulence de l'écoulement élevée;
- Une morphologie variant dans l'espace à cause du contrôle géologique mais peu dans le temps à cause de la faible fréquence des crues ou des coulées de sédiments qui mobilisent le lit;

- Un régime de débit saisonnier influencé par la fonte des glaces et de la neige et par les précipitations qui elles-mêmes dépendent spatialement et temporellement de l'altitude et l'orientation du bassin;
- Un potentiel important d'une augmentation de la charge en sédiments sur une période de quelques années résultant d'une modification du bassin (coupe forestière, feux de forêts); et
- Une zonation longitudinale de la végétation riparienne qui est fonction des caractéristiques du cours d'eau et de son altitude.

Il existe des exceptions à ces caractéristiques générales telles que les cours d'eau de montagne en milieu humide tropical qui ne sont pas influencés par un régime d'écoulement saisonnier ou les régions arides qui peuvent avoir un lit dominé par des sédiments fins comme le sable (Wohl, 2000). Dans la littérature, on retrouve aussi le terme torrent pour identifier les cours d'eau de montagne de fort gradient de pente. Rickenmann (1997, 2001) décrit un torrent comme un cours d'eau ayant une pente raide ( $\geq 0.05$  m/m) qui présente une réponse précipitation-ruissellement rapide. Dans cette recherche, le terme torrent sera utilisé comme synonyme à l'expression 'cours d'eau de montagne'.

## **1.2. Morphologie**

La morphologie des cours d'eau de montagne varie spatialement mais peu temporellement. Les événements pouvant modifier la morphologie doivent être de grande magnitude et ils se produisent à récurrence très faible comparativement à ceux qui jouent sur la morphologie des cours d'eau alluviaux de fond de vallée. De plus, la forte résistance du substrat dans les cours d'eau de montagne permet de maintenir une stabilité morphologique dans le temps. Plusieurs systèmes de classification s'appliquent partiellement ou en totalité aux cours d'eau de montagne. À l'échelle du bassin versant, le chenal peut être classé en terme d'une unité selon (1) la structure morphologique du lit; (2) le temps ou l'évolution; (3) les patrons spatiaux du lit et (4) une hiérarchie d'ordre du cours d'eau (Whiting et

Bradley, 1993, Wohl et Merritt, 2005). Toutefois, à cause de la variabilité spatiale des formes et de la rugosité du lit, il est plus facile et approprié de segmenter le profil longitudinal d'un torrent en sections afin de cerner l'ensemble des morphologies présentes. En général, une section est caractérisée par une homogénéité ou un continuum morphologique d'une longueur égale à quelques largeurs de chenal (Wohl, 2000).

Le système de classification le plus utilisé dans le milieu montagneux est celui de Montgomery et Buffington (1997). La classification se base sur les variables suivantes: la pente, la rugosité, la source de sédiments, le type de substrat du lit, les patrons du lit et les éléments de stockage des sédiments. D'abord, ils établissent trois types de substrat propre au milieu montagneux soit le lit rocheux, le lit alluvial et le domaine colluvial. Le lit alluvial se divise en cinq morphologies distinctes soit la cascade, le *step-pool*, le lit plat, le seuil-mouille et les dunes/rides. Le système de Montgomery et Buffington (1997) établit une progression, de l'amont vers l'aval, des types de morphologie sur un profil longitudinal idéalisé (Fig. 1.1). Le type à lit rocheux n'apparaît pas sur la figure car il est sporadique et souvent associé au type alluvial. La morphologie dunes/rides est plutôt rare en milieu montagneux car elle correspond à un gradient de pente faible et à la présence d'un substrat sableux.

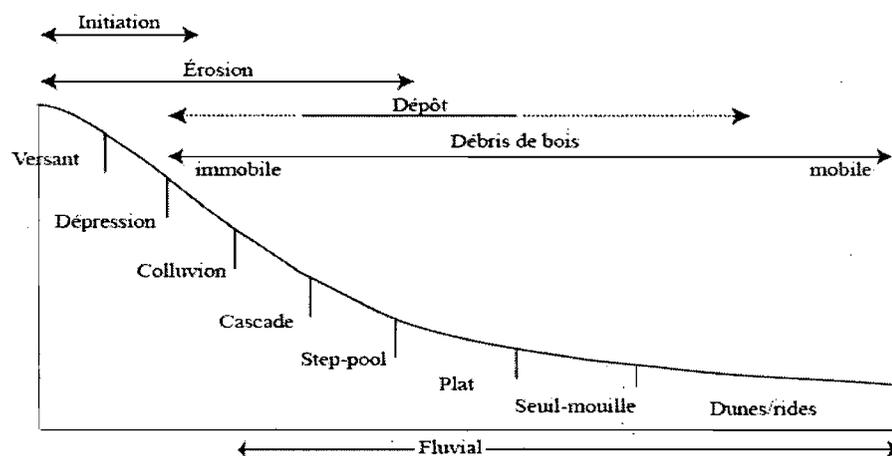


Figure 1.1 Profil idéalisé d'un versant à travers le réseau de drainage, types de chenaux alluviaux et processus dominants (d'après Montgomery et Buffington, 1997).

Le profil longitudinal idéalisé proposé par Montgomery et Buffington (1997) a été appliqué à différentes régions géographiques afin de tester sa pertinence. Il ressort que la progression vers l'aval des chenaux à cascades vers les chenaux en seuil-mouille de faible gradient de pente se retrouve dans différentes régions mais il existe une variabilité dans les valeurs de gradients de pente qui marquent les transitions entre deux types morphologiques (Wohl et Merritt, 2005). Montgomery et Buffington (1997) avaient établi des valeurs de gradients de pente supérieures à 0,065 pour la cascade, 0,03-0,065 m/m pour le *step-pool*, 0,015-0,03 m/m pour le lit plat et moins de 0,015 m/m pour le seuil-mouille à partir de leurs données acquises en Oregon, Alaska et Washington. Montgomery et Buffington (1997) ne sont pas les seuls à constater que la pente influe sur le type de chenal. Halwas et Church (2002), à partir d'un relevé topographique d'un cours d'eau sur une distance de 1750 mètres, ont montré que la pente du lit est un critère raisonnable pour classer les unités de chenal.

Montgomery et Buffington (1997) ont aussi utilisé la rugosité relative en plus de la pente pour identifier les unités morphologiques. La rugosité est le résultat de l'ajustement du lit entre la taille des sédiments disponibles pour le transport et la capacité de transport. En milieu montagneux, l'apport sédimentaire est souvent limité en raison des sources sédimentaires fluviales peu abondantes. Cependant, en tête de bassin, le rôle des versants est accru suite à l'apport de sédiments provenant de coulées de débris ou de mouvement de masse comparativement aux sections de faible gradient de pente plus en aval où la plaine alluviale et l'élargissement de la vallée atténue l'effet direct des processus de versant (Halwas et Church, 2002). Toutefois, cet apport de versant est sporadique c'est pourquoi Montgomery et Buffington (1997) ont proposé un ratio négatif entre la quantité de sédiments disponibles ( $Q_s$ ) et la capacité de transport ( $Q_c$ ), notion qui a été reprise par plusieurs chercheurs pour expliquer la morphologie du cours d'eau (Thompson *et al.*, 2006; Wohl et Merritt, 2005). La Figure 1.2 situe les différentes morphologies selon la capacité de transport du cours d'eau et la disponibilité des sédiments. Le

*step-pool* et la cascade se situent à gauche du schéma dans la zone de capacité de transport élevée.

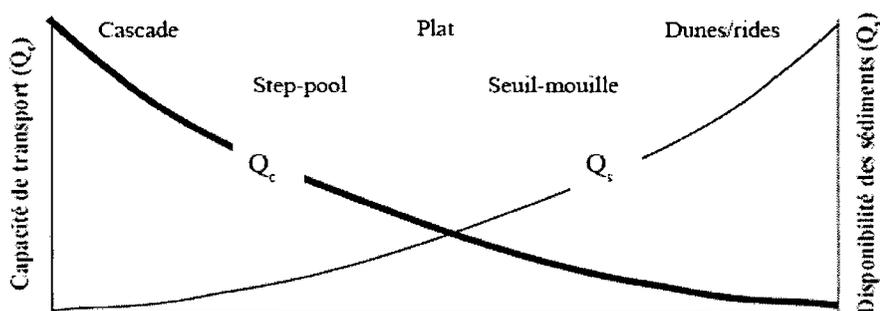


Figure 1.2 Classification des types de cours d'eau en fonction de la capacité de transport et de la disponibilité des sédiments. Le *step-pool* est caractérisé par une disponibilité de sédiments inférieure à la capacité de transport (d'après Montgomery et Buffington, 1997).

Lorsque la morphologie d'une section est difficile à identifier, notamment quand on retrouve une diversité de caractéristiques ou de formes, on lui attribue le type de morphologie intermédiaire. Par exemple, il peut arriver que sur une section on retrouve deux types de morphologie tels que le *step-pool* et la cascade ou le cascade mouillée (*step-mouille-cascade*) (Montgomery et Buffington, 1997). La transition entre les deux morphologies est souvent difficile à déterminer en raison de leur ressemblance visuelle et de la similarité de leurs caractéristiques. Wooldridge et Hickin (2002) ont distingué le *step-pool* de la cascade par 1) le degré de structure et d'arrangement des particules qui est plus marqué dans le *step-pool*, 2) l'ampleur avec laquelle les structures de l'écoulement s'étendent dans le cours d'eau et, 3) la nature du développement de la mouille. Les types morphologiques les plus communs en milieu montagneux sont les unités *step-pool* et cascade et les unités seuil-mouille (Lenzi, 2001). L'unité seuil-mouille se retrouve rarement ou jamais en tête de cours d'eau en raison du gradient de pente qui excède 3-5% (Rosgen, 1994; Montgomery et Buffington, 1997; Lenzi, 2001). Dans cette recherche, il sera question de la morphologie *step-pool* et cascade exclusivement.

En résumé, l'identification des unités morphologiques d'un chenal demeure une activité complexe, en raison du manque de concordance entre les chercheurs pour attribuer des critères efficaces d'identification. Plusieurs questions surgissent quant à l'identification de la morphologie du cours d'eau. Peut-on utiliser seulement la pente comme critère de classification? Doit-on tenir compte de la rugosité? La section suivante aborde la géométrie des cours d'eau de montagne afin de nous donner de meilleurs indicateurs pour identifier le type de morphologie.

### 1.3. Géométrie

La géométrie des formes des torrents est importante puisqu'elle permet de lier les processus à des caractéristiques précises par exemple, la capacité de transport avec la taille des particules ( $D_{50}$ ). Elle permet aussi de comprendre les contrôles hydrologiques et sédimentaires qui maintiennent la stabilité du chenal (Chin, 1989). La géométrie du cours d'eau et sa rugosité déterminent comment et où sera dissipée l'énergie à l'échelle du tronçon. En général, on décrit la morphologie des *step-pools* et cascades par les variables suivantes : la hauteur des *steps* ( $H$ ), la longueur d'onde des *steps* ou l'espacement entre deux *steps* ( $L$ ), la profondeur de surcreusement de la mouille ( $\Delta E$ ), la largeur du chenal ( $W$ ), la pente du lit ( $S$ ) et la taille médiane des particules ( $D_{50}$ ). Plusieurs définitions existent pour la hauteur des *steps* et la longueur des *steps*. Zimmermann et Church (2001) ont établi la hauteur des *steps* en utilisant la crête du *step* et le point le plus profond de la mouille en aval du *step* tandis que Chartrand et Whiting (2000) l'ont mesuré par la différence entre la crête du *step* et le point qui marque la fin aval du *step* et le début de la mouille (Fig. 1.3). Chin (1989, 1999) a mesuré la hauteur du *step* par la distance perpendiculaire entre la crête du *step* en aval et une ligne imaginaire représentant la longueur d'onde du *step* (Fig. 1.3). La longueur d'onde du *step* est mesurée entre deux crêtes successives mesurées au talweg pour Chartrand et Whiting (2000) et Zimmermann et Church (2001) (Fig. 1.3). Mais les premiers utilisent la distance horizontale tandis que les seconds utilisent la distance en angle. Chin (1989, 1999) utilise les points les plus profonds de deux mouilles

successives pour calculer la longueur d'onde. Ces différentes définitions entraînent des difficultés dans la comparaison des résultats entre les études.

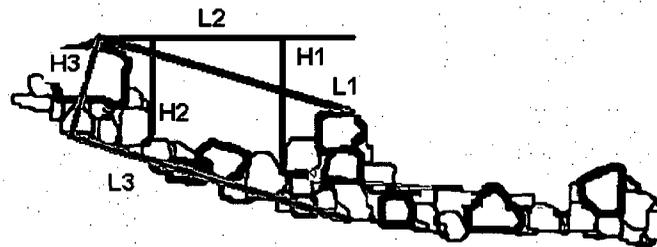


Figure 1.3 Schéma d'une unité *step-pool* avec les différentes méthodes de mesure de la hauteur (H) et de la longueur d'onde (L). H1 et L1 sont les mesures utilisées par Zimmermann et Church (2001), H2 et L2 celles de Chartrand et Whiting (2000) et H3 et L3 celles de Chin (1999).

La profondeur de surcreusement est la différence d'élévation entre la hauteur du step et le changement d'élévation entre deux *steps* successifs (Chartrand et Whiting, 2000) (Fig. 1.4). Cette profondeur est généralement associée au point le plus profond de la mouille qui se trouve immédiatement en aval du step. La largeur du chenal est mesurée au-dessus de la crête du step et la pente est estimée sur la section totale. Toutefois, la pente peut être mesurée au niveau du step ou de la mouille séparément afin de donner une idée des variations de la pente sur la section. Le  $D_{50}$  représente la taille médiane des particules retrouvées dans la mouille ou dans le step et est utilisé comme une mesure de la compétence du cours d'eau. On utilise aussi le  $D_{84}$  et le  $D_{16}$  dans la littérature comme indices granulométriques (Lamarre, 2006).

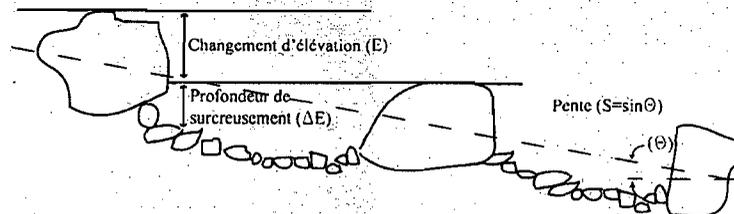


Figure 1.4 Variables morphométriques qui caractérisent le *step-pool* (d'après Chartrand et Whiting, 2000 et Lenzi, 2001).

Les variables géométriques se rapportant aux mouilles en milieu naturel sont définies à la Figure 1.5 (Comiti *et al.* 2005). La profondeur de la mouille est fonction de l'équilibre entre la profondeur de l'écoulement qui produit l'affouillement et le remplissage ou l'apport de particules lors d'événements faibles (Thompson, 2006). La taille maximale de la mouille est généralement atteinte lors des évènements peu fréquents (Sear, 1996; Thompson, 2006). On a observé en laboratoire, une réduction de la taille et de la profondeur d'affouillement de la mouille suite à une réduction du débit (Lisle, 1987; Thompson, 2006).

La plupart des relations décrivant la géométrie des cours d'eau de montagne se basent sur l'hypothèse qu'une variation spatiale existe pour la morphologie *step-pool* soit que les *steps* sont mieux définis et plus réguliers à fort gradient de pente et qu'ils deviennent progressivement plus longs et moins marqués vers l'aval (Hayward, 1980, Brummer et Montgomery, 2003, Golden et Springer 2006). La relation entre la largeur du chenal et la longueur d'onde, émise d'abord par Whittaker (1987) et reprise ensuite par plusieurs chercheurs (ex : Chin, 1989; Grant *et al.*, 1990; Montgomery *et al.*, 1995; Billi *et al.*, 1995; Chartrand et Whiting, 2000; Curran et Wohl, 2003, Brummer et Montgomery, 2003) montre que la longueur d'onde varie entre moins de une à quatre fois la largeur du chenal.

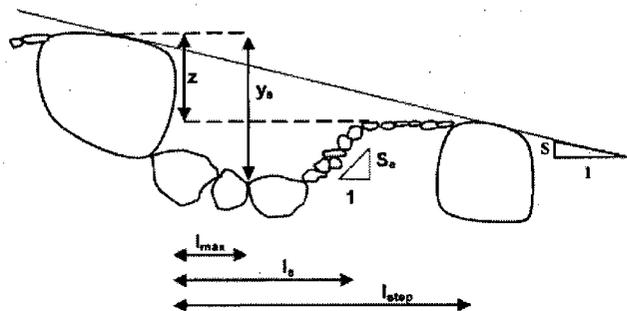


Figure 1.5 Différentes variables morphométriques des mouilles en milieu naturel.  $Z$  = la hauteur de chute,  $y_s$  = la profondeur maximum d'affouillement,  $l_{max}$  = la distance du point le plus profond du point de chute,  $l_s$  = la longueur de la mouille,  $l_{step}$  = la distance entre deux *steps*,  $S$  = la pente moyenne du chenal et  $S_e$  = la pente à la sortie de la mouille (d'après Comiti *et al.* 2005).

Curran et Wilcock (2005) et Giménez-Curto et Corniero (2006) ont établi un espacement minimum entre deux *steps* en considérant la zone d'exclusion qui se situe immédiatement en aval du *step*. Cette zone est dite d'exclusion car les particules formant les *steps* ne sont pas capables de se déposer ou de former un nouveau *step*. La mouille est incluse dans la zone d'exclusion mais elle ne correspond pas entièrement à la longueur de la zone. La relation pour obtenir l'espacement minimum est fonction de la hauteur du *step*, de la vitesse de l'écoulement et de la pente du lit.

Ainsi, on utilise généralement la longueur d'onde comme variable dépendante pour déterminer la variabilité de la géométrie. De plus, plusieurs relations ont été présentées dans la littérature afin d'établir un lien avec des hypothèses de formation des *step-pools*. Il y a deux types de relation qui sont analysés fréquemment soit : 1) l'effet de la pente, de la hauteur du *step* et de la largeur du chenal sur la longueur d'onde et 2) l'effet de la pente et de la taille des particules sur la hauteur des *steps*. Le ratio H/L varie généralement entre 0.06 à 0.20 avec une valeur médiane près de 0.1 (Chartrand et Whiting, 2000; Wooldridge et Hickin, 2002; Chin, 1999, 2002; Chin et Wohl, 2005). Ce ratio permet de mesurer le degré d'inclinaison de l'unité *step-pool*. Une relation inverse existe entre la longueur d'onde et la pente du chenal montrant que L diminue avec l'augmentation de S. Cette relation a été décrite par plusieurs chercheurs pour différentes régions (Fig. 1.6) en Israël, aux États-Unis et au Canada (Hayward, 1980; Wohl et Grodek, 1994; Grant *et al.*, 1990; Wohl *et al.*, 1997; Wooldridge et Hickin, 2002). La relation négative exponentielle se définit par l'équation de Judd (1964):

$$L = K/CS^z$$

où K = la hauteur d'une particule du lit représentative et C et z sont des constantes. Cette relation n'est pas toujours présente mais il semble qu'elle soit fermement établie dans la littérature (Chartrand et Whiting, 2000; Duckson et Ducskon, 2001; Chin et Wohl, 2005) puisqu'elle décrit un ajustement mutuel entre la morphologie et la géométrie hydraulique des cours d'eau de montagne (Heede,

1981; Chin, 1989). Cet ajustement est aussi présent pour les *steps* formés de débris ligneux (Chin, 1989; Wohl *et al.*, 1997).

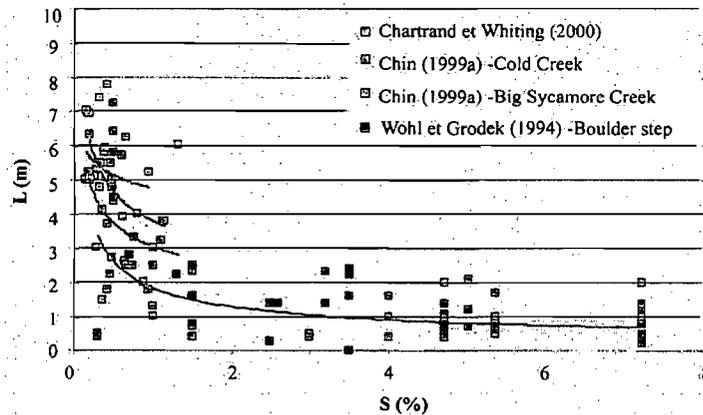


Figure 1.6 Exemples de relations obtenues entre l'espacement moyen des *steps* et la pente du chenal dans les *step-pools* naturels (d'après Chin, 1999).

La hauteur du step montre une relation positive avec la pente du chenal (Wohl et Grodek, 1994; Chin, 1999; Duckson et Duckson, 2001) et elle est contrôlée par la taille des particules composant le step (Chartrand et Whiting, 2000; Wohl *et al.*, 2004; Chin, 1999). En laboratoire, Ashida *et al.* (1984) et Egashira et Ashida (1991) avaient établi une relation similaire soit :

$$\Delta/D_m = \text{constante} \sim 1$$

où  $\Delta$  = la hauteur d'onde moyenne du step et  $D_m$  = la taille médiane des particules imbriquées dans le step. Selon Tatsuzawa *et al.* (1999), la hauteur du step peut être estimée par le  $D_{84}$  tandis que Ashida *et al.* (1984) ont lié la hauteur à la particule la plus grosse. Chartrand et Whiting (2000) ont obtenu un coefficient de corrélation plus élevé entre la hauteur du step et le  $D_{50}$  qu'avec le  $D_{84}$ . De plus, la taille de la mouille en aval d'un step est fortement corrélée avec la hauteur de chute (Lenzi et Comiti, 2003) ou la hauteur du step (Milzow *et al.*, 2006).

Plusieurs relations parfois contradictoires ou incertaines existent entre les différentes variables morphologiques des torrents. Certains chercheurs (Chartrand et Whiting, 2000) ont proposé une relation positive entre la hauteur du step et

l'espacement entre les *steps* tandis que d'autres (Wooldridge et Hickin, 2002; Gomi *et al.*, 2003) n'ont pas trouvé de relation. Chin (1999) a proposé une relation positive entre la hauteur du step et la pente tandis que Chartrand et Whiting (2000) n'ont pas réussi à établir de relation (Fig. 1.7). Chartrand et Whiting (2000) et Wohl *et al.* (1997) ont trouvé une relation positive entre la longueur d'onde et la taille des particules du step tandis que Grant *et al.* (1990), Wohl et Grodek (1994), Wooldridge et Hickin (2002) n'ont pas observé de relation.

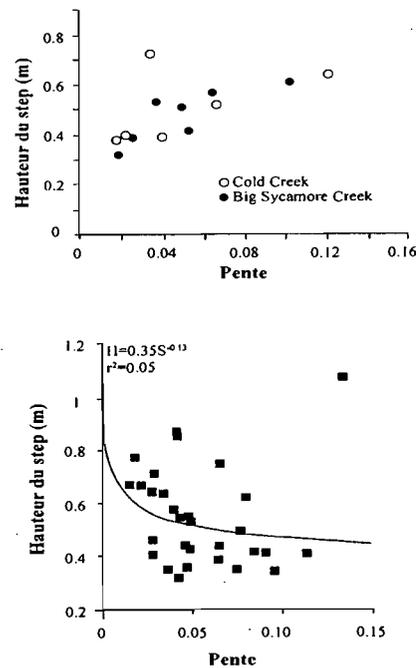


Figure 1.7 Relation entre la hauteur du step et la pente du chenal : a) relation positive et b) absence de relation significative (d'après Chin, 1999 et Chartrand et Whiting, 2000).

Ces résultats contradictoires peuvent être attribués aux difficultés de lier directement le step aux caractéristiques du chenal. Par exemple, Wooldridge et Hickin (2002) expliquent qu'il pourrait y avoir une relation positive mais non directe entre l'espacement entre les *steps* et la taille des particules étant donné que la taille des particules est liée à la taille du step qui lui-même influence la longueur d'onde entre les *steps*. Chin (1999) attribue les différents résultats obtenus aux différents environnements étudiés tels que la taille et le régime d'écoulement du système à l'étude. Halwas et Church (2002) vont dans ce sens en expliquant la

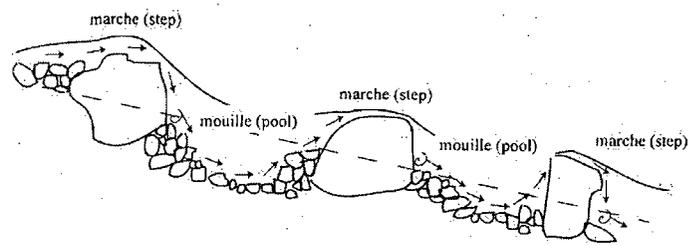
non concordance de leurs résultats avec ceux des autres chercheurs par le fait que les cours d'eau choisis étaient plus petits et le gradient plus élevé que dans les autres études. Plusieurs problèmes dans l'établissement de relations surgissent du fait que les variables comme la pente, la taille des particules et la largeur du chenal varient localement le long du cours d'eau. De plus, le choix du moment de la prise des données peut influencer les valeurs obtenues. Si le cours d'eau vient de subir un événement de récurrence de 10 ans et plus, les unités morphologiques seront en période d'ajustement ce qui introduira du bruit dans les relations géométriques. Si les unités sont stables et présentent un ajustement maximum, il est plus probable d'obtenir des relations significatives. Finalement, la variabilité des relations peut être due aux différentes définitions des variables (Nickolotsky et Pavlowsky, 2006). Une différence de 30% peut survenir dans le calcul du ratio H/L selon la mesure utilisée dans le cas de la hauteur du step (Nickolotsky et Pavlowsky, 2006).

La difficulté de trouver des relations claires et précises entre les variables morphologiques des chenaux en *step-pool* ou en cascade porte à croire que le contexte, les définitions, les techniques de prise de données et l'environnement sont tous des paramètres qui doivent être pris en compte par les chercheurs lors de l'étude d'un système fluvial. Suite à ces incertitudes, plusieurs questions surgissent. Existe-t-il une variabilité morphologique au sein d'un même système ou se retrouve-t-elle seulement entre deux systèmes distincts? Devrait-il y avoir une uniformisation des définitions opérationnelles de la mesure et des données qui en résultent afin de faciliter la comparaison entre les études? Les deux sections suivantes nous permettront d'identifier des critères importants pouvant permettre de différencier la morphologie en *step-pool* de celle en cascade. Ces critères nous permettront de déterminer les points essentiels dont il faut tenir compte dans l'uniformisation éventuelle d'un protocole de mesure.

### 1.3.1. *Step-pool*

Le cours d'eau en *step-pool* est formé par la succession de section de pente et écoulement forts et faibles associés à l'alternance des *steps* et des mouilles (Fig. 1.8) (Grant *et al.*, 1990; Chin, 1989; Montgomery et Buffington, 1997; Thompson *et al.*, 2006). Grant *et al.* (1990) suggèrent que le *step-pool* est une unité de chenal de l'ordre d'une largeur plein bord et que cette unité est incluse, à plus grande échelle, dans le chenal en cascade. Montgomery et Buffington (1997), pour leur part, ont suggéré que le *step-pool* représente un type de chenal distinct de la cascade.

a)



b)

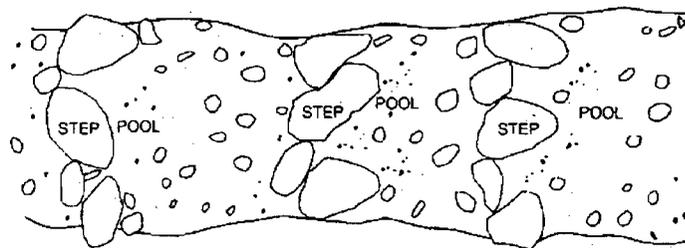


Figure 1.8 Schéma d'une unité *step-pool* (d'après Montgomery et Buffington, 1997 et Lenzi, 2001) : a) vue en coupe et b) vue en plan.

L'unité *step-pool* est retrouvée à un gradient de pente supérieur à 2° ou 4% tandis que le cours d'eau en *step-pool* se retrouve à un gradient de pente supérieur à 4° ou 7% (Church et Zimmermann, 2007). Grant *et al.* (1990) et Wohl et Grodek

(1994) ont établi une limite de pente au-delà de laquelle la morphologie en *step-pool* ne se forme plus. Les premiers ont obtenu une limite de 40% tandis que les seconds ont retrouvé des *steps* sur un gradient de pente aussi élevé que 73% (Church et Zimmermann, 2007). Le gradient de pente local est influencé et contrôlé par les blocs rocheux qui agissent comme des roches d'ancrage. Ces roches d'ancrages sont visibles à écoulement faible ou intermédiaire. Dans la littérature on compare le *step-pool* à des séquences en marche (*step*) d'escalier (Whittaker, 1987; Grant *et al.*, 1990; Egashira et Ashida, 1991; Gomi *et al.*, 2003; Curran et Wilcock, 2005). Les *steps* sont composés de différents matériaux (Hayward, 1980) tels que des cailloux ou blocs grossiers, de la roche en place et des débris ligneux (LWD, diamètre > 10 cm) (Chin 1989, 1999; Thompson *et al.*, 2006; Duckson et Duckson, 1995; Hayward, 1980). Les *steps* formés par l'imbrication de cailloux ou blocs grossiers sont les plus communs dans les cours d'eau montagneux (Lenzi, 2001). Toutefois, les débris ligneux jouent le même rôle que les roches d'ancrages dans la formation des *steps* et exercent un contrôle important sur les processus et la morphologie des cours d'eau. Dans les cours d'eau de montagne, les LWD peuvent bloquer les sédiments, causer un affouillement du lit et la formation de bancs et créer des *steps* (Montgomery *et al.* 1995). Toutefois, le degré d'influence des LWD dépendra de leur taille en rapport avec celle du cours d'eau, de leur orientation relative à l'écoulement et de leur hauteur au-dessus du lit (Lisle, 1986; Montgomery *et al.*, 1995).

Les mouilles représentent des zones locales d'affouillement du lit causées par la convergence de l'écoulement et de la macroturbulence capable de mobiliser le matériel à la surface du lit et de transporter les particules plus rapidement que les mouvements de remplissage (Buffington *et al.*, 2002). Les processus d'affouillement diminueront jusqu'à atteindre un équilibre entre les sédiments entrant et sortant. Les mouilles sont creusées à fort débit et se remplissent à faible débit (Keller et Melhorn, 1978). Elles peuvent aussi se former à la faveur d'une obstruction locale (ex : roche mère, débris ligneux) qui cause une convergence de l'écoulement et une augmentation de la turbulence locale (Keller et Swanson, 1979). Dans ce cas on parle de mouille forcée. La distance entre les mouilles est

de une à quatre fois la largeur du chenal et elles sont de taille plus petite ou égale à la largeur du chenal (Montgomery et Buffington, 1997; Grant *et al.*, 1990; Chin, 1989; Whittaker, 1987). La distance des mouilles forcées dépend de la distribution des éléments d'obstruction. Cette distribution est généralement aléatoire dans le cours d'eau (Montgomery *et al.*, 1995) ce qui engendre une irrégularité de l'espacement entre les mouilles.

Les *steps* représentent l'élément de rugosité prédominant dans la morphologie des cours d'eau en *step-pool*. La rugosité relative ( $D/d$ ) est supérieure à 1 dans les *steps* et inférieure à 1 dans les mouilles (Halwas et Church, 2002). Les *steps* sont généralement perpendiculaires au cours d'eau mais quelques *steps* peuvent être orientés de manière oblique par rapport à l'écoulement (Grant *et al.*, 1990; Montgomery et Buffington, 1997; Chartrand et Whitting, 2000). Wilcox et Wohl (2006) ont constaté des accélérations et décélérations locales de l'écoulement le long d'un chenal en *step-pool* et Lamarre (2006) a noté que les changements de vitesse sont davantage prononcés dans les mouilles que dans les *steps*.

Trois seuils de transport de sédiments ont été identifiés dans les systèmes en *step-pool*. Tout d'abord, les particules très grossières formant les *steps* sont mobiles lors d'évènements hydrologiques très peu fréquents ou de fortes magnitudes (extrêmes) (Whittaker, 1987; Grant *et al.*, 1990; Montgomery et Buffington, 1997). Deuxièmement, la mobilisation des particules moyennes formant les *step-pools* requiert un évènement important d'un intervalle de récurrence variant entre 1 à 25 années selon le cours d'eau (Wohl, 2000). Pendant ce type d'évènement, la morphologie sera modifiée et rétablie à la fin de la décrue de l'hydrogramme (Whittaker, 1987; Montgomery et Buffington, 1997). Finalement, les particules fines déposées dans les pools se mobilisent lors d'évènements de crues fréquents (Whittaker, 1987; Grant *et al.*, 1990; Montgomery et Buffington, 1997).

### 1.3.2. Cascade

Le chenal en cascade est caractérisé par un écoulement sur-critique (nombre de Froude  $> 1$ ) ou de culbutage constant sur et autour des particules grossières et une désorganisation longitudinale et latérale des particules du lit (Montgomery et Buffington, 1997). L'écoulement est sur-critique sur plus de 50% de la superficie du cours d'eau (Grant *et al.*, 1990). La Figure 1.9 schématise le profil longitudinal et en plan d'un tronçon en cascade. Selon Grant *et al.* (1990), la cascade se forme à un gradient de pente supérieur à 22% tandis que Church et Zimmermann (2007) ont avancé un gradient de pente supérieur à 20%. La cascade peut être formée de gros blocs ou de roche en place construisant les *steps* qui sont peu marqués et proéminents (Church et Zimmermann, 2007). Entre ces *steps* on retrouve les mouilles qui sont moins de une fois la largeur du chenal en longueur et où il y a accumulation de petites particules (Halwas et Church, 2002). La distance entre les mouilles est elle aussi moins de une fois la largeur du chenal. On retrouve une densité plus importante de grosses particules immobiles dans les cascades que dans les *step-pools*. Il existe deux seuils de transport de sédiments dans les cours d'eau de cascade. Durant les écoulements à intervalle de récurrence modéré, le matériel du lit est rapidement transporté vers la forme du lit la plus stable qui présente un seuil de mobilité plus élevé correspondant à des événements peu fréquents (Montgomery et Buffington, 1997). La cascade est généralement retrouvée en tête de bassin. Elle est souvent confinée entre des parois rocheuses avec une plaine d'inondation petite ou inexistante (Buffington *et al.*, 2002). La cascade est considérée comme un chenal de puissance élevée directement reliée aux versants qui l'entourent.

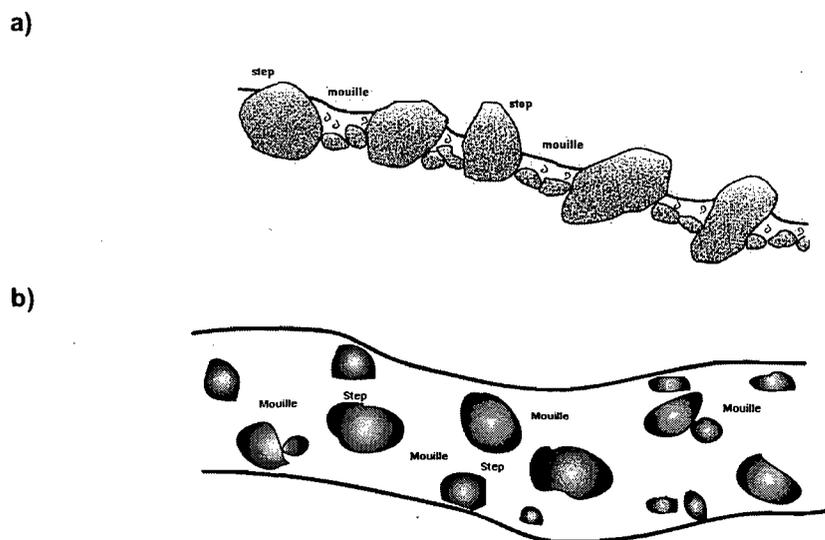


Figure 1.9. Schéma d'une unité en cascade (d'après Montgomery et Buffington, 1997) : a) vue en coupe et b) vue en plan

Dans la littérature, on retrouve plusieurs incertitudes et questions concernant ces deux morphologies (Church et Zimmermann, 2007). Est-ce que la morphologie *step-pool* se formant à un gradient de pente inférieur à 7% est différente de celle se formant à un gradient de pente supérieur à 7%? Qu'est-ce qui entraîne la formation de la morphologie en cascade à des gradients de pente supérieurs à 20%? Existe-t-il une limite de pente pour la formation des *step-pools* ou des cascades? La section suivante abordera les techniques utilisées jusqu'à aujourd'hui afin d'identifier les éléments morphologiques du lit. Nous constaterons que les interrogations et contradictions reliées à la morphologie et à la géométrie citées précédemment nuisent à l'identification des éléments morphologiques du lit et entraînent plusieurs contraintes.

#### 1.4. Identification des éléments morphologiques du lit

L'organisation d'un cours d'eau réfère à l'arrangement spatial du lit ou aux patrons d'unités morphologiques du cours d'eau. Elle se décrit par la variabilité dans la

topographie du lit et le degré de régularité de l'espacement des formes à différentes échelles. Les patrons peuvent être aléatoires, réguliers ou imbriqués (Madej, 2001). Le degré d'organisation d'un cours d'eau se mesure par l'espacement, la fréquence, la variabilité et la régularité des structures tels qu'identifiées par différentes techniques d'autocorrélation spatiale (Madej, 1999, 2001). Afin de quantifier les patrons longitudinaux du lit et la présence des mouilles plusieurs techniques ont été développées durant les années 80. Les méthodes d'analyse des formes du lit utilisées jusqu'à aujourd'hui se divisent selon leur caractère objectif ou subjectif. Chacune de ces techniques présente des lacunes et des avantages tout dépendant du sujet de l'étude et de l'échelle d'analyse pour l'identification des formes du lit. Les techniques peuvent aussi se diviser selon la nature des données de départ utilisées. Ainsi, on retrouve les techniques : 1) utilisant le profil longitudinal du cours d'eau, 2) se réalisant directement sur le terrain et 3) utilisant un DEM extrait de photographie aérienne ou d'un relevé topographique. Les prochaines sections aborderont ces différentes techniques selon leurs données de départ.

#### **1.4.1. À partir du profil longitudinal**

Le profil longitudinal du talweg, défini par la présence d'oscillations régulières de la topographie du lit dues à l'alternance de *steps* et de mouilles, est souvent utilisé pour identifier les structures du lit. Le profil longitudinal du talweg est obtenu à partir d'un relevé topographique sur le terrain. La distance entre les points de levé varie d'une recherche à l'autre. Cette distance dépend des objectifs du relevé topographique. Si l'étude tente d'identifier les structures morphologiques telles que les *steps* et les mouilles, la distance entre les points sera plus grande que pour une étude où les patrons à plus petites échelles tels que les amas de galets ou les roches d'ancrage sont importants. La distance entre les points de levé dépend aussi de la longueur du profil longitudinal et de la largeur du chenal qui contrôlent l'espacement des éléments morphologiques (Wohl *et al.*, 1993, Chin, 2002, Madej, 1999, 2001, Thompson *et al.*, 2006).

Richards (1976) a introduit la première technique objective d'identification des seuil-mouilles, le *zero crossing* établi à partir d'une technique de régression appliquée au profil longitudinal du lit à un intervalle régulier. L'équation de régression vise à enlever l'effet de la pente. Selon Richards (1976) une équation linéaire est suffisante pour les courtes sections tandis qu'une équation polynomiale de second ou troisième ordre s'avère nécessaire pour les sections plus longues (au-delà du kilomètre). Les mouilles sont identifiées par les résidus négatifs tandis que les seuils correspondent aux résidus positifs. Milne (1982) et O'Neill et Abrahams (1984) ont montré que cette technique ne permet pas d'identifier les ondulations plus grandes ou plus petites que l'échelle des seuil-mouilles. La Figure 1.10 présente les résultats obtenus par Milne (1982). Sur ce diagramme les lettres LU indiquent une ondulation de grande échelle qui a été identifiée comme une seule unité, un seuil, alors qu'elle représente trois unités soit un seuil, une mouille et un autre seuil. Les lettres SU indiquent des ondulations de courtes échelles qui ont été identifiées comme des formes individuelles alors qu'elles n'en sont pas. En tenant compte des erreurs engendrées par la technique et en modifiant celles-ci, la méthode n'est plus complètement objective puisque le chercheur peut décider d'ignorer des résultats obtenus par la technique (O'Neil et Abrahams, 1984). Wooldridge et Hickin (2002) ont utilisé cette technique afin d'identifier les *step-pools* d'une section de 248 mètres. Il s'est avéré que la technique a identifié plusieurs roches isolées ne formant pas une unité *step-pool* et n'a pas réussi à différencier les cascades des *steps* ce qui laisse croire que la technique n'est pas nécessairement convenable pour un cours d'eau de fort gradient de pente.

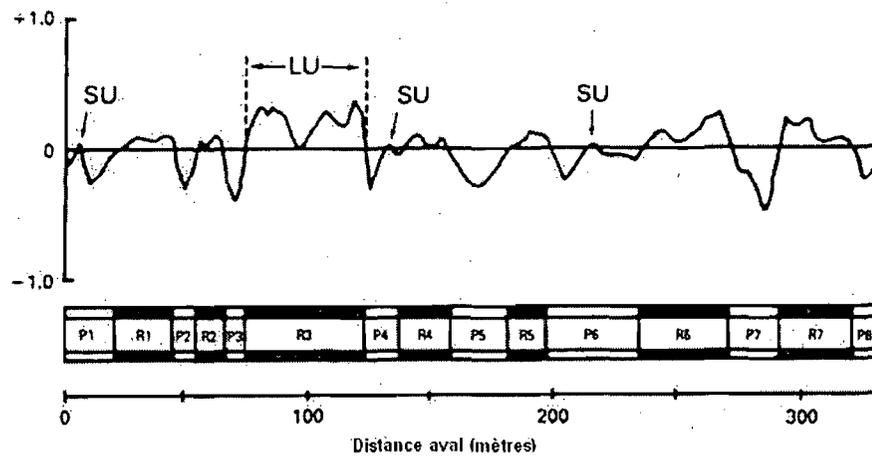


Figure 1.10 Résidus d'élévation au-dessus du lit obtenus par la technique du *zero crossing* pour Kingledoors Bars (d'après Milne, 1982). LU et SU indiquent les ondulations de large échelle et de petite échelle qui ont été identifiées comme forme individuelle du lit par la technique.

O'Neill et Abrahams (1984) ont employé la technique dite de différence des formes du lit comme méthode d'identification des patrons longitudinaux. Cette technique utilise les premières étapes de la technique du *zero crossing* soit un profil longitudinal du lit fait à un intervalle régulier, une droite de régression et un profil de résidus négatifs et positifs. À partir des changements d'élévations (+/-E), on calcule un cumulatif des changements d'élévation ( $\Sigma E_i$ ) le long du profil (Fig. 1.11) et on établit un barème pour choisir un seuil de tolérance T. Le seuil de tolérance T est la valeur minimale absolue obtenue à partir de la sommation des cumuls des changements d'élévation entre deux formes du lit. Le seuil de tolérance T permet de produire différents profils du lit et ainsi d'identifier le profil qui reproduit le mieux les ondulations majeures du lit et qui évite d'identifier les ondulations mineures (roches isolées).

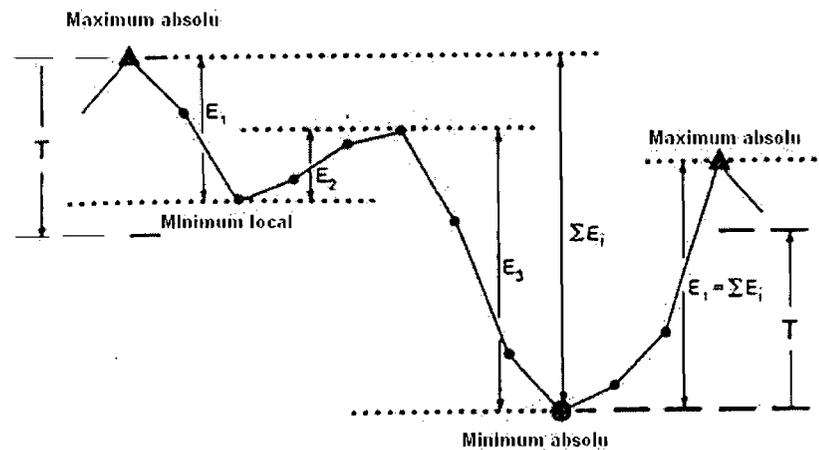


Figure 1.11 Technique pour identifier les formes du lit selon les maximums et minimums absolus en utilisant les changements d'élévation  $E_i$  (d'après O'Neill et Abrahams, 1984).

O'Neill et Abrahams (1984) ont comparé leurs résultats en utilisant la technique de différence des formes du lit et la technique du *zero crossing* afin de montrer que la première méthode est plus efficace. En utilisant cette technique pour un cours d'eau en *step-pool*, Wooldridge et Hickin (2002) ont conclu qu'elle n'était pas complètement objective car la sélection d'une valeur de  $T$  appropriée demande de connaître la morphologie du lit a priori et ainsi de choisir la valeur de  $T$  selon des observations faites sur le terrain.

Madej (1999) et Thompson *et al.* (2006) ont appliqué des analyses spatiales d'autocorrélation (SAC) pour identifier les morphologies générales du cours d'eau et la distance entre les éléments morphologiques. Madej (1999) a utilisé les bris de pente comme critère de point pour ses profils longitudinaux. Ainsi, sept profils longitudinaux d'une longueur variant entre 400 à 2500 mètres ont été exécutés sur sept segments de la rivière Redwood (US). Thompson *et al.* (2006) ont aussi réalisé une étude similaire à partir d'un relevé systématique du profil longitudinal sur 42 segments de 28 cours d'eau. Les points de levé ont été pris à tous les 2 mètres lorsque le chenal était plus large que cinq mètres et à tous les mètres lorsque le chenal avait moins de cinq mètres de large. La longueur totale des relevés varie de 50 à 230 mètres soit une longueur de 10 à 30 fois la largeur du

chenal. Les auteurs ont décidé de la distance de relevé entre les points en tenant compte de la distance entre les unités de chenal qui est moins de quatre fois la largeur du chenal pour un cours d'eau montagneux, ce qui implique qu'ils ont obtenu de 3 à 11 points par unité de largeur de chenal. À partir des points topographiques une interpolation est appliquée afin d'obtenir un profil continu. Ainsi, les points qui se suivent le long du talweg et qui présentent une corrélation spatiale de leur élévation sont classés en unité de chenal. Une SAC significative et positive d'éléments indique la distance de récurrence d'éléments avec des élévations similaires (ex : mouille à mouille ou *step* à *step*) (Legendre et Fortin, 1989; Madej, 1999; Thompson *et al.*, 2006). Ces analyses permettent d'identifier objectivement l'occurrence, la longueur et l'espacement entre les unités du chenal.

Milzow (2004) a pour sa part extrait, à l'aide d'un programme MatLab, les *steps* du cours d'eau Vogelbach. Ce cours d'eau présente une pente forte et un mélange de *step-pools* et de cascades. Le profil longitudinal du talweg a été mesuré sur 1575 mètres. L'algorithme utilise une pente critique  $\beta_c$  et un critère de pente  $\beta > \beta_c$  pour identifier les *steps*. La pente critique  $\beta_c$  est estimée à partir de la distribution des segments de pente le long du profil longitudinal total. Dans leur étude, la pente critique estimée est de 0.45 et à partir de cette pente, 324 *steps* ont été identifiés. Cette technique ressemble à celle d'O'Neil et Abrahams (1984) mais elle est complètement objective et reproductible. Cette méthode demande un espacement régulier entre les points de levé et elle doit être appliquée à un cours d'eau à gradient de pente élevée où les larges mouilles ne sont pas les éléments morphologiques dominants. Church et Zimmermann (2007) ont testé de manière préliminaire la technique de Milzow (2004) et concluent qu'elle offre une bonne performance. Dans ce mémoire, la technique de Milzow (2004) sera appelée la technique de la pente critique.

#### **1.4.2. À partir du terrain**

L'identification visuelle consiste à discerner directement sur le terrain le type de morphologie présent dans le cours d'eau. Cette technique n'implique pas de

données de départ. Wooldridge et Hickin (2002) ont comparé la technique de différence des formes du lit, le *zero crossing* ainsi que l'identification visuelle afin d'établir l'efficacité de chacune et de comparer les techniques objectives et subjectives. Ils ont utilisé la classification de Montgomery et Buffington (1997) comme barème morphologique pour la technique d'identification visuelle sur le terrain. Parmi les trois méthodes, l'identification visuelle s'est avérée la plus efficace et celle qui donne le plus d'informations sur la géométrie des formes dans les cours d'eau de montagne (Wooldridge et Hickin, 2002). Cependant, l'identification visuelle est une technique subjective qui doit être pratiquée dans des conditions d'écoulement faible. De plus, les problèmes entourant les définitions des paramètres géométriques et des types morphologiques peuvent nuire à une bonne identification. Suite à son étude sur un tronçon du Torlesse Creek, Hayward (1980) a conclu que les différents observateurs n'identifiaient pas les mêmes limites des formes du lit en raison des différentes définitions et perceptions de chacun. Ainsi, cette technique comporte plusieurs lacunes telles qu'une forte variabilité selon l'opérateur, un manque de réplication et une dépendance à l'écoulement (Madej, 1999). Il est difficile, voir impossible, d'identifier tous les éléments morphologiques d'un cours d'eau de montagne lorsque l'écoulement est moyen ou fort. Il a été montré que, dans ces conditions, l'observateur dénombreait davantage de mouilles que lors d'un écoulement faible (Halwas et Church, 2002). De plus, étant donné que l'écoulement varie dans le temps (saisons, précipitations), il est préférable de ne pas se baser sur l'écoulement pour identifier la morphologie d'un tronçon.

### **1.4.3. À partir d'un DEM**

L'extraction de profils longitudinaux peut se faire à partir d'un modèle d'élévation numérique obtenue par carte topographique ce qui permet aux chercheurs d'éviter la collecte de données sur le terrain. Or, cette technique n'est pas encore très répandue car elle nécessite l'acquisition et la manipulation de données géoréférencées dont l'échelle est parfois inadéquate. Cette approche, depuis les dernières années, connaît cependant un essor important. La Figure 1.12 montre

les travaux de Lin et Oguchi (2006) exécutés à partir d'un DEM de un mètre de résolution sur un bassin versant des Alpes Japonaises. Ceux-ci ont extrait des coupes transversales sur 54 cours d'eau. Sur la figure, on constate que les coupes transversales permettent de voir les variations du cours d'eau et d'identifier les bris de pente.

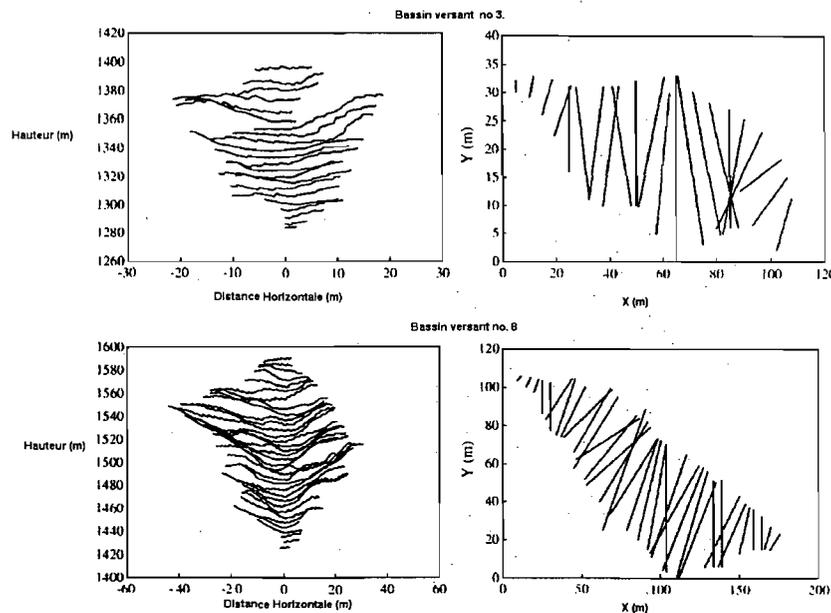


Figure 1.12 Exemples de profils transversaux (gauche) avec les variations du lit et cartes de localisation des profils (droite) (d'après Lin et Oguchi, 2006).

Le modèle d'élévation numérique peut aussi être construit à partir de coupes transversales exécutées sur le terrain et d'une interpolation entre les points. Plusieurs chercheurs (Madej, 2001, MacFarlane et Wohl, 2003, Milzow, 2004) ont complété leur relevé topographique avec des coupes transversales. Les coupes transversales permettent de calculer la largeur des *steps* et des mouilles, la largeur du cours d'eau et ses variations ainsi que le rayon hydraulique. Les coupes permettent aussi de décrire la géométrie du cours d'eau (MacFarlane et Wohl, 2003) et d'identifier les *roches d'ancrage* (Lamarre, 2006). La technique du DEM est nécessaire lorsque l'on veut une image 3D du cours d'eau ce qui est un avantage considérable. A notre connaissance, l'application des techniques d'identification morphologique à des DEM n'a pas encore été exploitée à fond.

Comme on peut le constater, les différentes techniques d'identification des éléments morphologiques du lit présentent des avantages et des inconvénients. Le Tableau 1.1 résume les avantages et inconvénients reliés aux trois catégories de données de départ. Malgré les résultats obtenus par Wooldridge et Hickin (2002), l'identification visuelle semble être la technique qui présente le plus d'inconvénients. Toutefois, il est difficile de dire quelle technique est la meilleure car elles n'ont pas été utilisées sur des cours d'eau ayant une pente et des caractéristiques similaires. Le Tableau 1.2 présente les principales études sur la morphologie des systèmes de *step-pool* et de cascade. Le tableau indique les principales caractéristiques dont on doit tenir compte pour développer une stratégie d'échantillonnage soit : la pente, la longueur des sections, la largeur du chenal, les techniques utilisées, les points de relevés et l'état du cours d'eau. On constate que les pentes varient beaucoup d'une étude à l'autre et que dans certains cas elles sont inférieures à 4% (la limite inférieure de pente pour un système *step-pool*). Le tableau montre aussi que les protocoles de recherche sont rarement les mêmes d'une étude à l'autre et que parfois on ne connaît pas toutes les informations ou démarches que le chercheur a utilisées dans sa recherche. Montgomery et Buffington (1997), Halwas et Church (2002) et Thompson *et al.* (2006) utilisent tous un protocole qui tient compte de la largeur du cours d'eau pour établir la longueur des sections. De plus, Thompson *et al.* (2006) utilisent aussi la distance entre les mouilles (une à quatre fois la largeur du chenal dans un milieu de pente élevée) pour établir la distance entre les points. Ainsi, une stratégie d'échantillonnage tenant compte de la largeur du chenal pourrait permettre une uniformisation entre les études. Néanmoins, les différents problèmes découlant des techniques sont peut-être dus aussi à la complexité même des systèmes *step-pool* et cascade. La section suivante abordera la dynamique complexe de ces systèmes.

	Avantages	Inconvénients
Profil Longitudinal <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Zero crossing</i></li> <li>- Différence des formes du lit</li> <li>- SAC</li> <li>- Pente critique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Objectivité</li> <li>- Estimation facile des variables géométriques (L, H, profondeur mouille)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inadéquat pour pentes abruptes</li> <li>- Erreur sur identification du talweg</li> <li>- Problèmes lorsque roches d'ancrage isolés ou complexité du lit trop élevée (Wooldridge et Hickin, 2002)</li> </ul>
À partir du terrain <ul style="list-style-type: none"> <li>- Identification visuelle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aucune manipulation d'instruments ou de données</li> <li>- Facilité d'exécution</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Subjectivité</li> <li>- Peu reproductible</li> <li>- Restriction à un bas niveau d'eau</li> <li>- Variabilité des résultats entre les observateurs (Hayward, 1980)</li> <li>- Définitions non-uniformisées (Hayward, 1980, Nickolotsky et Pavlowsky, 2007)</li> </ul>
DEM <ul style="list-style-type: none"> <li>- Carte topographique</li> <li>- Coupes transversales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Objectivité</li> <li>- Beaucoup d'informations obtenues ex :               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vision 3D</li> <li>- Permet calcul L, H, W, S, profondeur mouille</li> </ul> </li> <li>- Minimisation de l'erreur sur l'identification du talweg</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Manipulation de plusieurs données</li> <li>- Exécution longue</li> </ul>

Tableau 1.1 Avantages et inconvénients des méthodes d'identification des formes du lit classées selon le type de données de départ.

	Milieu	Nombre de sections	Pente (%)	Longueur Section	Largeur (m)	Technique et protocole	L / largeur	Nombre d'unités <i>step-pool</i>	État
Montgomery et Buffington (1997)	Western Washington et coastal Oregon	4 bassins de drainage	4 - 14	10 à 20 w		Identification visuelle et relevé topographique?			
Chin (1998, 1999, 2002)	Santa Monica Mountains, southern California	13 sections sur 2 cours d'eau	1,14 - 1.5	125 à 273 m	2,5 - 6.6	Profil longitudinal, distance entre les points : inconnue (1999), 0,5 m (2002)	Moyenne : 1,55 si n = 464 et 1,9 si n = 137	27 à 48 par section	Unité <i>step-pool</i> bien développée
Chartrand et Whiting (2000)	Central et west-central Idaho	30 sections sur 11 cours d'eau	1,5 - 13,4	L ≥ 3 unités de <i>step-pool</i>	1,7 - 10,9	Identification visuelle et profil longitudinal : point à la crête du <i>step</i> et ± 3 points dans la mouille	0,6 à 1	46	
Lenzi (2001)	Rio Cordon, Italie		5 - 20	L ≥ 3 unités de <i>step-pool</i>	4,76 - 8,19	Profil longitudinal du talweg; point à la crête du <i>step</i> et ± 4 points dans la mouille	0,81 à 1,0	8 à 11	Crue extrême en 1994 a remanié le cours d'eau
Madej (2001)	Coast Ranges of California	4 sections de cours d'eau différents	4 - 52		1 - 80	Profil longitudinal du talweg, distance entre les points diffère entre les sections			Apport de sédiments, <i>step-pools</i> instables
Wooldridge et Hickin (2002)	Southwestern of BC	2	6 - 7,5	248 m	7 - 15	Profil longitudinal du talweg points à tous les 0,6 m et identification visuelle	0,59 à 0,75		
Halwas et Church (2002)	Vancouver Island Mountains	17 sections de 6 cours d'eau	10 - 54	30 à 40 m par w	1,3 - 4,9	Profil longitudinal + identification visuelle	3 à 4	8 à 12 par sections	

Milzow (2004)	Vogelbach, Alpes Suisse	1	10 - 17	1575		Profil longitudinal du talweg; points aux ruptures de pente + 22 coupes transversales		324	
Thompson <i>et al.</i> (2006)	Southeastern Australia	42 sections de 28 . cours d'eau	3 - 17	50 à 230 m soit 10-30 w	6 - 13	Profil longitudinal du talweg; points à tous les 2 m quand w > 5m et tous les 1 m quand < 5 m; pour avoir de 3 à 11 points par 1 w; tient compte de la distance entre les formes du lit	1 à 3	3 par section	
Nickolotsky et Pavlovsky (2007)	Northwest Arkansas	11 sections de 4 cours d'eau	4,6 – 30,2	44 à 164 m	1,17 – 11,35	Identification visuelle pour choix des sections; Relevé topographique : 5 points sur une coupe transversale à la crête du step et au point le plus profond de la mouille et 1 point du talweg à la base du step + quelques points le long du profil longitudinal	Moyenne : 1,1	7 à 15 par section	Aucune influence anthropique

Tableau 1.2 Principales études concernant la morphologie des cours d'eau d'unités *step-pool* et cascade et recension des paramètres importants dans un protocole de recherche (w : largeur du cours d'eau).

## 1.5. Complexité

Les step-pools et les cascades présentent plusieurs éléments de géométrie similaires. Dans cette section, les difficultés à établir une théorie de la formation des *steps* seront abordées à partir des deux théories principales soit la résistance maximale et le modèle des antidunes. Par la suite, la stabilité des step-pools et les différentes notions concernant la destruction des *steps* seront examinées.

### 1.5.1. Formation et stabilité des *steps*

Le développement ou la formation des différentes morphologies des cours d'eau de montagne implique l'interaction entre l'écoulement, la charge du lit, la taille des particules et les éléments morphologiques du lit. Il existe plusieurs théories traitant de la formation des *steps* dans les cours d'eau de montagne. Toutefois, les processus de formation restent controversés. Ces différentes positions sur le sujet s'expliquent par la difficulté d'observer les processus de formation sur le terrain en raison de la faible fréquence des événements, des aspects dangereux et risqués entourant la collecte des données et de la difficulté d'isoler les effets individuels de chaque variable. Ainsi, la plupart des expériences ont été menées en laboratoire afin de pouvoir faire des observations directes. Deux théories principales ont été proposées pour expliquer la formation des step-pools. La première théorie s'articule autour de la résistance maximale. Dans des conditions extrêmes, les fortes crues sont capables de transporter les plus grosses particules afin de créer une zone de congestion ce qui provoque une augmentation locale de la résistance à l'écoulement et par la suite, une accumulation de particules plus petites (Church et Jones, 1982; Whittaker et Jaeggi, 1982; Abrahams *et al.*, 1995; Lenzi, 2001). Abrahams *et al.* (1995) ont établi une relation décrivant une géométrie idéale d'une unité *step-pool* où la résistance à l'écoulement est maximisée et l'espacement des éléments morphologiques est régulière. Cette relation s'inscrit dans la théorie de la résistance maximale et elle est décrite par l'équation suivante :

$$H/L = cS$$

où  $H$  = la hauteur du step,  $L$  = la longueur d'onde,  $S$  = la pente moyenne du lit ( $\sin\theta$ ) et  $c$  = un coefficient prenant des valeurs entre 1 et 2. La moyenne de la pente des *steps* est un peu plus élevée que la pente du chenal avec  $1S \leq H/L \leq 2S$ . Dans un contexte évolutif impliquant la création des chenaux, cette géométrie idéalisée sera atteinte durant les dernières phases d'évolution des *steps* une fois les mouilles en place (Madej, 2001). L'équation  $H/L = cS$  a été testée sur le Rio Cordon en Italie avant, pendant et après un événement extrême (Lenzi, 2001). Avant la crue,  $H/L$  était égal à  $1.30S$ . Immédiatement après l'événement, le coefficient avait diminué à  $0,79S$  et quatre ans plus tard il était revenu à  $1.33S$ . La similarité entre la valeur du coefficient avant la crue et après quatre ans indique selon Lenzi (2001) que le cours d'eau tend à revenir à un état stable qui caractérisait la période d'avant la crue.

La Figure 1.13 présente les résultats d'Abrahams *et al.* (1995) ainsi que de plusieurs autres chercheurs sur la relation entre la pente du chenal et  $H/L$ . Dans plusieurs cas les valeurs de  $H/L$  se retrouvent hors des limites définies par la théorie, indiquant que l'arrangement des *steps* est le résultat de plusieurs paramètres autres que la résistance à l'écoulement. Chin (1994, 1998) et Chartrand et Whiting (2000) ont montré que l'escarpement ( $c$ ) peut être supérieur à ce que définit la théorie d'Abrahams *et al.* (1995).

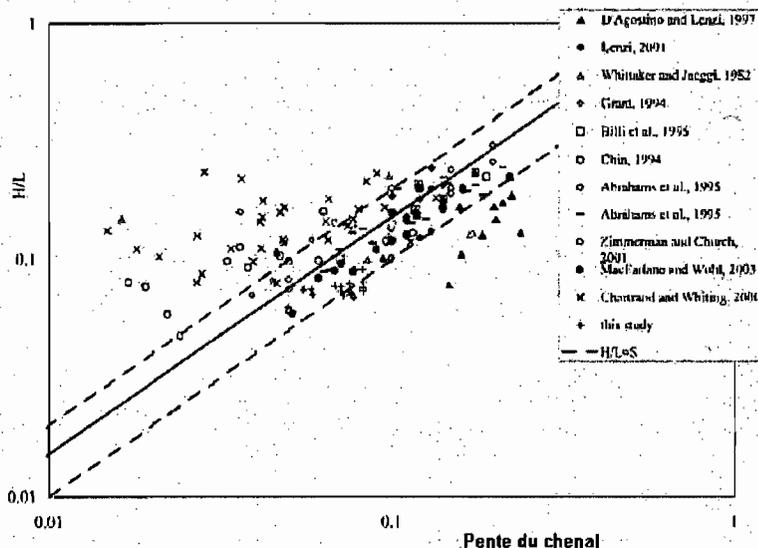


Figure 1.13 La résistance maximale proposée par Abrahams *et al.* (1995) à partir de données sur la hauteur (H) et l'espacement entre les *steps* (L) mesurées en laboratoire et en milieu naturel (d'après Carrant et Wilcock, 2005).

La deuxième théorie, le modèle des antidunes, (Ashida *et al.*, 1976; Grant et Mizuyama, 1991; Rosport, 1994) propose que la formation des *step-pools* requiert un lit hétérogène, de forts débits et un écoulement près du seuil critique ou sur-critique. Les particules grossières se déposent sous la crête des vagues stationnaires (*standing waves*) et trappent les petites particules pour former des *steps* de particules imbriquées. Le dépôt des particules grossières se fait de manière régulière sous la surface de l'eau des vagues créant une distance régulière entre les *steps*. La Figure 1.14 représente le diagramme de stabilité ou de phase de la théorie de l'antidune établie par Kennedy (1963) en milieux sablonneux et reprise par plusieurs chercheurs. Le champ est déterminé par un minimum et un maximum du nombre de Froude et par le ratio entre la profondeur et la longueur d'onde. Ainsi, si les *steps* sont analogues aux antidunes l'espacement devrait correspondre aux limites définies par le champ de stabilité. Sur ce diagramme on constate que les résultats de Chin (1994) et de Chartrand et Whiting (2000) se situent entre les maximums et minimums du nombre de Froude requis pour la stabilité de l'antidune tandis que la majorité des autres mesures se

situe en-dessous de la limite minimale. Ces résultats portent à croire que la théorie de l'antidune ne s'applique peut-être pas tout à fait à la morphologie des *step-pools* en milieu naturel.

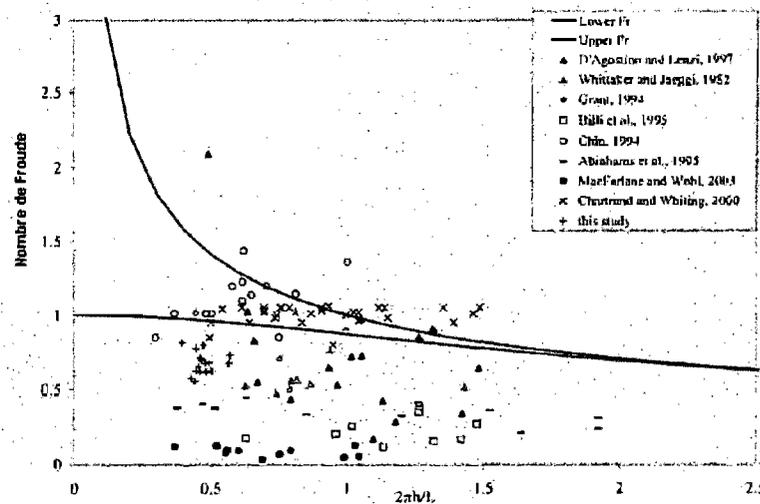


Figure 1.14 Le diagramme de stabilité de l'antidune proposé par Kennedy (1963). Les résultats en milieu naturel et en laboratoire des chenaux formés de *step-pool* de plusieurs chercheurs sont reproduits sur le graphique. L'aire entre les courbes représente la zone stable de formation des antidunes (d'après Curran et Wilcock, 2005).

De plus, Wohl et Grodek (1994), Abrahams *et al.* (1995) et Grant (1997) ont émis certains doutes quant au modèle de l'antidune pour expliquer la formation des *steps*, compte tenu de la rareté des écoulements sur-critiques aussi dits torrentiels dans les *step-pools* (Lamarre, 2006) et des écoulements forts, capables de submerger complètement les particules grossières des *step-pools*.

D'autres observations en laboratoire et sur le terrain ont permis de nuancer les mécanismes de développement des chenaux en *step-pool*. Curran et Wilcock (2005) et Curran (2007) ont réalisé différentes expériences en laboratoire afin de comprendre les processus de formation des *steps*. Ils ont identifié trois mécanismes de formation tels que la congestion d'obstacles ou de blocs, le surcreusement autour d'une particule du lit qui formera le *step* et la formation périodique d'une ondulation faible et symétrique dite de dune. Les mécanismes ont

été identifiés avec une fréquence de formation de 60%, 24% et 16% respectivement. L'espacement entre les *steps* ou les roches d'ancrage formant le step suit une distribution de Poisson et l'endroit où se dépose la particule formant le step est aléatoire à 90% (Fig. 1.15). Ces résultats concordent avec ceux de Zimmermann et Church (2001) et de Lamarre et Roy (2001) qui ont noté un espacement aléatoire des *steps* dans le chenal. Madej (2001) a montré que la création des formes du lit dépend du nombre de crues organisatrices ( $Q > Q_{cr}$ ), de la taille des particules et de la présence d'éléments contraignants. La Figure 1.16 représente le modèle conceptuel de sa théorie. Ces données se basent sur des observations obtenues entre 1978 et 1998 sur un cours d'eau excavé en 1978. Deux crues modérées d'intervalle de récurrence entre 3 et 5 ans en 1983 et 1986 ainsi qu'un événement d'une récurrence de 12 ans en 1997 ont permis la formation de plusieurs *steps* dont 38% sont formés par des débris ligneux et 62% par des blocs. Les crues régulières et l'écoulement faible permettront un creusement des mouilles et une imbrication des particules du lit engendrant une augmentation de la résistance à l'écoulement. Ainsi, l'intervalle de temps entre les fortes crues permettra au cours d'eau de se restructurer et peut-être d'atteindre une stabilité plus grande. Les études portant sur le développement des *step-pools* à partir des lits plats dans des chenaux artificiels ont montré une tendance à l'organisation sur une période de 10 à 20 ans suite à l'ajout de sédiments (Madej, 2001; Wooldridge et Hickin, 2002). Ces expériences ont nuancé les expériences faites en laboratoire où la formation de la totalité des *step-pools* se faisait de manière spontanée (Lee et Ferguson, 2002; Curran et Wilcock, 2005) et non progressive. L'exemple de Baxter Creek en Californie présente une belle opportunité pour comprendre les processus de formation des *step-pools* en milieu semi-naturel (Chin et Phillips, 2007). En 1996, cinq *steps* avaient été aménagés sur le cours d'eau d'une longueur de 70 m. En 2005, le cours d'eau s'était réorganisé graduellement en une séquence de 20 *step-pools* mais la stabilité n'était pas encore atteinte.

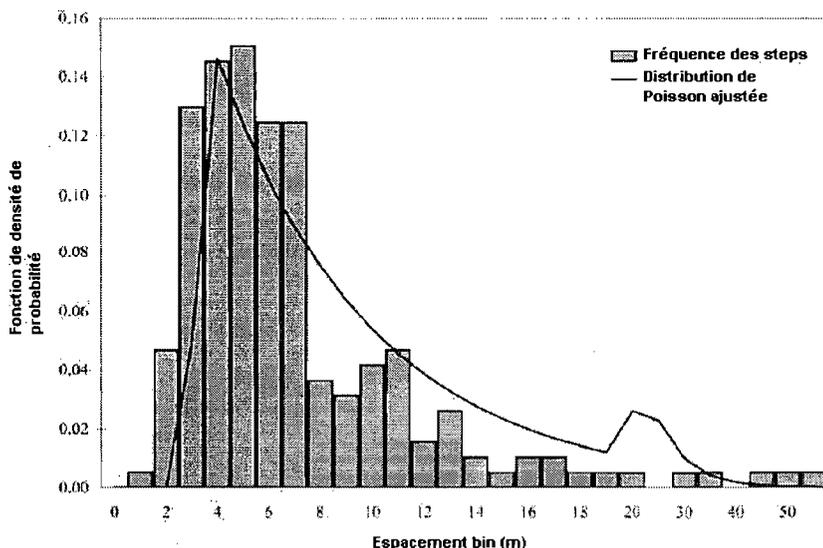


Figure 1.15 Histogramme de l'espacement des *steps* rapporté par Whittaker et Jaeggi (1982), Whittaker (1987), Grant *et al.* (1990), Chin (1994), Abrahams *et al.* (1995), Billi *et al.* (1995), Rosport et Dittrich (1995), D'Agostino et Lenzi (1997), Chartrand et Whiting (2000), Zimmermann et Church (2001) et MacFarlane et Wohl (2003). Une distribution de Poisson modifiée est ajustée aux données (d'après Curran et Wilcock, 2005).

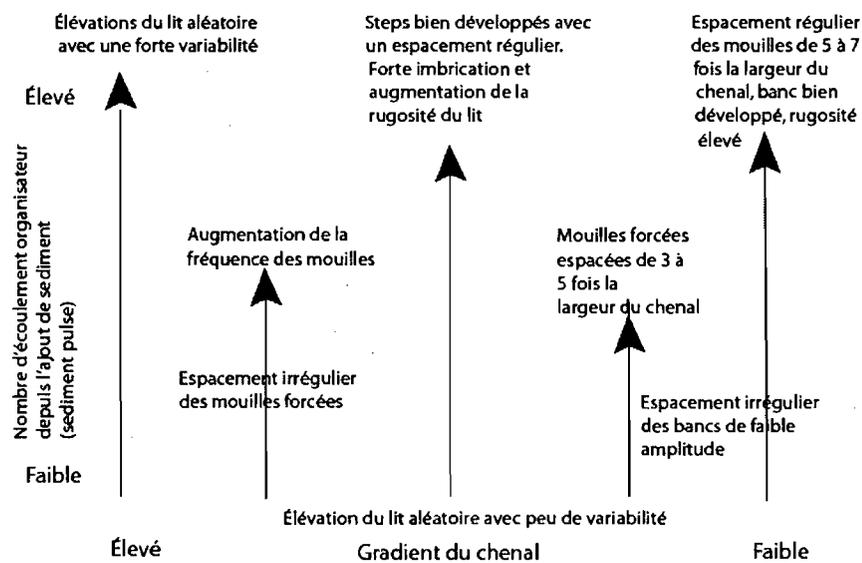


Figure 1.16 Modèle conceptuel du développement de la structure du lit du chenal et de l'organisation à la suite d'un ajout de sédiments (sediment pulse) dans les rivières à lit de gravier. Le schéma montre les trajectoires estimées des changements de la morphologie du chenal à travers une gamme de pente (d'après Madej 1999).

### 1.5.3. Destruction des *steps*

La destruction des *steps* se fait par différents processus (Faustini et Jones, 2003). La façon la plus fréquente se produit à cause de l'affouillement en aval du *step* qui engendre la chute du *keystone* ou l'effondrement des particules imbriquées qui forment le *step*. La chute du *keystone* se produit lorsque le creusement de la mouille emporte les particules qui le supportaient. La chute se fait du haut du *keystone* vers l'aval (Lee et Ferguson, 2002). Les travaux de Lenzi (2001) ont permis de constater que suite à la chute de la structure d'un *step*, la mouille se remplit à partir des particules qui constituaient le *step*. Dans la littérature on retrouve plusieurs travaux portant sur la taille et la forme des mouilles en aval d'un *step* afin de prédire le moment où le *step* sera déstabilisé et l'appui détruit. La popularité de ce type de recherche peut aussi être attribuée à l'importance de pouvoir prédire l'affouillement de la mouille en aval d'un barrage ou d'un ouvrage avec une chute (Church et Zimmermann, 2007). La destruction du *step* peut aussi survenir lorsqu'une grosse particule mobile s'entrechoque avec le *step* et déplace la roche d'ancrage. Cette situation se produit pour des valeurs extrêmes de débit. Le choc avec des débris ligneux peut aussi engendrer la destruction des *steps* (Ergenzinger, 1992). L'enfouissement d'un *step*, par l'apport de particules, peut aussi être interprété comme une façon de détruire les *steps* en les oblitérant (De Jong et Ergenzinger, 1992; Lenzi, 2001). Ces différentes manières de détruire un *step* sont généralement liées à une crue exceptionnelle ou à l'apport d'une forte charge de sédiments grossiers. La destruction des *steps* engendre des changements au niveau de la morphologie du chenal. Plusieurs aspects doivent être pris en compte lorsque l'on étudie ces changements tels que le matériel qui compose les bancs et le lit du chenal, l'interaction entre le matériel et les formes structurelles du chenal et l'organisation des structures du chenal (Madej, 2001).

## 1.6. Sommaire

La morphologie des systèmes *step-pool* et cascades est complexe et elle n'est pas encore bien maîtrisée malgré le fait que depuis quelques années les informations concernant la morphologie de ces systèmes soient plus abondantes. De ce fait, les recherches n'ont apporté qu'un éclairage partiel sur ces milieux et plusieurs questions restent sans réponse et ce en raison des nombreuses lacunes mentionnées précédemment. D'un côté, un problème découle du fait que les techniques, méthodes et protocoles de recherche ne sont pas uniformisés. D'un autre côté, les études ont porté sur une gamme très hétérogène de systèmes qui ont des caractéristiques et trajectoires différentes ce qui complique la comparaison des résultats. Ce dernier point est très important puisque l'état et le milieu de la rivière dicteront les relations géométriques qui sont à la base de notre compréhension des processus de formation des *step-pools*.

Tout d'abord, il serait important de définir une technique qui permet une identification claire et précise de la morphologie du lit. Deuxièmement, établir un protocole de recherche permettrait aux chercheurs d'uniformiser leurs résultats et de faciliter la comparaison de leurs études. Finalement, tenir compte de l'état dynamique (stable, instable) ou du contexte dans lequel se trouve le cours d'eau à l'étude favoriserait une meilleure compréhension des relations.

## 2. Problématique et méthodologie

### 2.1. Problématique et objectifs

Comme nous l'avons vu, l'étude de la morphologie des cours d'eau de montagne a récemment connu un essor. Plusieurs chercheurs ont distingué le cours d'eau de montagne des autres cours d'eau à partir de caractéristiques telles qu'un gradient de pente élevée, une rugosité sédimentaire élevée due à la présence de blocs ou de cailloux peu présents dans les cours d'eau à faible gradient, une turbulence de l'écoulement élevée et une morphologie variant dans l'espace à cause du contrôle géologique mais peu dans le temps à cause de la faible fréquence des crues mobilisatrices ou des coulées de sédiments. Toutefois, les études ne s'accordent pas quant à la définition des paramètres géométriques servant à la description et à la compréhension du développement des *step-pools* et des cascades. Cette confusion provoque plusieurs problèmes lors de l'identification des types morphologiques du lit. La recension de la littérature du précédent chapitre a permis d'illustrer ces problèmes et de mieux comprendre l'impact de l'absence d'uniformisation des paramètres choisis pour décrire la morphologie des cours d'eau sur les résultats des différentes études.

Lamarre (2006) a dressé un bilan des variables spécifiquement examinées à la fois en chenaux de laboratoire et dans les systèmes *step-pools* naturels. De cette synthèse exhaustive ainsi que de la revue de la littérature que nous venons de présenter, d'importantes lacunes dans nos connaissances des systèmes en *step-pool* ont été observées : 1) les difficultés associées à la mesure *in situ* ce qui conduit notamment au manque de données sur la morphologie, le transport des sédiments et l'écoulement ainsi que sur les interactions entre ces trois éléments, et 2) la très grande variabilité des contextes, notamment de la pente et de la taille des particules qui caractérisent les *step-pools* étudiés dans la littérature (Lamarre, 2006). La Figure 2.1 présente la pente et la taille des particules des *step-pools* étudiés en milieu naturel de 1960 à 2006 (Lamarre, 2006). La pente varie entre

0,05% et 60% alors que la taille des particules divisée en deux catégories varie entre 10 et 1000 mm. La variabilité de ces deux caractéristiques entre les études contribue au manque de cohérence entre les définitions des paramètres géométriques, les relations géométriques et les théories sur la formation des *step-pools* et cascades. De plus, on constate que plus du tiers des études ont été réalisées sur des pentes inférieures à 4% soit la limite inférieure de pente où se forme un système en *step-pool*. Ainsi, certains chercheurs ont tenté d'établir des relations et des théories se rapportant au système *step-pool* sur des morphologies qui ne sont pas considérés par certains comme des *step-pools*.

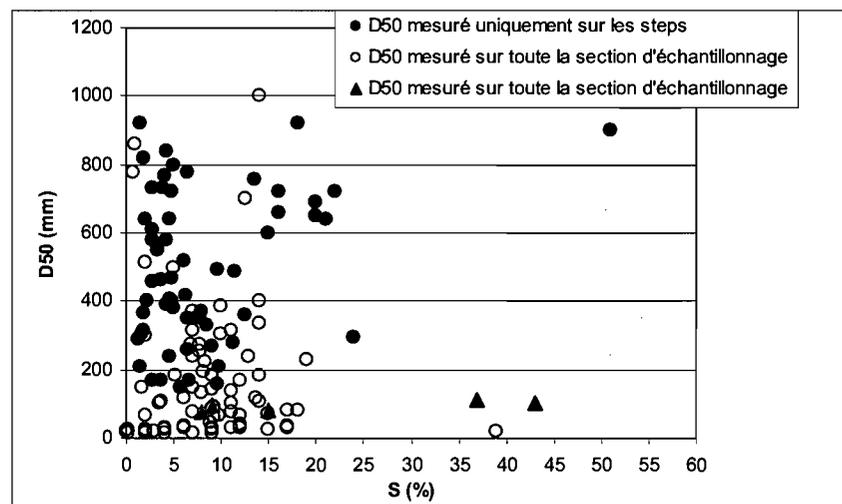


Figure 2.1 Pente et taille de particules correspondant aux *step-pools* étudiés en milieu naturel et retrouvés dans la synthèse de Lamarre (2006). Les triangles rouges représentent les *step-pools* à l'étude dans ce mémoire (adapté de Lamarre 2006).

Ce constat souligne l'incohérence qui entoure la comparaison des résultats de ces différentes études. Cette incohérence se retrouve aussi au Tableau 1.1 présenté précédemment où l'on constate un manque d'uniformisation des protocoles de recherche. Encore ici, la plupart des chercheurs comparent souvent leurs résultats avec ceux des autres études sans tenir compte des différences dans leur protocole ou dans la nature des données utilisées.

Notre recherche porte sur l'uniformisation d'un protocole qui sera appliqué à différentes sections de cours d'eau comportant des gradients de pente différents.

Nous tenterons d'élaborer une standardisation des protocoles et techniques permettant une identification objective des caractéristiques morphologiques des chenaux. Les objectifs spécifiques de cette recherche sont :

- 1) de tester l'applicabilité de quatre techniques d'identification des éléments morphologiques du lit soit l'identification visuelle, le *zero crossing*, la différence des formes du lit et la technique de la pente critique, sur différents systèmes fluviaux et de développer une cinquième technique permettant une classification des formes du lit ;
- 2) d'examiner la géométrie, les relations géométriques et l'applicabilité des différentes théories sur la périodicité des *step-pools* et ce, pour différents milieux, et
- 3) de développer des outils d'analyse intégrant l'ensemble des informations topométriques recueillies sur le terrain.

Ce dernier objectif portera sur les relations de la géométrie hydraulique et de l'ajustement du cours d'eau qui tient compte des unités morphologiques des coupes transversales le long d'un segment de cours d'eau. Les données qui décrivent les coupes transversales du chenal au niveau plein bord permettent de calculer l'aire et la symétrie de la coupe et d'exécuter une représentation 3D du cours d'eau.

## 2.2 Méthodologie

Pour atteindre ces objectifs, nous aurons recours à une expérimentation sur le terrain. Nous étudierons cinq sections de rivières présentant une diversité de pentes mais avec une variation granulométrique restreinte : les cours d'eau choisis ont des gradients de pente variant entre 8% et 43% et un  $D_{50}$  entre 75 et 110 mm. Malgré le fait que deux des cinq systèmes se trouvent dans les Alpes françaises, nos cinq systèmes sont soumis aux mêmes régimes d'écoulement à partir de la fonte des neiges entre la fin mars et mai/juin jusqu'aux périodes de précipitations souvent plus abondantes à l'automne. Finalement, on retrouve une similitude des cinq systèmes quant à l'aire des bassins versants (3.2 à 7.3 km<sup>2</sup>) et de la largeur des cours d'eau (6 à 19 m). Une même approche méthodologique d'acquisition de

données topométriques sera utilisée à chaque site afin d'appliquer les différentes techniques d'identification des formes des cours d'eau de montagne sur des données ayant les mêmes caractéristiques.

### 2.2.1 Sites d'étude

Des cinq segments de rivières étudiés, trois se situent au Québec soit les ruisseaux Spruce, Deloges et Portes de l'Enfer (Fig. 2.2). Les ruisseaux Spruce et Deloges se situent dans les Cantons de l'Est tandis que le ruisseau Portes de l'Enfer est en Gaspésie (Fig. 2.2). Les deux autres sites, soit les torrents des Tours et Armancette, sont localisés dans les Alpes françaises (Fig. 2.3). Ces sites ont été choisis afin de représenter une large gamme de pentes et de caractéristiques propres aux cours d'eau de montagne. Ainsi, les torrents des Tours et Armancette ont des pentes moyennes de 43% et 37% respectivement alors que, les ruisseaux Spruce, Portes de l'Enfer et Deloges ont des pentes moyennes respectives de 15%, 9% et 8%. Le Tableau 2.1 présente les principales caractéristiques de chacun des sites.

#### Torrent des Tours et Armancette

Les deux torrents se situent à des altitudes supérieures à 1500 mètres. Les régimes d'écoulement répondent à la fonte des neiges entre la fin mars et juin, et aux précipitations généralement plus abondantes à l'automne. Le couvert végétal est composé de petits arbrisseaux, d'arbustes et d'herbes. On ne retrouve pas de débris ligneux dans les deux cours d'eau en raison de la faible hauteur de la végétation entourant les sites. Le torrent Armancette est deux fois plus large que le torrent des Tours soit 19 mètres au niveau plein bord, il est le plus large des cinq sites. Les deux torrents présentent une morphologie composée de *step-pools* et de cascades où les *steps* sont formés de blocs rocheux. La Figure 2.4 montre les deux torrents. Les deux sections sont localisées dans une portion rectiligne des torrents. Les berges des deux torrents présentent une érosion marquée (Fig. 2.5) due au passage d'une crue de 16 m<sup>3</sup>/s (Électricité De France) et d'une coulée de débris dans le torrent des Tours à l'été 2005. Cette crue a modifié les formes du lit

et a rendu le lit très instable. La plupart des roches d'ancrage ont été dénudées par l'action d'un mécanisme de surcreusement ou d'exhumation. Toutefois, l'impact de la crue sur les structures du lit du torrent Armancette est moindre que sur le torrent des Tours. On retrouve une organisation des formes du lit visible à l'œil nu dans le torrent Armancette alors qu'elle est à peine perceptible pour le torrent des Tours. Lors de la cueillette des données, aucune restructuration du lit n'avait débuté dans le torrent des Tours. Le torrent Armancette se divise à quelques endroits en deux chenaux séparés par des bancs d'une longueur moyenne de 20 mètres. Lors de la prise de données, le débit du torrent Armancette était faible ( $\pm 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) et le débit du torrent des Tours était très faible ( $\pm 0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Dans les deux torrents, une expérience à long terme de transport des sédiments en charge de fond est en cours (Lamarre et al. 2005 et Lamarre et al. 2008).

#### Ruisseaux Spruce, Portes de l'Enfer et Deloges

Les ruisseaux Spruce, Portes de l'Enfer et Deloges se situent à des altitudes inférieures à 600 mètres et supérieures à 400 mètres. Les ruisseaux Spruce et Deloges se trouvent en milieu forestier tandis que le ruisseau Portes de l'Enfer est bordé d'arbustes et d'arbrisseaux. Les régimes d'écoulement répondent à la fonte des neiges entre la fin mars et mai, et aux fréquences de précipitation plus abondantes à l'automne. On retrouve des débris ligneux dans les ruisseaux Spruce et Deloges. La largeur plein bord des trois ruisseaux varie entre 6 et 8 mètres. Les trois ruisseaux présentent une morphologie du chenal en *step-pool* où les *steps* sont composés de blocs pour les ruisseaux Spruce et Portes de l'Enfer et de blocs et de débris ligneux pour le ruisseau Deloges. La Figure 2.6 montrent les trois ruisseaux. Les sections à l'étude des ruisseaux Deloges et Spruce présentent un angle de sinuosité supérieure ou égale à  $90^\circ$  tandis que la section à l'étude du ruisseau les Portes de l'Enfer est presque totalement rectiligne (Figure 3.1). Les ruisseaux Spruce et Deloges montrent une forte stabilité des formes du lit. Le ruisseau Portes de l'Enfer a subi une crue importante qui a fortement modifié le lit à l'été 2005 (renseignement fourni par la SEPAQ, parc de la Gaspésie). Au moment du relevé topographique (deux ans après la crue), un système *step-pool*

s'était réorganisé mais la stabilité du lit n'était pas encore atteinte. Aussi, lors de la prise de données, les débits des trois ruisseaux étaient faibles ( $\pm 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Dans le ruisseau Spruce et le ruisseau Deloges, une expérience à long terme de transport des sédiments en charge de fond est en cours ((Lamarre et *al.* 2005 et Lamarre et *al.* 2008).

	Torrent Des Tours	Torrent Armancette	Ruisseau Spruce	Ruisseau Portes de l'Enfer	Ruisseau Deloges
Localisation	Alpes françaises	Alpes françaises	Sutton, Qc	Gaspésie, Qc	Mégantic, Qc
Altitude du site (m)	1800	1900	520	457	500
Aire du bassin versant ( $\text{km}^2$ )	4	7.3	3.2	4	3,5
Végétation	Arbrisseaux, Arbustes	Herbes, Arbrisseaux	Forêt	Arbustes, Arbrisseaux	Forêt
Pente du cours d'eau (%)	43	37	15	9	8
Largeur moyenne plein bord (m)	10	19	6	7	6
Nombre de transect et longueur de la section (m)	100 /100	100 / 200	100/100	100 /100	100 /100
Dates des mesures	Août 2006	Août 2006	Juin 2007	Août 2007	Juillet 2007
$D_{50}$ (mm)	100	110	80	95	75
$D_{\text{max}}$ (mm)	3800	2290	2000	1600	1100
N particules	2000	2000	1000	200	1000

Tableau 2.1. Principales caractéristiques de chaque site à l'étude

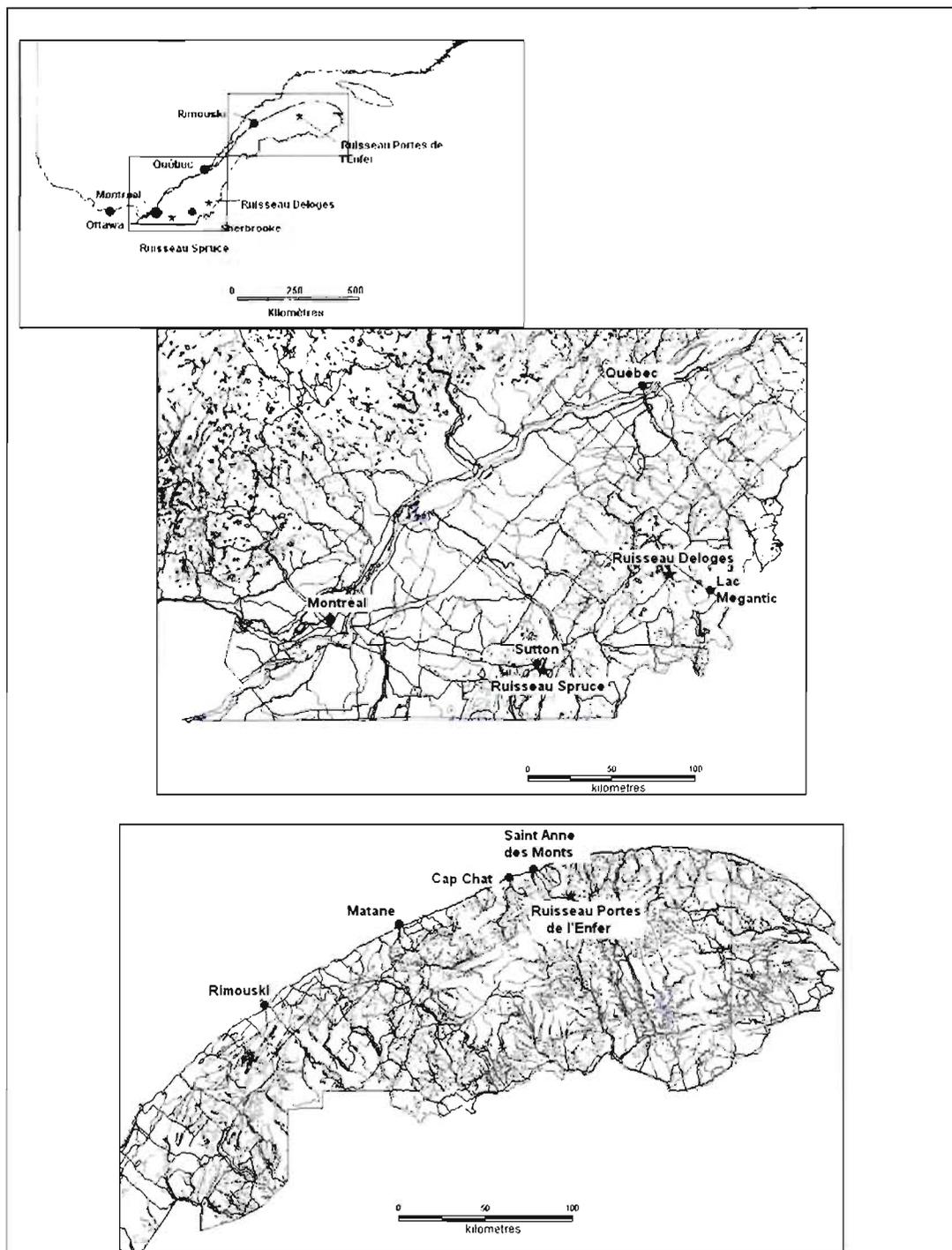


Figure 2.2 Localisation des ruisseaux Spruce, Deloges et Portes de l'Enfer. Les segments bleus représentent les cours d'eau, les courbes grises représentent la topographie et les segments noirs le réseau routier. (Digital Chart of the World, 1993; version 1 :1 000 000).

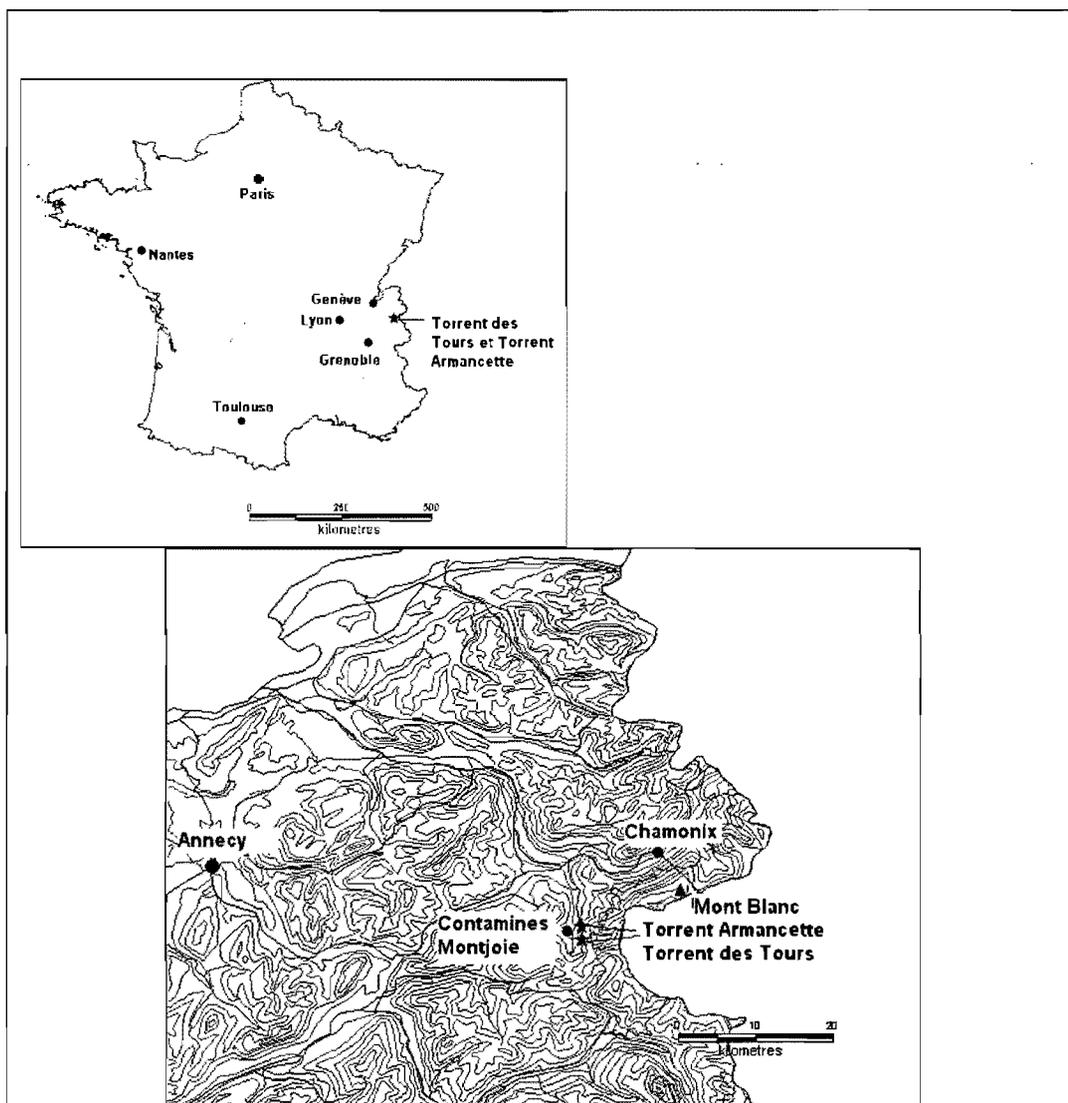


Figure 2.3 Localisation des torrents Armancette et des Tours. Les segments bleus représentent les cours d'eau, les courbes grises représentent la topographie et les segments noirs le réseau routier. (Digital Chart of the World, 1993; version 1 : 1 000 000).

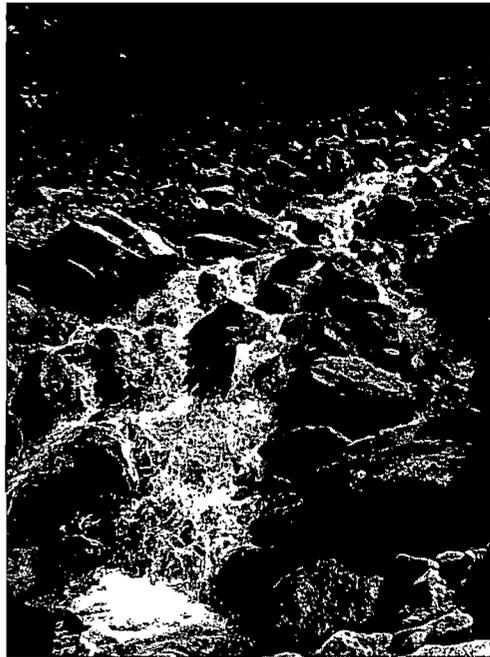
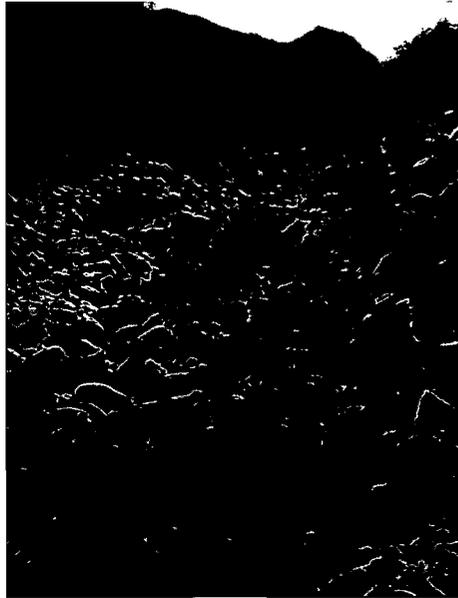


Figure 2.4 Photos du torrent des Tours (haut) et du torrent Armancette (bas).

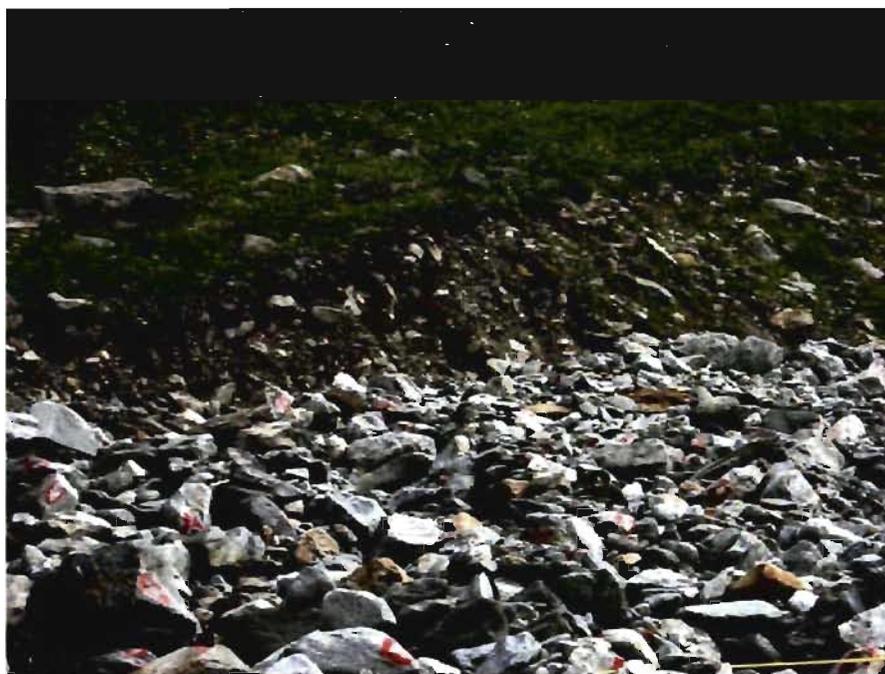


Figure 2.5 Photos montrant les berges du torrent des Tours (haut) et du torrent Armancette (bas).

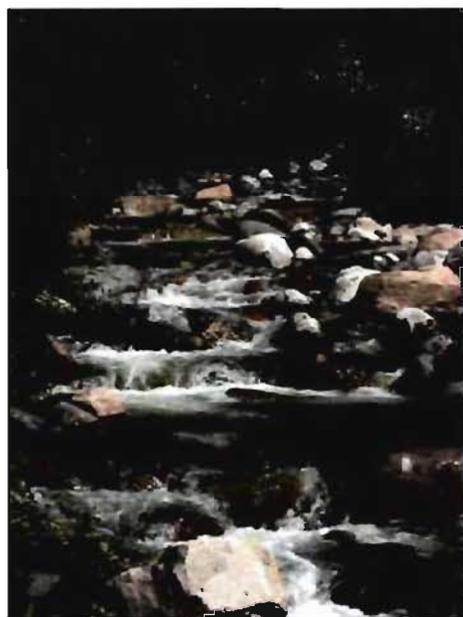


Figure 2.6 Photos des trois ruisseaux : ruisseau Spruce (haut), ruisseau Portes de l'Enfer (bas gauche) et ruisseau Deloges (bas droite).

## **2.2.2. Acquisition des données**

Dans chacune des rivières, on procède à une identification visuelle des formes du lit, un relevé topographique et un échantillonnage de la taille des sédiments. Les deux torrents ont été échantillonnés en août 2006, le ruisseau Spruce en juin 2007, les ruisseaux Deloges et Portes de l'Enfer en août 2007. L'échantillonnage de chacune des sections a nécessité une période de un à trois jours de travail.

### **2.2.2.1. Identification visuelle**

L'identification visuelle des formes du lit a été exécutée à l'aide de la classification de Montgomery et Buffington (1997) par deux opérateurs. Les différentes morphologies ont été identifiées le long du cours d'eau sur les mêmes sections que nous avons cartographiées en détails.

### **2.2.2.2. Relevé Topographique**

Les relevés topographiques ont été effectués à l'aide d'une station totale tachéométrique laser Trimble avec fonction robotisée (Fig. 2.7). Cet instrument permet une autonomie de l'utilisateur et une économie de temps dans la prise de données. L'échantillonnage a été effectué de manière systématique à l'aide de coupes transversales régulièrement espacées. Les points pris le long des coupes transversales correspondent aux bris de pente et aux variations d'élévation. Les deux extrémités des coupes transversales correspondent à la limite plein bord des sections. L'échantillonnage systématique des coupes transversales permet une étude des variations et des répartitions spatiales et il se prête bien à la représentation cartographique des résultats (Scherrer, 2007). La distance entre les coupes transversales est constante pour chacun des systèmes mais peut varier d'un système à l'autre. Cette distance a été décidée en tenant compte de l'espacement entre les mouilles qui varie de une à quatre fois la largeur du chenal dans un milieu de pente élevée (Thompson *et al.*, 2006). Ainsi, des coupes transversales ont été faites à tous les deux mètres dans le torrent Armancette qui

était le plus large et à tous les mètres pour le torrent des Tours et les trois ruisseaux. Ceci donne un ratio de 6 à 10 coupes transversales par largeur de cours d'eau. La longueur des sections a été choisie afin d'avoir un nombre d'unités *step-pool* satisfaisant (minimum de 4 unités *step-pool*) et en tenant compte de la distance moyenne entre les mouilles selon la morphologie du milieu. De plus, nous avons décidé du positionnement des sections avec le premier point en aval qui correspond toujours à un step. Ainsi, des sections de 100 mètres ont été échantillonnées pour les trois ruisseaux en raison de la morphologie en *step-pool* où la distance entre les mouilles est de une à quatre fois la largeur du chenal. Pour les deux torrents, la longueur des sections a été choisie en tenant compte de la distance entre les mouilles de la morphologie en cascade qui est moins de une fois la largeur du chenal. Ainsi, le torrent Armancette a été échantillonné sur une longueur de 200 mètres et le torrent des Tours sur une longueur de 100 mètres. Un profil longitudinal du talweg a aussi été fait sur les trois ruisseaux. Les points du profil recueillis sur le terrain représentent les bris de pente du talweg établi visuellement. Les profils ont été réalisés sur les mêmes sections que les coupes transversales. Le profil longitudinal du talweg n'a pas été relevé sur les deux torrents en raison du manque de temps et de la difficulté à identifier visuellement le talweg et de la présence de bancs centraux dans le lit du torrent Armancette. Toutefois, il est possible d'extraire le profil longitudinal du talweg à partir des coupes transversales.

L'inconvénient majeur de l'échantillonnage systématique est que l'emplacement des coupes transversales ne correspond pas toujours à un point important de la morphologie des formes tel que la crête du step ou le point le plus profond de la mouille. Néanmoins, nous avons pu constater que les formes identifiées visuellement sur les cinq systèmes étaient toujours d'une longueur plus grande que l'espacement entre les coupes ce qui a permis d'avoir de 1 à 3 points sur chaque unité morphologique.



Figure 2.7 Station Totale tachéométrique.

### 2.2.2.3. Taille des sédiments

La taille des sédiments de surface a été échantillonnée selon la méthode de Wolman (1954) en mesurant la longueur de l'axe B (axe intermédiaire) sur un échantillon variant de 200 à 2000 particules par rivière. Les particules ont été échantillonnées dans les *steps*, les mouilles et les bancs afin d'avoir une représentation générale des particules se retrouvant à la surface du lit des sections. Les cinq rivières présentent des distributions granulométriques hétérogènes, composées principalement d'un mélange de galets et de blocs (Fig. 2.8). Les cinq sites présentent une granulométrie similaire avec un  $D_{50}$  et  $D_{84}$  variant entre 75 et 110 mm et 180 et 260 mm respectivement. Le Tableau 2.2 donne la taille des particules de chaque rivière selon le centile important pour décrire la distribution granulométrique soit  $D_{5,16,50,84,95}$ .

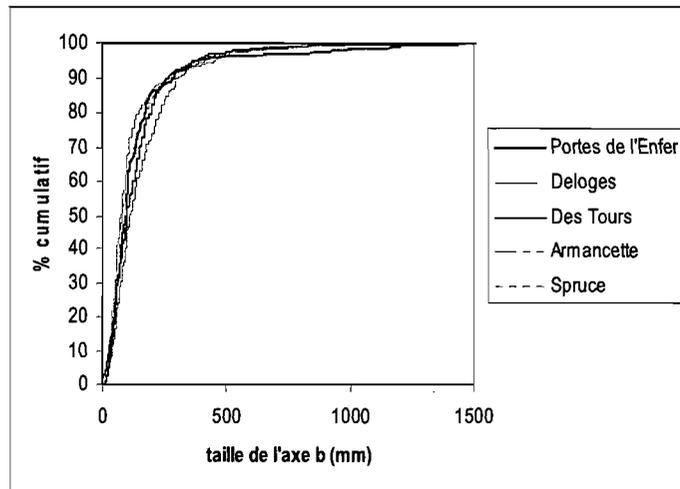


Figure 2.8 Courbes de fréquence cumulée de la distribution granulométrique de l'axe B (intermédiaire) des particules à la surface du lit.

Segments	D <sub>5</sub> (mm)	D <sub>16</sub> (mm)	D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>84</sub> (mm)	D <sub>95</sub> (mm)
Des Tours	15	40	100	220	390
Armancette	30	50	110	260	420
Deloges	25	40	75	180	460
Spruce	20	40	80	200	410
Portes de l'Enfer	26	44	95	190	430

Tableau 2.2 Centile de la taille des particules mesurée à partir de l'axe B (intermédiaire) des particules à la surface du lit.

En somme, les cinq systèmes sont différents quant à leur pente et leur degré d'organisation (passage de la dernière crue importante). Le torrent Armancette est aussi différent au niveau de sa taille qui est deux fois supérieure à celle des autres cours d'eau. Par contre, la taille des sédiments et le régime des précipitations sont similaires pour les cinq systèmes. En ce qui concerne la végétation, deux des cinq cours d'eau se trouvent en forêt mais seulement le ruisseau Deloges présente des *steps* formés de débris ligneux. Les *steps* des cinq systèmes sont formés d'un *keystone* ou d'un obstacle entouré de particules plus petites.

### 2.2.3. Analyse des données

L'analyse des données se divise en quatre sections. Tout d'abord, nous allons tester les différentes méthodes d'identification des éléments morphologiques du lit afin d'évaluer leur performance dans une gamme de milieu. Par la suite, nous allons établir les relations entre les variables géométriques en se servant du milieu comme indice de variabilité. Suivra l'analyse de la périodicité des *steps* pour chaque site à l'étude et finalement nous utiliserons les données des coupes transversales pour analyser l'hydraulique en lien avec les formes du lit.

#### 2.2.3.1. Comparaison des méthodes

Pour répondre au premier objectif de cette étude, les techniques du *zero crossing*, de la différence des formes du lit et la technique de la pente critique seront appliquées sur les données obtenues par le relevé topographique. Pour ce faire, nous allons tout d'abord extraire, à partir des coupes transversales, un profil longitudinal du talweg pour chaque cours d'eau. L'extraction se fait en choisissant le point d'élévation le plus bas de chaque transect sur la longueur totale du segment étudié. Nous utilisons ces profils longitudinaux plutôt que ceux mesurés sur le terrain car ils permettent de satisfaire l'objectif de standardisation des données puisque la distance entre deux points ( $p_x, p_{x+1}$ ) qui se suivent sur le profil longitudinal extrait est constante pour tout  $p_x - p_{x+1}$ . Toutefois, pour vérifier si les profils longitudinaux extraits du relevé topographique des coupes transversales représentent bien les variations d'élévation du talweg nous les comparerons aux profils longitudinaux du talweg mesurés directement sur le terrain. Cette comparaison se fait en superposant les deux profils. Si les deux profils sont similaires nous utiliserons les profils extraits des coupes transversales pour tester l'applicabilité des techniques d'identification des éléments du lit. L'axe y de tous les graphiques des profils représente la distance vers l'aval soit du point le plus en aval (0 m) au point le plus en amont (100 m).

Afin d'extraire les informations pertinentes tels que la position des *steps* et mouilles, nous avons appliqué la méthode suivante. Une droite de régression linéaire simple est appliquée sur les profils longitudinaux afin d'enlever l'effet de la pente du cours d'eau. Pour vérifier si la droite de régression est bien ajustée aux valeurs observées nous avons calculé le coefficient de Pearson ( $r$ ) pour chacune d'elle. Nous avons utilisé de une à trois droites de régression sur les profils afin d'obtenir le coefficient de Pearson le plus élevé soit le plus près de 1. Ainsi, pour les trois ruisseaux, le profil a été segmenté en deux afin d'appliquer deux droites de régression. La technique du *zero crossing* (Richard, 1976) est ensuite appliquée. Pour ce faire, les valeurs d'altitude du talweg sont soustraites de celles prédites par la droite de régression afin d'obtenir les résidus oscillant autour de 0. Dans la technique du *zero crossing*, les résidus négatifs correspondent aux mouilles et les résidus positifs aux *steps*. Les ondulations qui ne correspondent pas, selon la description de Richards (1976), à des *steps* ou des mouilles sont identifiées comme étant des blocs isolés.

La technique de différence des formes du lit sera exécutée suite à l'application de la droite de régression sur les profils longitudinaux extraits du relevé topographique. Les seuils de tolérance  $T$  testés sont choisis en utilisant le cumulatif des changements d'élévation ( $S_D$ ) et le  $D_{84}$  qui représente la hauteur moyenne du step (Ashida *et al.*, 1984, Tatsuzawa *et al.*, 1999). Dans ce cas, nous avons testé les seuils de tolérance  $T$  suivants :  $0.85S_D$ ,  $1S_D$  et  $1,15S_D$ . Nous avons choisi seulement trois seuils de tolérance car les résultats ne varient pas beaucoup entre les seuils.

Enfin, la technique de la pente critique est aussi utilisée pour les cinq cours d'eau. Comme Milzow (2004) l'a proposé, nous avons utilisé une pente critique afin d'identifier les *steps*. La pente critique de chaque rivière a été décidée à partir d'un histogramme de toutes les pentes entre deux points adjacents du profil. Les pentes entre deux points adjacents ont été calculées de l'amont vers l'aval du profil. Milzow (2004) nous a fourni son programme en code Matlab (*stepdefinition.m*) qui permet d'identifier les *steps* sur le profil longitudinal selon la pente critique choisie.

Nous avons dû faire plusieurs modifications du code *stepdefinition.m* afin de l'ajuster à la longueur des cinq sections à l'étude.

Les trois techniques citées précédemment soient le *zero crossing*, la différence des formes du lit et la technique de la pente critique ne permettent pas de distinguer si le step appartient à une unité *step-pool* ou à une unité cascade. Néanmoins, lorsque nous avons procédé à l'identification visuelle des formes sur le terrain, nous avons distingué les unités mixtes *step-cascade* des unités *step-pool*. Les unités mixtes sont présentes à quatre des cinq sites. Ainsi, nous avons développé une cinquième technique qui permet de classer le step selon l'unité morphologique à laquelle il appartient. Cette technique, ici dite de classification, repose sur les résultats de l'identification visuelle et de la pente critique pour déterminer l'emplacement des *steps* sur les profils des résidus. Nous avons décidé de nous fier aux résultats de la pente critique puisque ceux-ci correspondent en général mieux à ceux de l'identification visuelle. Ainsi, nous utilisons les *steps* identifiés par la technique de la pente critique mais nous avons apporté quelques modifications en catégorisant les *steps* selon qu'ils correspondent à une unité *step-pool* ou une unité mixte *step-cascade*. Pour choisir la catégorie nous avons utilisé les critères suivants : Une unité *step-pool*, sur les profils des résidus, correspond à un changement d'élévation positif d'une hauteur supérieure au  $D_{84}$  (représentant la hauteur moyenne du step, Ashida *et al.*, 1984, Tatsuzawa *et al.*, 1999), suivie d'une mouille où le changement d'élévation est négatif. Toutefois, il y a une exception à cette règle pour le premier point aval des sections qui est un step identifié visuellement pour initier la séquence du relevé. Une unité mixte *step-cascade* présente un step d'une hauteur supérieure ou inférieure au  $D_{84}$  suivi d'une mouille de faible profondeur ou de deux points adjacents d'élévation presque similaires suivis d'une ou plusieurs autres chutes correspondant à la cascade. Ce dernier critère est en accord avec la définition de la cascade qui décrit les *steps* comme ayant une faible proéminence (Church et Zimmermann, 2007). La Figure 2.9 montre les deux unités et les critères de classification. Finalement, la technique de la pente critique et la technique de classification sont similaires au niveau de la

méthode pour identifier les *steps*. La différence entre les deux techniques est que la technique de classification identifie à quelle morphologie appartient le *step*.

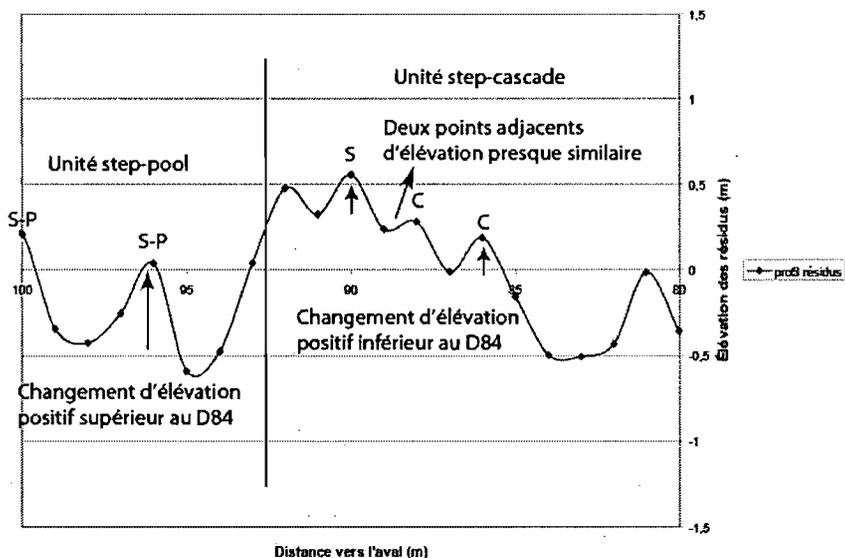


Figure 2.9 Schématisation des critères d'identification de la technique de classification pour identifier l'unité *step-pool* (S-P) et l'unité *step-cascade* (S,C,C).

Pour analyser la performance des différentes techniques dans l'identification des *steps*, nous avons compté le nombre de *steps* identifiés par chaque technique. Ce nombre de *step*, correspond dans sa localisation, à un *step* identifié par la technique de classification. Ces *steps* sont dans la catégorie identifiés et bien localisés. À partir de ce nombre de *steps* identifiés et bien localisés nous avons calculé deux pourcentages soient : 1) le nombre de *steps* identifiés et bien localisés divisé par le nombre total de *steps* identifiés par chaque technique et 2) le nombre de *steps* identifiés et bien localisés divisé par le nombre total de *steps* identifiés par la technique de classification. Ensuite, nous avons calculé la moyenne des deux pourcentages pour chaque technique.

### 2.2.3.2. Relations géométriques et milieux

Pour répondre au deuxième objectif sur les relations géométriques, nous avons tout d'abord identifié les variables que nous voulons mettre en relation soit la longueur d'onde, la hauteur du step, la pente, la largeur et la taille des particules ( $D_{84}$  et  $D_{max}$ ). La localisation des *steps* et des mouilles sur les profils à partir de la technique de classification nous permet d'estimer la longueur d'onde et la hauteur des *steps*. Nous utilisons les résultats de la technique de classification car celle-ci distingue l'unité *step-pool* de l'unité mixte *step-cascade*. Cette distinction est importante lors de l'établissement des relations géométriques car la morphologie des cascades et des *step-pools* n'est pas la même en ce qui concerne la distance entre les *steps* et les mouilles. Nous avons calculé deux types de longueur d'onde soit celle entre les *steps* des **unités** *step-pool* et *step-cascade* et celle entre les *steps* dans les unités **step-cascade**. Nous distinguons ces deux longueurs d'onde car dans la littérature, la distance entre les mouilles des cascades est inférieure à une largeur de chenal et la distance entre les mouilles pour les *step-pools* est de une à quatre fois la largeur du chenal. Ainsi, l'estimation des deux longueurs d'onde nous permettra de vérifier la validité de la relation avec la largeur du chenal. Afin de vérifier l'effet de la définition de la longueur d'onde sur les résultats, celle-ci est évaluée selon la méthode de Chartrand et Whiting (2000) et de celle de Zimmermann et Church (2001). Nous avons aussi calculé deux types de hauteur soit celle des **unités** *step-pool* et *step-cascade* et celle des *steps* des unités **step-cascade**. Tout d'abord, la hauteur d'une unité *step-cascade* et *-pool* est estimée entre la crête du step et le point le plus bas de la mouille (en aval) tandis que la hauteur d'une unité *step-cascade* est estimée entre la crête du premier step et le point le plus bas dans la mouille, en aval du dernier step. La hauteur pour chaque step des unités *step-cascade* est estimée entre la crête du step et le point le plus bas de la mouille directement en aval du step. L'échantillonnage systématique, comme il a été dit précédemment, a sûrement un effet sur ces différentes mesures. Toutefois, nous avons constaté lors de l'échantillonnage sur le terrain que la distance choisie entre les coupes transversales de 1 ou 2 mètres permettait d'avoir toujours un point échantillonné dans le début de la mouille et près de la crête du

step. Dans ce sens, la hauteur estimée et la longueur d'onde estimée ne devraient pas être très différentes de la hauteur ou la longueur d'onde réelle. La Figure 2.10 schématise les deux types de longueur d'onde et de hauteur calculés. En résumé, les différentes estimations sont divisées en deux soit qu'elles correspondent à une unité (la forme entière) ou soient qu'elles correspondent aux différentes parties de l'unité *step-cascade* (*step-mouille-step-mouille...*).

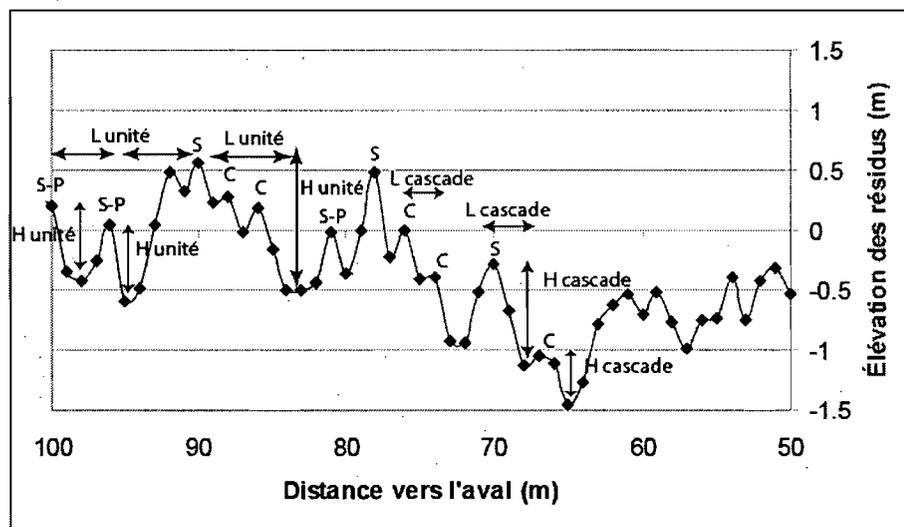


Figure 2.10 Calcul de la longueur d'onde et de la hauteur selon deux méthodes soit L unité, L cascade et H unité, H cascade. L unité désigne la longueur d'onde entre deux unités soit la distance entre la crête du *step* le plus élevé de chaque unité ou forme. L cascade correspond à la distance entre la crête des *steps* dans une unité mixte *step-cascade*. H unité désigne la hauteur entre la crête du *step* et le point le plus bas de l'unité dans la mouille. H cascade définit la hauteur entre la crête du *step* et le point le plus bas, directement en aval du *step*, dans la mouille.

Pour estimer les deux types de hauteur, nous avons opté pour la méthode de Zimmermann et Church (2001). Nous avons choisi cette méthode car elle utilise directement les données topographiques contrairement aux deux autres méthodes qui doivent être mesurées sur le terrain. Le ratio  $H/L$  a été évalué de deux manières selon qu'il s'agissait des unités ou des *step-cascades* soit 1) la hauteur des unités divisé par la longueur d'onde des unités et 2) la hauteur des *step-cascades* divisé par la longueur d'onde des *step-cascades*. Nous utilisons la longueur d'onde de Zimmermann et Church (2001) pour les calculs de ratio car la

hauteur est aussi estimée selon leur méthode. La largeur du chenal a été calculée à toutes les coupes transversales représentant la largeur du chenal à plein bord. La moyenne des largeurs et la moyenne des longueurs d'onde des unités sont utilisées dans le calcul du ratio  $L/W$ . La pente a été évaluée entre le point le plus en aval et le point le plus en amont de chaque section.

Nous utilisons la moyenne de chaque variable dans nos comparaisons et les relations géométriques entre les cinq sites car Chin (1989) a montré que l'analyse des unités individuelles ne produit pas de résultats statistiques concluants. Ainsi, nous examinons les variations entre chaque site plutôt que les variations à l'intérieur d'un site. Les relations géométriques sont établies entre six variables soit la hauteur ( $H$ ), la longueur d'onde ( $L$ ), la largeur du chenal au niveau plein bord ( $W$ ), la pente ( $S$ ), le ratio  $LW$  et la taille des sédiments ( $D_{84}$  et  $D_{max}$ ). Pour déterminer si une relation est significative nous utilisons le coefficient de corrélation de Pearson ( $r$ ). Nous avons aussi calculé le ratio entre la longueur d'onde des unités vs la longueur d'onde des *step-cascades* et la hauteur des unités vs la hauteur des *step-cascades*.

### 2.2.3.3. Périodicité des *steps*

Le deuxième objectif inclut aussi l'examen de la périodicité des *steps*. Les chercheurs ne s'accordent pas sur ce sujet ce qui engendre deux conceptions opposées soit que les *steps* se forment suivant une distribution régulière ou que les *steps* se forment aléatoirement. Ces deux positions sont le résultat de différentes analyses d'autocorrélation qui permettent d'estimer la périodicité des *steps*. Toutefois, ces analyses ont été pratiquées majoritairement en laboratoire ou sur des cours d'eau formés d'une seule morphologie et présentant un nombre de *steps* supérieur aux nôtres. Les analyses d'autocorrélation tel que l'indice de Moran ou l'analyse spectrale utilisent comme critère les élévations résiduelles afin de trouver les paires de points qui ont tendance à être similaires. Toutefois, dans un milieu comportant une morphologie mixte *step-cascade* et *step-pool*, l'élévation des *steps* varie énormément ce qui diminue la pertinence d'utiliser ces analyses

dans notre cas. Néanmoins, nous avons décidé de tester l'analyse spectrale puisque celle-ci a déjà été utilisée pour des profils de 120 points (Wooldridge et Hickin, 2002) comportant de 13 à 34 *steps*. Nous avons décidé de ne pas tester l'indice de Moran car celui-ci est très sensible au nombre de points dans la série. À ce jour, il a été utilisé sur des sections de cours d'eau d'une longueur variant entre 400 et 2500 m (Madej, 1999, 2001) soit beaucoup plus longue que les sections à l'étude dans cette recherche ou sur des sections comportant seulement un type morphologique (Thompson *et al.*, 2006).

Nous avons utilisé la technique de Chin (1998) pour les analyses spectrales en substituant le temps par l'espace et en utilisant les élévations résiduelles. Un intervalle de confiance de 95% a été ajouté aux analyses spectrales afin d'obtenir des spectres représentatifs malgré la courte longueur des séries. Nous avons converti les fréquences soit des cycles par mètre en longueur d'onde selon  $1/\text{fréquence}$ . Des diagrammes de dispersion de la hauteur et de la longueur d'onde des *steps* de chaque site sont utilisés pour voir s'il existe une tendance ou des regroupements. Afin de tester la validité des théories de formation des *step-pools* nous avons calculé la relation entre la hauteur, la longueur d'onde et la pente soit la relation suivante  $cS = H/L$  où  $c$  est considéré comme un paramètre de l'escarpement non-dimensionnel. Pour estimer les paramètres de l'équation, nous avons procédé de la même manière que Lenzi (2001) soit en utilisant la moyenne de la hauteur et de la longueur d'onde des formes (*step-pool* et *cascade*) et la pente associée à ces formes et non la pente totale du cours d'eau. Nous avons inséré les résultats dans le graphique d'Abrahams *et al.* (1995) portant sur le modèle de la résistance maximale au courant.

#### 2.2.3.3. Coupes transversales

Le troisième objectif est d'analyser les liens potentiels entre l'hydraulique et les formes du lit et ce, à partir des coupes transversales. Par définition, le débit d'une section est donné par  $Q = Wdv$  où  $W$  est la largeur du chenal,  $d$ , la profondeur moyenne de la coupe transversale et  $v$ , la vitesse moyenne de l'écoulement. Pour

examiner ce lien et extraire les fluctuations dans la vitesse de l'écoulement le long du profil longitudinal, nous assumons que le débit est constant le long du profil à un moment donné. Étant donné que les sections étudiées sont courtes et qu'il n'y a pas d'apport d'eau important entre les points amont et aval des sections, ce postulat est justifié. Ainsi, pour deux coupes transversales  $i$  et  $j$ ,  $Q_i = Q_j$  au temps  $t$ . Donc, si  $w_i d_i v_i = w_j d_j v_j$  et que nous connaissons à partir du relevé topographique la largeur et la profondeur des deux coupes transversales nous pouvons estimer les taux de changement dans la vitesse moyenne entre les deux coupes liées à la variation de la forme du chenal. Ceci postule cependant que la surface de l'eau demeure au niveau plein bord ce qui peut ne pas se réaliser dans un système *step-pool* où on retrouve souvent des vagues stationnaires. L'exercice pourra tout de même livrer une information nouvelle sur les caractéristiques hydrauliques des systèmes *step-pool*, information qu'il est virtuellement impossible de recueillir sur le terrain dans ce type de cours d'eau lorsqu'ils sont en crue. Pour ce faire, nous devons tout d'abord, réaliser des modèles numériques d'élévations à partir des relevés topographiques (coupes transversales). Nous utilisons un algorithme d'interpolation par réseau de triangles irréguliers (TIN) avec une résolution de 5 m. Selon Lamarre (2006), la stratégie d'échantillonnage combinant une approche systématique et par rupture de pente ainsi qu'un algorithme d'interpolation par TIN donne les modèles numériques d'élévations les plus représentatifs d'une topographie comportant des éléments de rugosité tels que les *steps* ou les blocs isolés dans notre cas. À partir des DEM nous avons extrait la largeur du chenal à plein bord à toutes les coupes transversales et avons estimé la profondeur moyenne à chaque coupe transversale. Connaissant ces deux variables nous pouvons estimer un ratio de la vitesse entre deux coupes soit  $v_i/v_j = 1/a$  où  $a$  correspond à  $w_i d_i/w_j d_j$ . Nous avons calculé le ratio de la vitesse et de la largeur entre les coupes transversales situées à la crête du step et au point le plus profond de la mouille afin de quantifier l'effet des formes du lit sur les changements de la vitesse moyenne. Le ratio de la vitesse a été calculé de l'amont vers l'aval soit  $v_i$  correspondant à une coupe transversale située sur la crête et  $v_j$  correspondant à une coupe transversale située dans la mouille adjacente. Ainsi, si le ratio des vitesses est inférieur à 1,0, on assiste à une décélération de l'écoulement vers

l'aval alors que si le ratio est plus grand que 1,0, on aura une accélération. Le ratio de la largeur correspond à la largeur de la coupe transversale située dans la mouille sur la largeur de la coupe transversale située sur la crête du *step* en amont.

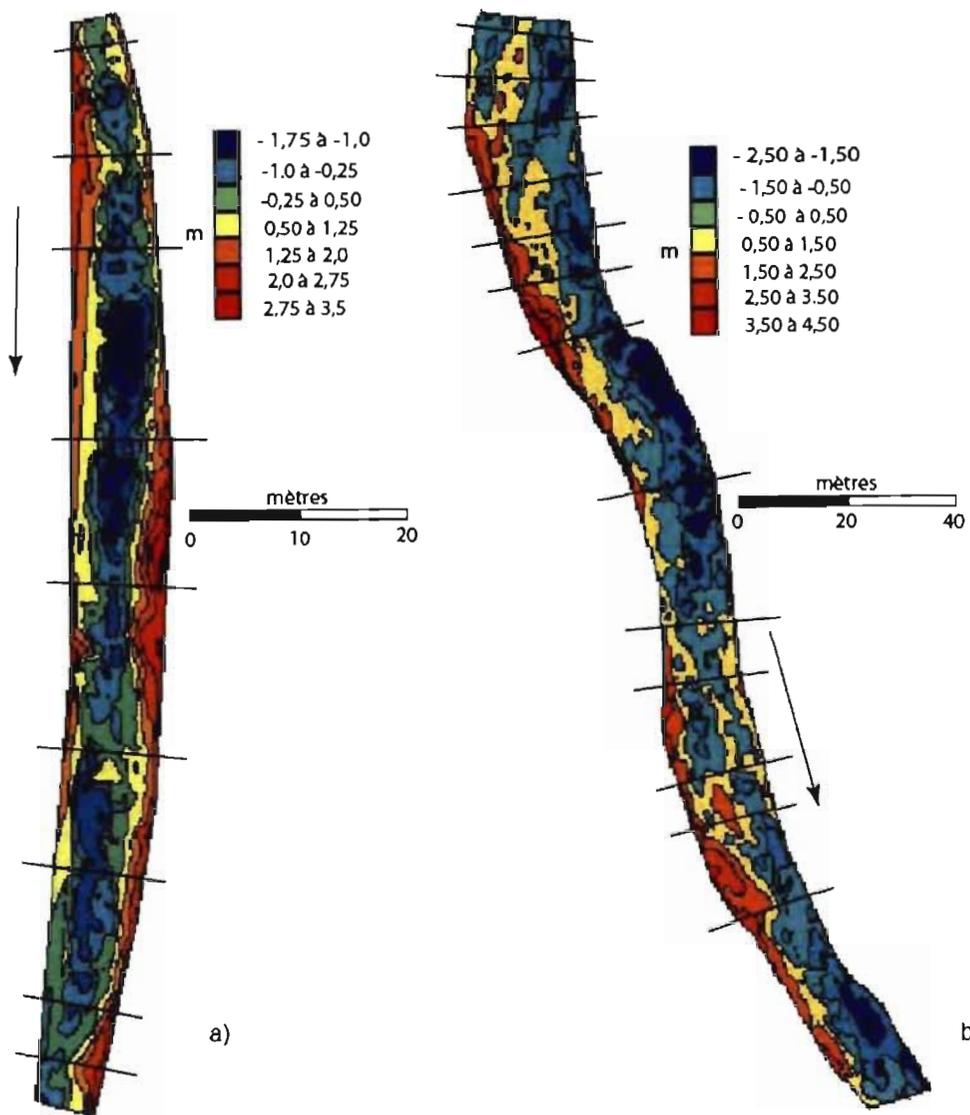
Finalement, nous avons examiné si la symétrie des coupes transversales varie selon les formes et le milieu. Pour ce faire, nous avons estimé le ratio entre l'aire de la partie à droite du point milieu de la coupe sur l'aire de la partie à gauche (en regardant vers l'aval). Si le ratio est supérieur à 1, la forme est asymétrique vers la droite et si le ratio est inférieur à 1, la forme est asymétrique vers la gauche.

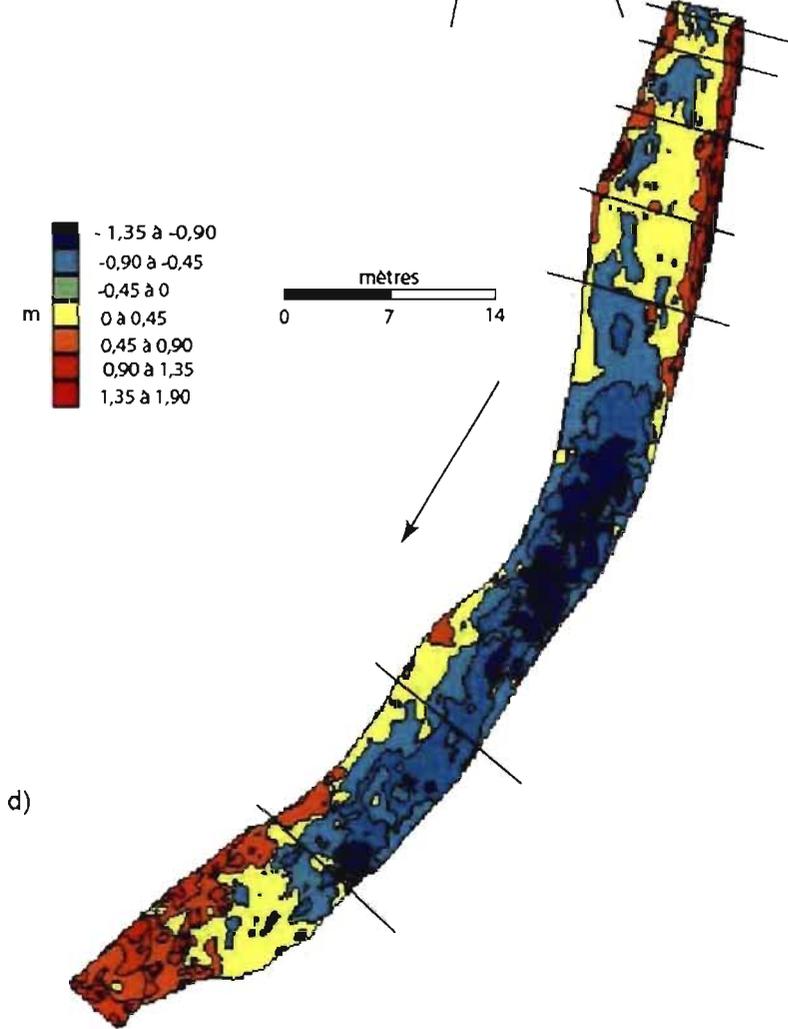
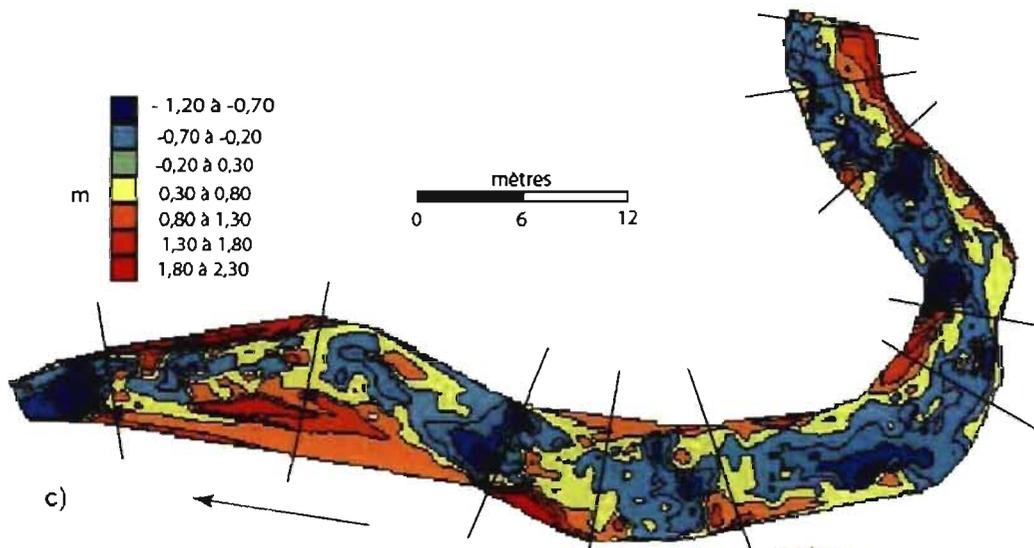
En somme, l'acquisition de données à partir d'un échantillonnage systématique par coupes transversales sur cinq systèmes fluviaux ayant des pentes variant entre 8 et 43% permet d'exécuter plusieurs analyses. Quatre principales analyses sont faites sur les données. La première analyse permet de tester l'applicabilité et la performance des différentes méthodes d'identification des éléments morphologiques telles que le *zero crossing*, la différence des formes du lit, la pente critique et la méthode de classification créée dans cette étude (afin de distinguer le *step* de la morphologie *step-pool*, de la morphologie mixte *step-cascade*). La deuxième analyse fait suite à la précédente car elle utilise les résultats de l'identification des formes du lit afin d'établir les relations entre les variables géométriques. La troisième analyse permet de vérifier les différentes hypothèses de formation des *step-pools* et finalement la dernière analyse utilise les données des coupes transversales pour analyser les composantes hydrauliques (ratios moyens de la vitesse et de la largeur, aire d'une coupe transversale, symétrie) en lien avec les formes du lit.

### 3. Résultats

La présentation des résultats se divise en trois parties. La première partie réfère au premier objectif soit de décrire et tester les différentes techniques d'identification des unités morphologiques. La deuxième partie décrit les relations entre les différentes variables géométriques des formes pour les cinq segments de rivières étudiés alors que la dernière partie examine les liens entre l'hydraulique et les formes du lit.

Pour visualiser les caractéristiques morphologiques des cinq sections à l'étude nous présentons les modèles d'élévation numériques (Fig. 3.1). Les données sont les résidus une fois la pente de la section retirée. Ainsi, on peut identifier les zones d'affouillement, les zones d'accumulation et les bancs sur chaque section. Les deux torrents présentent un MNE légèrement différent des trois ruisseaux car les *steps* ne sont pas aussi visibles ou proéminents. Ainsi, les zones ayant une élévation inférieure à 0 mètre domine le lit des deux chenaux. Le torrent des Tours montre une absence de formes typiques (*step* et mouille) due à la crue de 2005 qui a désorganisé le lit et détruit plusieurs structures morphologiques. Le torrent Armancette présente aussi une absence de formes typiques. Toutefois, le MNE montre quelques bancs d'accumulation qui sont dus à la crue de 2005 qui a transporté et déposé beaucoup de sédiments dans ces zones. Le torrent Armancette, est le seul des cinq sites où il y a présence de bancs d'accumulation ce qui porte à croire que sa taille plus grande facilite la formation de zone d'accumulation. Le ruisseau Spruce présente un MNE où les *steps* sont faciles à identifier et où le lit du chenal connaît une alternance de zones d'élévation supérieures et inférieures à 0 mètre liée à une zone d'accumulation (*steps*) suivi d'une zone d'affouillement (mouille). Le ruisseau Portes de l'Enfer présente deux zones d'accumulation aux deux extrémités de la section à l'étude. Ces deux zones sont séparées par une zone d'affouillement où la désorganisation du lit est perceptible. Le ruisseau Deloges présente un MNE semblable à celui du ruisseau Spruce avec une alternance de zones d'accumulation et de zones d'affouillement.





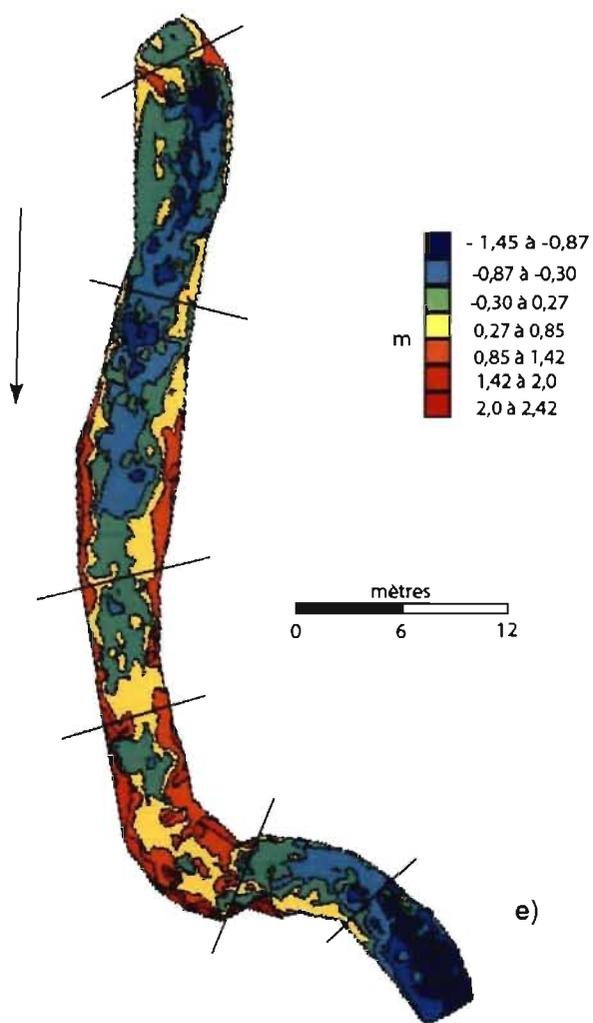


Figure 3.1 Modèle d'élévation numérique du torrent des Tours (a), torrent Armancette (b), ruisseau Spruce (c), ruisseau Portes de l'Enfer (d) et ruisseau Deloges (e). Les lignes noires sur les profils des trois ruisseaux représentent la position des *steps* identifiés par l'identification visuelle sur le terrain. Les lignes noires sur les deux torrents représentent la position des *steps* identifiés par la technique de classification.

### 3.1. Identification des formes du lit

#### 3.1.1. Identification visuelle

L'identification visuelle des formes du lit à partir de la classification de Montgomery et Buffington (1997) s'est avérée facile et efficace pour les ruisseaux Spruce et Deloges, légèrement difficile pour le ruisseau Portes de l'Enfer et inefficace pour les deux torrents. Le principal problème dans la classification réside dans le fait que les descriptions correspondent à des formes ayant atteint un niveau de formation/construction maximal du lit ce qui implique par conséquent que les cours d'eau ont une grande stabilité. Ainsi, les ruisseaux Spruce et Deloges présentent une morphologie en *step-pool* bien définie et facile à identifier correspondant à la définition utilisée par Montgomery et Buffington (1997) (Fig. 2.6 c et e). Nous avons identifié dix unités *step-pool* dans la section du ruisseau Spruce et sept unités pour le ruisseau Deloges dont six correspondant à une morphologie *step-pool* et une autre à une morphologie mixte de *step-cascade*. Les trois autres sites étudiés présentent des stades de formation différents qui correspondent plus ou moins à la définition d'une morphologie en *step-pool*. Ainsi, le ruisseau Portes de l'Enfer présente une suite d'unités *step-pool* encore en formation pouvant être interprétées comme des unités *step-cascade*. Ces différentes unités morphologiques sont dues aux changements qu'a subis le cours d'eau suite à la crue à l'été de 2005. Ainsi, on infère ce stade peu avancé du développement des formes à partir de la proximité entre les unités, du faible niveau d'affouillement de certaines mouilles et d'une légère désorganisation des blocs dispersés sur le lit. (Fig. 2.6 d). Néanmoins, nous avons réussi à identifier trois unités *step-pool* et trois unités présentant un mélange entre la cascade et le *step-pool* dite de *step-cascade*. Les limites des unités mixte *step-cascade* ont été difficiles à identifier. Par ailleurs, les deux torrents, présentent, eux aussi, une morphologie intermédiaire entre le *step-pool* et la cascade avec des zones très désorganisées (Fig. 2.4 a et b). Cette morphologie intermédiaire n'est pas très bien décrite dans la classification ce qui pose problème quant à la délimitation de la fin d'une unité morphologique et du début d'une autre. De plus, identifier les formes du lit a été

plus difficile pour le torrent des Tours car le débit était très faible ce qui n'a pas permis de voir si l'écoulement était typique de la morphologie en cascade ou de la morphologie en *step-pool*. Dans les deux cas, nous n'avons pas réussi à identifier les unités sans ambiguïté. Malgré cette ambiguïté dans certains cas, les *steps* identifiés sur le terrain serviront comme point de comparaison pour évaluer la performance des différentes techniques d'identification des formes.

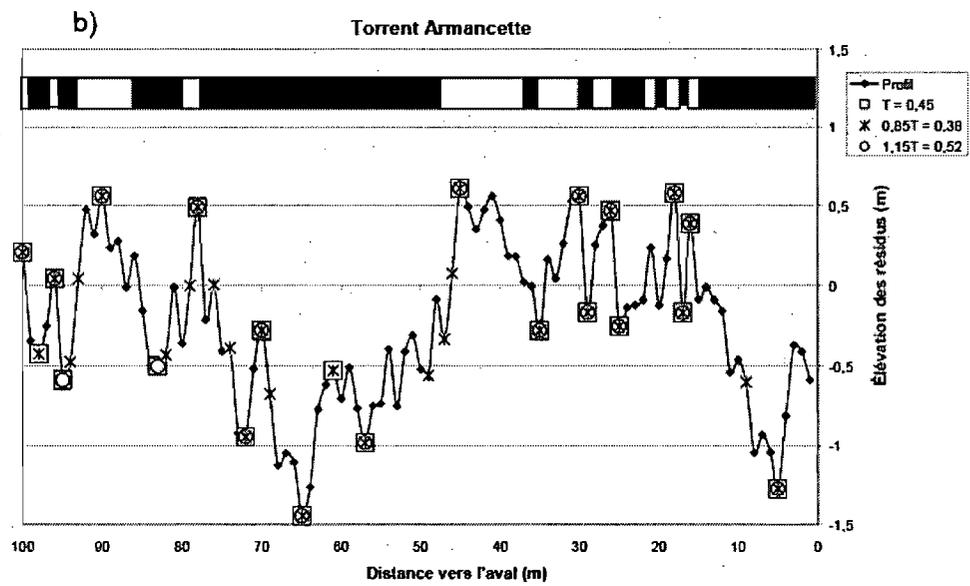
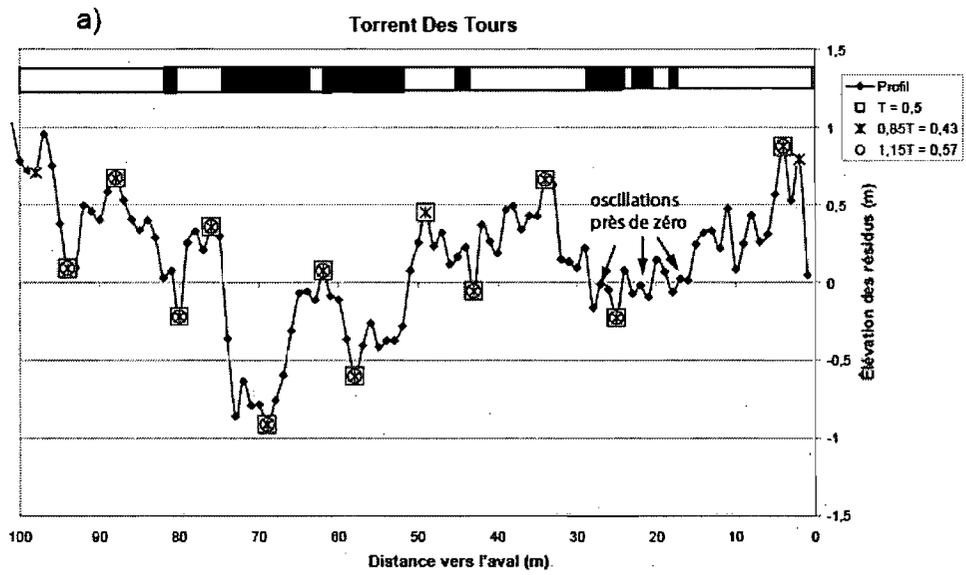
### **3.1.2. Comparaison des techniques du *zero crossing*, de la différence des formes du lit, de la pente critique et de la classification**

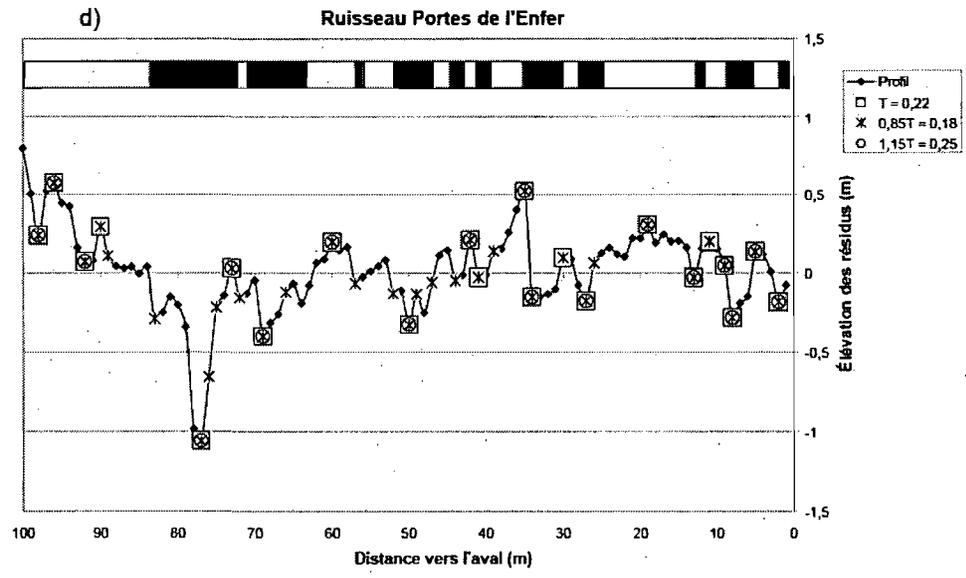
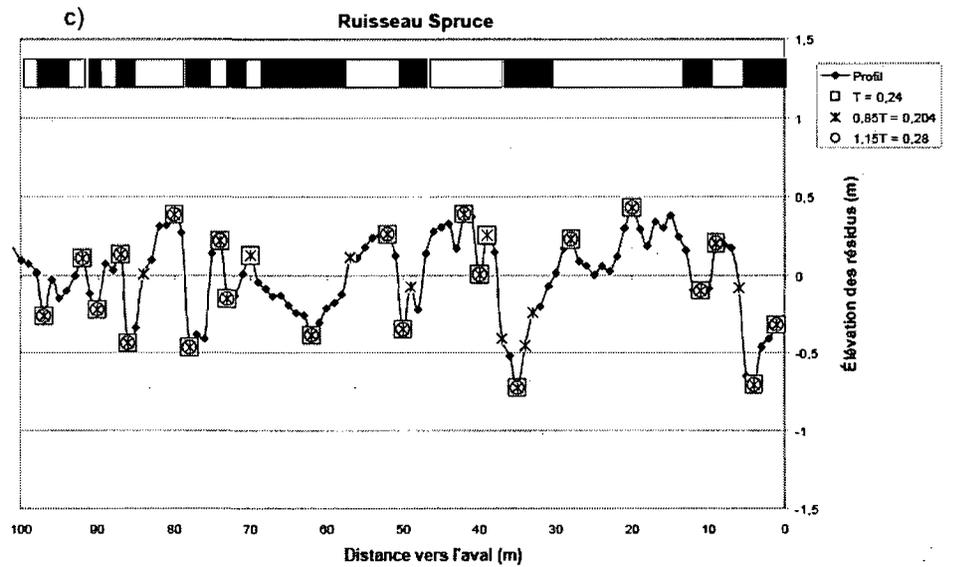
Les quatre techniques soient le *zero crossing*, la différence des formes du lit, la pente critique et la classification ont produit des résultats variés et de qualités différentes. Les résultats sont obtenus des profils longitudinaux extraits des coupes transversales. La technique du *zero crossing*, s'est avérée peu satisfaisante dans l'identification des *steps* et des mouilles principalement en raison des problèmes que Milne (1982) et Wooldridge et Hickin (2002) ont reconnus. Bien que l'on ait retiré la tendance du profil des segments à l'aide d'une droite de régression, les profils des résidus des cinq rivières (Fig. 3.2) comportent beaucoup d'ondulations de grandes et courtes échelles n'oscillant pas autour de 0 et qui ne sont donc pas détectées comme des formes. Il s'avère que le nombre d'ondulations de grandes et courtes échelles est plus élevé lorsque la pente du profil augmente et que la stabilité du lit diminue. Ces ondulations peuvent représenter une ou plusieurs unités *step-pool*, *step-cascade* ou *cascade*. De plus, il a parfois été difficile de classer l'oscillation car celle-ci était très près de zéro ce qui peut être interprété comme un changement dans la forme du lit ou comme un bloc protubérant. La Figure 3.2 (a) montre trois exemples de ce type d'oscillation dont deux font partie d'une mouille et la dernière étant intégrée à un *step*. Dans de tels cas, nous n'avons pas tenu compte de l'oscillation et avons considéré qu'elle représentait un bloc isolé superposé à l'unité morphologique. Ainsi, lorsque l'on compare les cinq profils de résidus obtenus on constate plusieurs différences. Les profils des ruisseaux Spruce et Deloges (Fig. 3.2 c et e) sont beaucoup plus réguliers avec une alternance de résidus négatifs et positifs oscillant autour de 0. Les trois autres

profils présentent des séquences d'ondulations irrégulières de courtes ou grandes échelles oscillant au-dessus ou sous zéro, correspondant à une suite de résidus négatifs ou positifs et non à une alternance des résidus comme pour les deux ruisseaux cités précédemment. Toutefois, le ruisseau Portes de l'Enfer (Fig. 3.2 d) malgré sa faible pente, ne présente pas un profil similaire aux deux autres ruisseaux. Ceci pourrait s'expliquer par la stabilité encore précaire du lit et par l'action des processus actifs de réorganisation des formes du lit. Les deux torrents, avec leur pente supérieure à 30%, présentent des profils que l'on pourrait désigner de désorganisés dû aux nombreuses ondulations de grandes et courtes échelles n'oscillant pas autour de zéro. Cette désorganisation du lit est probablement due à l'impact de la forte crue à l'été 2005 qui a remanié le lit et mis à nu plusieurs blocs isolés que nous avons pu voir lors de la campagne de terrain. Ce dernier constat pourrait expliquer les nombreuses ondulations de courtes échelles à l'intérieur d'une unité morphologique. Le Tableau 3.1 présente le nombre de *steps* identifiés par cette technique pour les cinq segments et le pourcentage de *steps* localisé au même endroit que les *steps* de la technique de classification et de l'identification visuelle.

La technique de différence des formes du lit n'a pas donné de très bons résultats pour les trois valeurs de tolérance analysées (Fig. 3.2). Cette technique identifie les maximums et minimums absolus comme étant des *steps* et des mouilles. Dans la majorité des cas, le minimum absolu identifié ne correspond pas à la mouille en aval du *step* correspondant à un maximum absolu mais à une mouille en aval d'un maximum local (se référer à la Fig. 1.11). Le Tableau 3.1 donne le nombre de *steps* et de mouilles pour chaque site selon le seuil de tolérance et le nombre de *steps* bien localisés. Le seuil de tolérance 0,85T est celui qui détecte le nombre le plus élevé de *steps* à la même localisation que ceux identifiés par les techniques de classification et de visualisation. Par contre, si on estime le ratio entre le nombre de *steps* bien localisés et le nombre de *steps* identifiés pour chaque seuil de tolérance, le seuil 1,15T donne les meilleurs résultats. Ainsi, les niveaux de tolérance T et 0,85T identifient davantage de *steps* et de mouilles qui ne correspondent pas à des formes morphologiques vues sur le terrain. Ces deux

niveaux de tolérance identifient souvent la chute du *step* et la crête du *step* comme étant deux *steps* distincts ce qui n'est pas le cas. De plus, le nombre de *steps* identifiés à la bonne position est toujours inférieur au nombre de *steps* réels (technique de classification) et varie d'un milieu à l'autre. Ainsi, plus de 80% des *steps* sont bien identifiés pour les ruisseaux Spruce et Delogés et entre 40 à 60% des *steps* sont bien identifiés pour les deux torrents et le ruisseau Portes de l'Enfer. De ce fait, la technique de différence des formes du lit ne semble pas convenir à des milieux ayant subi une désorganisation du lit ou ayant une morphologie mixte de *step-pool* et de cascade.





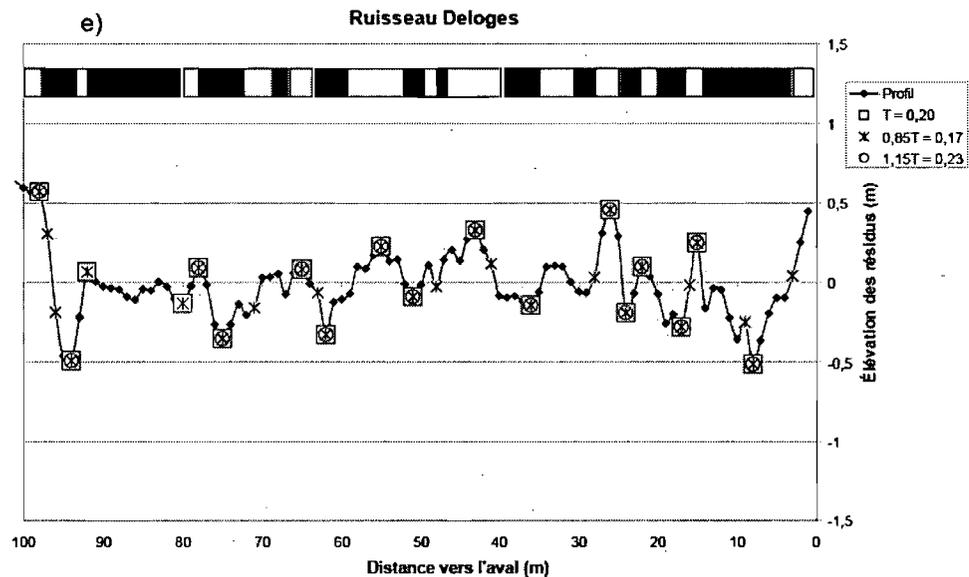


Figure 3.2 Profil des résidus des élévations du torrent des Tours (a), torrent Armancette (b), ruisseau Spruce (c), ruisseau Portes de l'Enfer (d) et ruisseau Deloges (e). Les deux premières techniques d'identification des éléments morphologiques du lit sont présentées. La technique du *zero crossing* est représentée par l'alternance de barre noire (*mouille*) et blanche (*step*) au-dessus des profils. La technique de différences des formes du lit est représentée selon les trois seuils de tolérance décrits dans la légende.

La technique de la pente critique s'est avérée efficace dans l'identification des *step-pools* des cinq rivières. La pente critique a été choisie selon les histogrammes des pentes en tenant compte de trois critères émis par Milzow (2004) soit : 1) la pente critique doit être positive puisqu'elle représente la pente des *steps*, 2) la pente critique est supérieure à la pente moyenne du chenal et au premier mode positif et 3) la pente critique doit identifier plus de 75% des *steps*. Le dernier critère est très important et permet d'identifier la pente critique. Les histogrammes de la distribution des pentes entre deux points adjacents pour les cinq sites sont tous polymodaux avec une distribution asymétrique à droite. En appliquant ces trois critères aux histogrammes des pentes entre deux points adjacents de chaque site (Fig. 3.3 a à e) on obtient une pente critique de 0,30 pour le torrent des Tours, 0,34 pour le torrent Armancette, 0,25 pour le ruisseau Spruce, 0,20 pour le ruisseau

Portes de l'Enfer et 0,20 pour le ruisseau Deloges. La Figure 3.4 présente les profils des résidus avec les points identifiés par la technique comme étant des *steps*. Il faut noter que même si quatre des pentes critiques sont identifiées par un mode ce n'est pas un critère dans le choix de la pente critique. Les trois critères sont cités précédemment. Les résultats du Tableau 3.1 montrent que de 75 à 100% des *steps* identifiés par la technique de la pente critique correspondent aux *steps* identifiés par la technique de la classification. Pour fins de comparaison, les résultats de la technique de la classification sont présentés sur les mêmes figures que les résultats de la technique de la pente critique. Toutefois, les résultats sont présentés sous forme d'unité *step-pool* ou *step-cascade*. Ainsi, on obtient cinq unités *step-pool* et quatre unités *step-cascade* pour le torrent des Tours, huit unités *step-pool* et cinq unités *step-cascade* pour le torrent Armancette, dix unités *step-pool* pour le ruisseau Spruce, trois unités *step-pool* et trois unités *step-cascade* pour le ruisseau Portes de l'Enfer et cinq unités *step-pool* et une unité *step-cascade* pour le ruisseau Deloges. Le Tableau 3.1 présente le nombre de *steps* identifiés par cette technique.

La performance des différentes techniques est analysée selon la moyenne (%) du nombre de *steps* identifiés et bien localisés par rapport au nombre total de *steps* identifiés par chaque technique et selon, la moyenne (%) du nombre de *steps* identifiés et bien localisés par rapport au nombre de *steps* identifiés par la technique de classification (se référer à la méthodologie 2.2.3.1) (Tableau 3.2). La performance des différentes techniques est aussi analysée par l'efficacité et l'applicabilité selon le milieu. Ainsi, la technique d'identification visuelle sur le terrain, comme il a été mentionné dans la méthodologie, ne se prête pas bien au milieu de pente élevée montrant une désorganisation du lit ainsi qu'au cours d'eau comportant une morphologie mixte *step-cascade*. Toutefois, elle est facilement applicable aux milieux de *step-pool*. La technique du *zero crossing* ne s'applique pas à des milieux de pente élevée soit lorsqu'elle est supérieure à 8% dans notre cas. Cette technique identifie moins de 50% des *steps* pour les cinq sites, ce qui est le résultat le moins bon des cinq techniques. La technique de différence des formes du lit a identifié 50 à 75% des *steps* identifiés par la technique de

classification. Sa performance varie selon le milieu et la morphologie retrouvée. Ainsi, elle s'applique bien aux cours d'eau de pente modérée, n'ayant pas subi une désorganisation du lit telles que les ruisseaux Spruce et Deloges. Elle a donné de piètres résultats pour les deux torrents et le ruisseau Portes de l'Enfer en raison de la désorganisation de leur lit et de la présence de la morphologie mixte *step-cascade*. La technique de la pente critique donne de très bons résultats. Elle a permis d'identifier plus de 80% des *steps* reconnus par la technique de classification. Néanmoins, son problème réside dans le fait qu'elle n'assigne pas une morphologie au *step* identifié. Ainsi, si l'on veut seulement savoir où sont les *steps* ou le nombre de *steps* dans un cours d'eau, cette technique est appropriée. Toutefois, si l'on veut savoir à quelle morphologie appartient le *step*, il est recommandé d'utiliser la technique de classification. De plus, cette dernière technique s'applique bien aux cinq systèmes à l'étude ce qui évite d'avoir à utiliser plusieurs techniques selon le système. Toutefois, il faudrait tester la technique de classification sur un éventail de systèmes tel que les cours d'eau de seuil-mouille afin de valider son applicabilité et sa robustesse.

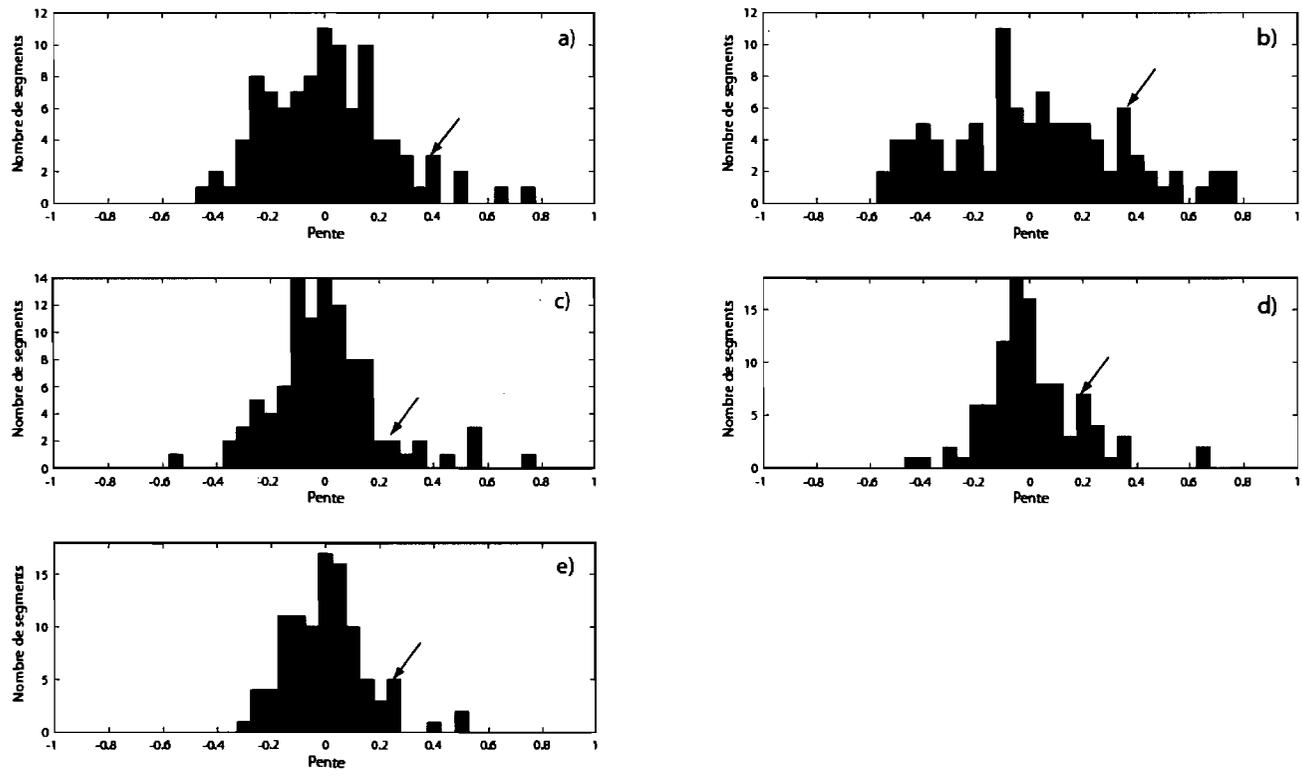
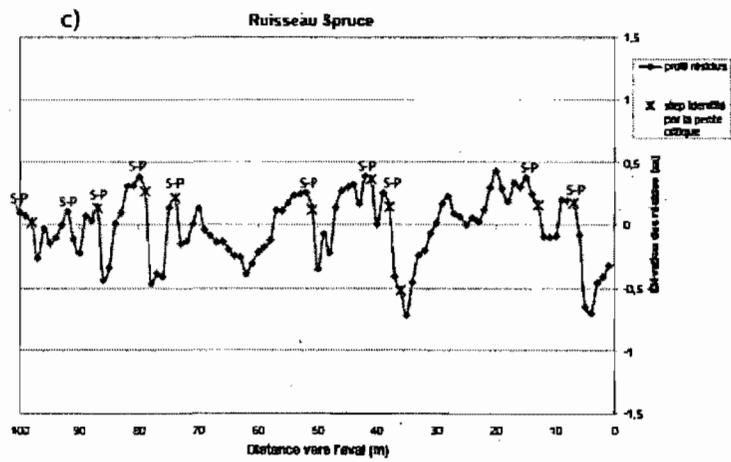
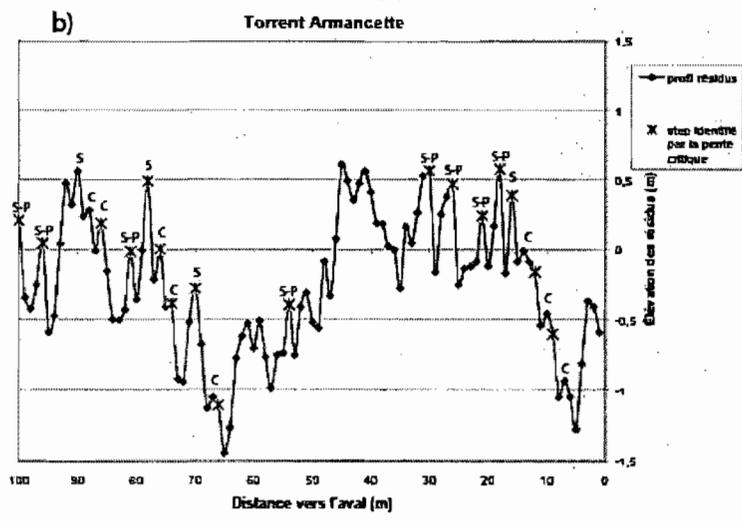
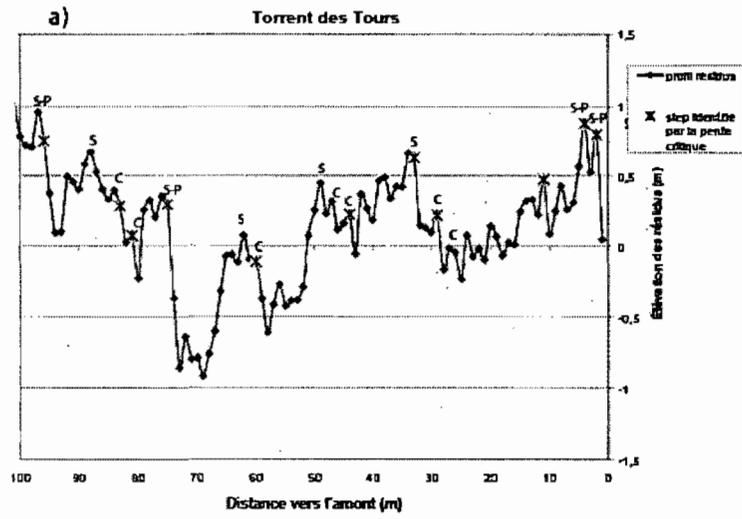


Figure 3.3 Histogrammes de toutes les pentes entre deux points adjacents de l'amont vers l'aval pour les cinq sites à l'étude. La pente critique de chaque site est identifiée par une flèche.



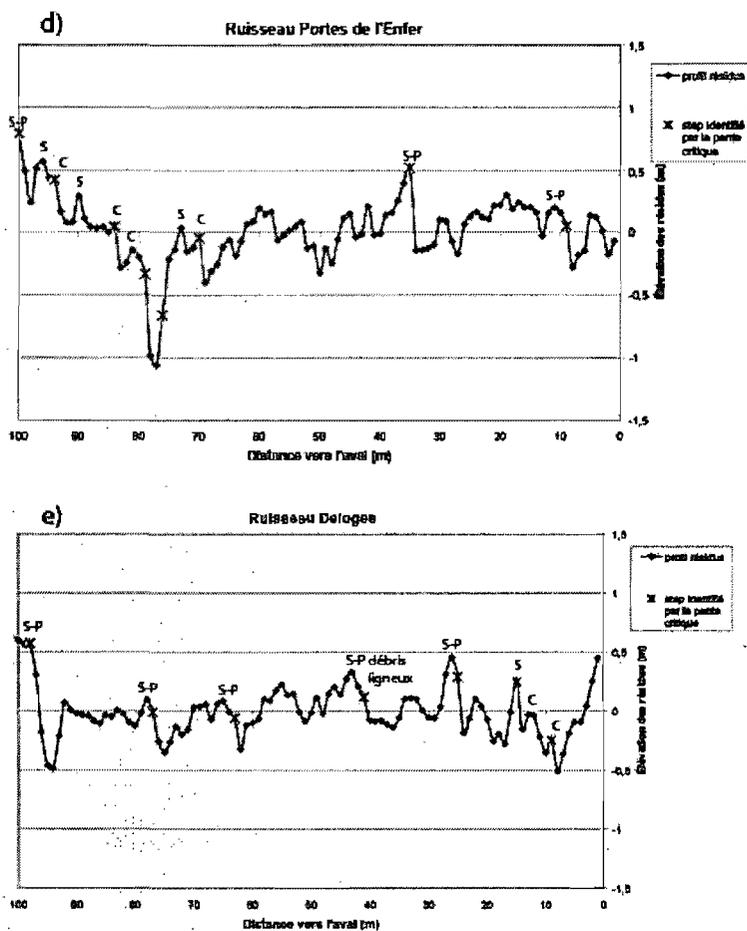


Figure 3.4 Identification des formes à l'aide des techniques de la pente critique et de la classification sur les profils des résidus du torrent des Tours (a), du torrent Armancette (b), du ruisseau Spruce (c), du ruisseau Portes de l'Enfer (d) et du ruisseau Deloges (e). Les *steps* identifiés par la pente critique sont marqués par un x. Les formes identifiées par la technique de la classification sont marquées par S-P pour les unités *step-pool* et S et C pour les unités mixte *step-cascade*.

	Formes	Identifi- cation visuelle	Zero <i>crossing</i>	Différence des formes du lit			Pente critique	Classi- fication
				0,85T	T	1,15T		
Torrent des Tours	S	---	8 (3)	8 (7)	7 (7)	6 (6)	12 (12)	16
	P	---	7 (2)	7 (6)	6 (5)	6 (5)	---	16
Torrent Arman- cette	S	---	10 (7)	15 (12)	11 (9)	10 (9)	17 (17)	20
	P	---	10 (7)	14 (9)	11 (9)	10 (8)	---	20
Ruisseau Spruce	S	10 (10)	10 (7)	15 (8)	12 (8)	10 (7)	10 (10)	10
	P	10 (10)	10 (9)	14 (9)	11 (9)	11 (9)	---	10
Ruisseau Portes de l'Enfer	S	10 (10)	11 (3)	15 (5)	11 (5)	8 (3)	8 (7)	10
	P	10 (10)	11(2)	17 (8)	11 (6)	10 (6)	---	10
Ruisseau Deloges	S	8 (8)	13 (5)	13 (7)	9 (6)	8 (6)	7 (7)	8
	P	8 (8)	12 (4)	12 (5)	9 (5)	8 (5)	---	8

Tableau 3.1 Nombre de *steps* (S) et de mouilles (P) identifiés selon la méthode utilisée soit l'identification visuelle, le *zero crossing*, la différence des formes du lit, la pente critique (Milzow, 2004) et la classification pour les cinq tronçons de rivière. Les résultats entre parenthèses sont le nombre de *steps* ou de mouilles qui ont été identifiés à la même localisation que les *steps* de la technique de classification.

Step	Identification visuelle	Zero <i>crossing</i>	Différence des formes du lit			Pente critique
			0,85 T	T	1,15T	
(P1)	100	48,7	69,3	58,9	75,7	97,5
(P2)	100	43,3	64,3	58,7	51,5	83,5

Tableau 3.2 Moyenne des pourcentages de performance pour quatre techniques soit l'identification visuelle sur le terrain, le *zero crossing*, la différence des formes du lit et la pente critique. Deux pourcentages ont été calculés pour chaque technique. Le premier pourcentage (P1) est la moyenne du nombre de *steps* identifiés et bien localisés divisé par le nombre total de *steps* identifiés. Le deuxième pourcentage (P2) est le nombre de *steps* identifiés et bien localisés divisé par le nombre de *steps* identifiés par la technique de classification.

## 3.2. Géométrie

### 3.2.1. Relations géométriques

Les analyses porteront sur un total de 31 unités *step-pool* et 13 unités *step-cascade*. Le Tableau 3.3 présente les différentes variables décrivant la géométrie et les dimensions des unités morphologiques de chaque site. Tout d'abord, on constate que les valeurs de longueur d'onde calculées par la technique de Zimmermann et Church (2001) sont similaires à celles obtenues à partir de la technique de Chartrand et Whiting (2000). Le ratio H/L qui indique le degré d'inclinaison, varie de 0,06 à 0,09 pour les unités *step-pool* et de 0,11 à 0,12 pour les unités *step-cascade*. Le degré d'inclinaison obtenu pour les unités *step-pool* est faible si on le compare à ce que l'on retrouve dans la littérature où on rapporte des valeurs variant entre 0,06 à 0,2 avec une valeur médiane de 0,1 (Chin et Wohl, 2005). La longueur d'onde des unités *step-pool* est trois à cinq fois plus grande que la longueur d'onde des unités *step-cascade*. La hauteur des unités *step-pool* est deux fois plus élevée que la hauteur des unités *step-cascade*. Le ratio LW diminue avec la pente et il est inférieur ou égal à 1 pour les deux torrents tandis qu'il est supérieur à 1 mais inférieur à 4 pour les trois ruisseaux. Ainsi, nos résultats concordent avec ceux des études précédentes. La hauteur des *steps* des unités *step-pool* est de trois à quatre fois plus élevée que le  $D_{84}$  et de 0,2 à 0,5 fois moins élevée que le  $D_{max}$  tandis que la hauteur des *steps* des unités *step-cascade* est de 1 à deux fois plus élevée que le  $D_{84}$  et de 0,1 à 0,3 fois moins élevé que le  $D_{max}$ .

Les relations géométriques diffèrent pour les unités *step-pool* et *step-cascade*. Les résultats sont présentés sous forme de deux matrices de corrélation soit pour les unités *step-pool* (Tab. 3.4) et pour les unités *step-cascade* (Tab. 3.5). Pour les

unités *step-pool*, la pente est positivement corrélée à la taille des particules avec des coefficients de corrélation de 0,84 et 0,89 pour le  $D_{\max}$  et  $D_{84}$ , respectivement. De ce fait, la pente du chenal est fortement liée à la rugosité du lit par l'importance que jouent les *roches d'ancrage* de forte taille. Aussi, la pente est fortement corrélée négativement ( $r = -0,75$ ) avec la longueur d'onde ce qui concorde avec les observations rapportées dans la littérature. Toutefois, la pente est davantage corrélée ( $r = -0,93$ ) avec le ratio  $L/W$ . Ainsi, l'ajustement entre les formes du lit et les variables de la géométrie hydraulique du cours d'eau ne se fait pas seulement entre la longueur d'onde et la pente mais aussi avec la largeur du chenal. La hauteur des *steps* est fortement corrélée négativement avec le ratio  $L/W$  ( $r = -0,81$ ) et positivement avec la largeur du chenal ( $r = 0,98$ ). Ainsi, plus le ratio  $L/W$  est faible plus la hauteur des *steps* sera élevée et, on retrouve les formes à plus forte dénivelée dans les cours d'eau ayant un ratio  $L/W$  inférieur à 1 soit les cours d'eau ayant une morphologie combinée de *step-pool* et de cascade. La relation est très faible entre la longueur d'onde et la hauteur des unités *step-pool* ( $r = -0,18$ ) ce qui veut dire qu'il n'y a pas d'ajustement direct entre la hauteur des formes et la distance entre celles-ci. À l'opposé, on obtient une corrélation élevée entre la hauteur et la longueur d'onde ( $r = 0,91$ ) des unités *step-cascade*. Ainsi, l'ajustement des formes n'est pas gouverné par les mêmes variables pour la morphologie *step-pool* et la morphologie mixte *step-cascade*. La hauteur des unités *step-pool* et des unités *step-cascade* est corrélée avec le  $D_{84}$  ( $r = 0,86$  et  $0,71$  respectivement) alors que la relation est faible avec le  $D_{\max}$  ( $r = 0,41$  et  $-0,10$  respectivement).

L'ensemble de ces relations montre que la plupart des variables sont reliées entre elles. Cela supporte l'idée émise par plusieurs chercheurs qu'il est difficile d'établir les liens directs entre les différentes variables et d'isoler l'impact d'une seule variable sur la morphologie. Néanmoins, la présence de deux morphologies dans

les cours d'eau étudiés permet de discerner les différences entre les systèmes et ainsi de mieux comprendre quelle variable influence davantage un système que l'autre malgré le nombre total de systèmes relativement faible. Il ressort que les variables utilisées permettent de mieux décrire la géométrie des *step-pools* que celle des *step-cascades*. En effet pour les *step-pools* le rôle du  $D_{84}$  semble très marqué.

	Torrent des Tours	Torrent Armancette	Ruisseau Spruce	Ruisseau Portes de l'Enfer	Ruisseau Deloges
<b>Unités</b>					
Lu (m) z.c.	10,96 (5,09)	12,89 (7,14)	11,10 (7,4)	17,32 (12,7)	16,03 (4,98)
Lu (m) c.w.	10,95	12,88	11,10	17,29	16,02
Hu (m)	0,72 (0,28)	0,86 (0,40)	0,59 (0,25)	0,66 (0,21)	0,62 (0,28)
Hu/Lu	0,08 (0,03)	0,09 (0,06)	0,08 (0,04)	0,07 (0,03)	0,06 (0,02)
<b>Step-cascade</b>					
Lc (m) z.c.	2,85 (1,05)	4,81 (1,36)		4,22 (2,38)	3,03 (1,27)
Lc (m) c.w.	2,83	4,79		4,20	3,01
Hc (m)	0,32 (0,12)	0,46 (0,19)		0,36 (0,26)	0,33 (0,10)
Hc/Lc	0,12 (0,04)	0,11 (0,05)		0,12 (0,10)	0,12 (0,08)
Ls/Lc	3,87	2,69		4,11	5,32
Hs/Hc	2,25	1,87		1,83	1,88
$D_{max}$ (m)	3,8	2,29	2	1,6	1,1
$D_{84}$ (m)	0,22	0,26	0,20	0,17	0,18
W (m)	10	19	6	7	6
Pente (S)	0,43	0,37	0,15	0,09	0,08
Ls/W	1,09	0,68	1,85	2,47	2,67
Hs/ $D_{84}$	3,28	3,31	2,95	3,88	3,44
Hc/ $D_{84}$	1,45	1,77		2,11	1,83
Hs/ $D_{max}$	0,19	0,37	0,29	0,41	0,54
Hc/ $D_{max}$	0,08	0,20		0,22	0,3

Tableau 3.3 Moyenne (écart type) des variables géométriques pour chaque site. Lu et Hu correspondent à la longueur d'onde et la hauteur des unités *step-pool* tandis que Lc et Hc correspondent à la longueur d'onde et la hauteur des unités *step-cascade*. Les deux séries de valeurs pour Ls et Lc correspondent à la longueur d'onde selon Zimmermann et Church (z.c.) (2001) et Chartrand et Whiting (c.w.) (2000).

	H	L	W	L/W	tan $\theta$	D84	Dmax
H	1,00	-0,18	0,98**	-0,81*	0,75	0,86*	0,41
L		1,00	-0,27	0,72	-0,75	-0,62	-0,74
W			1,00	-0,84*	0,72	0,92*	0,34
L/W				1,00	-0,93**	-0,96**	0,73
tan $\theta$					1,00	0,84*	0,89*
D84						1,00	0,54
Dmax							1,00

Tableau 3.4 Matrice de corrélation (r de Pearson) entre les variables décrivant la géométrie des unités *step-pool* pour les cinq sections (n=5, \*=significative à 0,05 et \*\* = significative à 0,01).

	H	L	W	tan $\theta$	D84	Dmax
H	1,00	0,91*	0,88	0,29	0,71	-0,10
L		1,00	0,67	0,06	0,41	-0,24
W			1,00	0,72	0,92*	0,34
tan $\theta$				1,00	0,84	0,89*
D84					1,00	0,54
Dmax						1,00

Tableau 3.5 Matrice de corrélation (r de Pearson) entre les variables décrivant la géométrie des unités *step-cascade* pour les cinq sections (n=4, \*=significative à 0,05 et \*\* = significative à 0,01).

### 3.2.2. Périodicité des *steps*

Comme le montrent les diagrammes à la Figure 3.5, l'analyse spectrale de la périodicité des *steps* ne donne pas de résultats très concluants puisqu'aucun pic ne dépasse l'intervalle de confiance de 95%. On peut expliquer ce résultat par le faible nombre de points mesurés le long des profils ainsi que par la forte variation de la hauteur des *steps*. Ainsi, l'utilisation d'analyses d'autocorrélation sur des systèmes ayant une morphologie mixte *step-cascade* ou ayant des *steps* encore en formation (pas à leur pleine hauteur) ne semble pas adéquate.

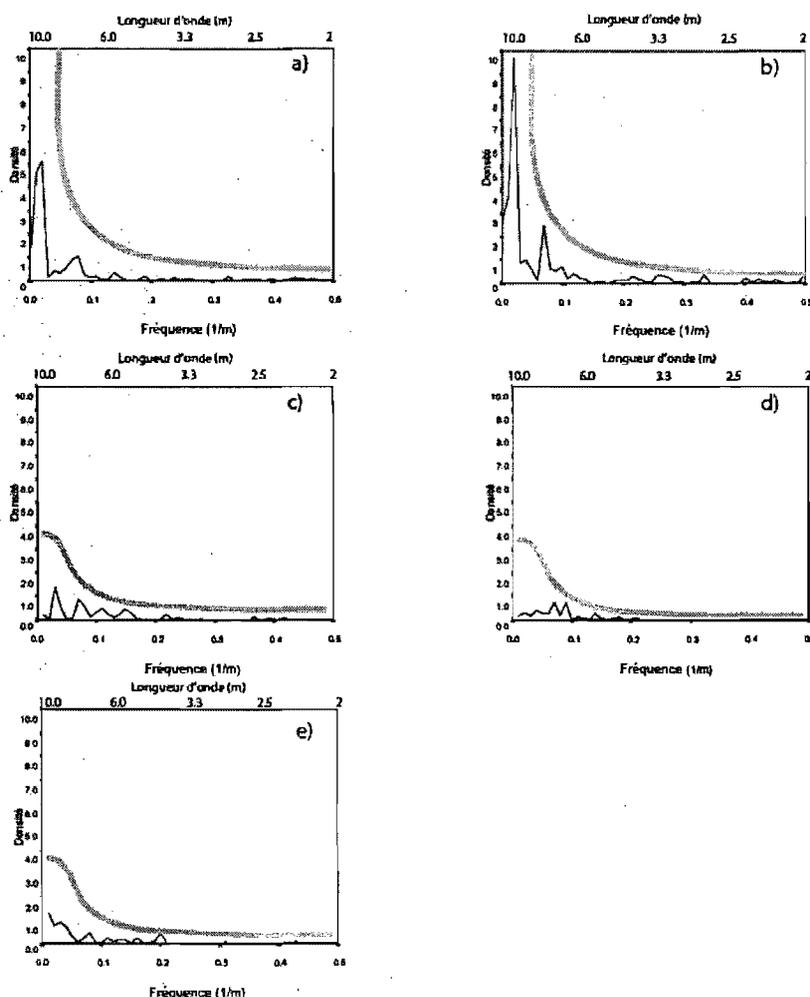


Figure 3.5 Analyse spectrale pour le torrent des Tours (a), le torrent Arnancette (b), le ruisseau Spruce (c), le ruisseau Portes de l'Enfer (d) et le ruisseau Deloges (e). La ligne grise indique l'intervalle de confiance de 95%.

Les diagrammes de dispersion de la hauteur des *steps* en fonction de l'espacement des *steps* (Fig. 3.6) montrent qu'il ne semble pas y avoir une tendance régulière au positionnement d'un *step*. De plus, selon l'espacement, la hauteur des *steps* varie beaucoup ce qui supporte l'idée que les analyses d'autocorrélation ne sont peut-être pas idéales dans des milieux de morphologies mixtes. Même pour le ruisseau Spruce qui a uniquement une morphologie de *step-pool*, on retrouve une dispersion importante de la hauteur des *steps*. Ainsi, on constate que 77% des *steps* des deux torrents et des ruisseaux Spruce et Portes de l'Enfer se forment suivant un espacement variant entre 2 et 10 mètres et une hauteur variant entre 0,30 et 0,90 mètres. Les autres *steps* se forment selon une hauteur variant entre 0,30 et 1,5 mètres et un espacement supérieur à 10 mètres. Le ruisseau Deloges, quant à lui, présente une dispersion des *steps* très variable ce qui peut être un effet de la présence de débris ligneux dans les *steps*. Toutefois, la distance entre deux *steps* n'est jamais inférieure à 2 mètres pour tous les sites ce qui laisse présumer que la zone d'exclusion décrite par Giménez-Curto et Corniero (2006) est de +/- 2 mètres. La dispersion de l'espacement entre les *steps* est aussi représentée sous forme d'histogrammes (Fig. 3.7 a à e). Les histogrammes montrent que la distribution de l'espacement entre les *steps* pour les deux torrents et les ruisseaux Spruce et Portes de l'Enfer est unimodale autour de la valeur de 5 mètres tandis que le ruisseau Deloges présente une distribution polymodale avec un faible mode à 10 et un autre à 20. De plus, aucun site ne présente une distribution normale qui est un indicateur de la formation périodique d'une ondulation ce qui implique que les cinq systèmes ne répondent pas à la théorie de l'antidune.

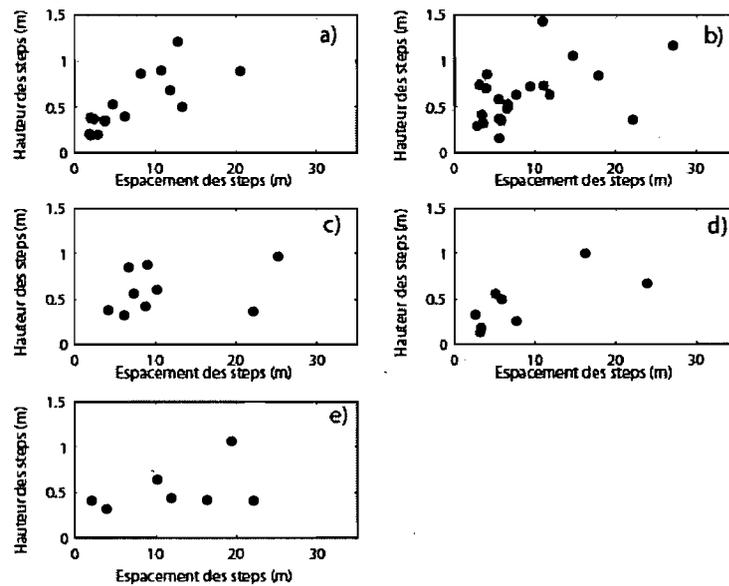


Figure 3.6 Dispersion des *steps* selon l'espacement et la hauteur pour le torrent des Tours (a); le torrent Armancette (b), le ruisseau Spruce (c), le ruisseau Portes de l'Enfer (d) et le ruisseau Deloges (e). Les *steps* utilisés sont ceux des *step-cascades* et *step-pools*.

#### Histogramme de distribution de l'espacement entre les *steps* de chaque site

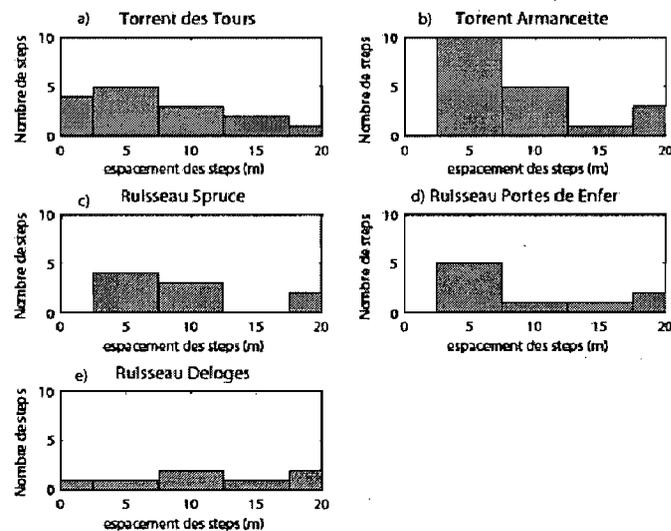


Figure 3.7 Histogramme de l'espacement entre les *steps* pour le torrent des Tours (a), le torrent Armancette (b), le ruisseau Spruce (c), le ruisseau Portes de l'Enfer (d) et le ruisseau Deloges (e). Les *steps* utilisés sont ceux des deux morphologies.

Selon Lenzi (2001), la relation de  $H/L=cS$  où  $S=\sin\theta$  informe sur le degré de stabilité ou de désorganisation du cours d'eau. Lenzi a obtenu un ratio  $H/L$  inférieur à  $S$  après un événement de crue important tandis qu'avant cet événement le ratio  $H/L$  était supérieur à  $S$ . Nos résultats concordent avec ces observations comme le montre le Tableau 3.6 puisque nous obtenons un ratio inférieur à 1 pour les deux torrents et le ruisseau Portes de l'Enfer et un ratio supérieur à 1 pour les ruisseaux Spruce et Deloges. Ce ratio permet aussi de vérifier si la distance entre les *steps* est conforme à ce que prédit la théorie de la résistance d'Abrahams *et al* (1995). Ces derniers ont conclu que le paramètre  $c$  d'une unité *step-pool* où la résistance à l'écoulement est maximisée et l'espacement des éléments morphologiques du lit est régulier, varie entre  $1 \leq (H/L)/S \leq 2$ . Dans un contexte de l'évolution des chenaux, cette géométrie idéalisée sera atteinte durant les dernières phases d'évolution des *steps* une fois les mouilles en place. La Figure 3.8 intègre nos résultats à ceux présentés par Abrahams *et al.* (1995) et plusieurs autres chercheurs en ce qui concerne la théorie de la résistance maximale. On remarque que trois des cinq sites étudiés se trouvent sous la limite inférieure de la résistance maximale donnée par la ligne pointillée et que les deux torrents se situent dans la zone des résultats obtenus par D'Agostino et Lenzi (1997).

Torrent des Tours	Torrent Armancette	Ruisseau Spruce	Ruisseau Portes de l'Enfer	Ruisseau Deloges
0,53	0,43	1,22	0,62	1,09

Tableau 3.6 Estimation du paramètre  $c$  dans  $H/L = cS$  pour les cinq sites d'étude.

En somme, la formation des *steps* des cinq systèmes à l'étude ne répond pas au deux théories principales de la formation des *steps*. Au contraire, l'espacement entre les *steps* suit plutôt une distribution aléatoire et ceci augmente lorsque le ruisseau a subi une désorganisation du lit suite à une crue importante. Ainsi, malgré les différents milieux des cinq systèmes à l'étude, la formation des *steps* semble correspondre à une combinaison de processus différents.

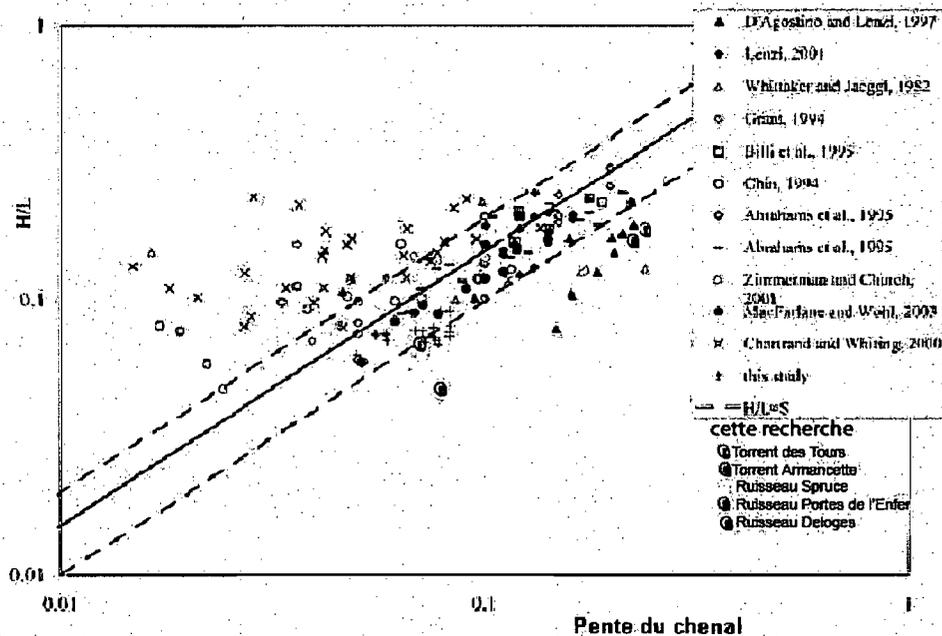


Figure 3.8 Relation entre la pente et la résistance maximale proposée par Abrahams *et al.* (1995) à partir de données sur la hauteur (H) et l'espacement entre les *steps* (L) en fonction de la pente mesurées en laboratoire et en milieu naturel (d'après Currant et Wilcock, 2005).

### 3.3. Hydraulique et formes du lit

#### 3.3.1. Coupes transversales

L'analyse de l'hydraulique en relation avec les formes du lit donne des résultats forts intéressants. Tout d'abord, les résultats se rapportant aux ratios moyens de la vitesse et de la largeur entre les coupes transversales situées à la crête du *step* et au point le plus profond de la mouille sont chiffrés au Tableau 3.7. L'analyse des changements des formes en rapport avec l'écoulement relève que le ratio de la vitesse est supérieur à 1 pour les cinq sections ce qui indique une décélération de la vitesse vers l'aval (passage de la crête du *step* à la mouille). La décélération est davantage prononcée pour le torrent des Tours et les ruisseaux Spruce et Deloges avec des valeurs de 1,62, 1,80 et 1,61 respectivement.

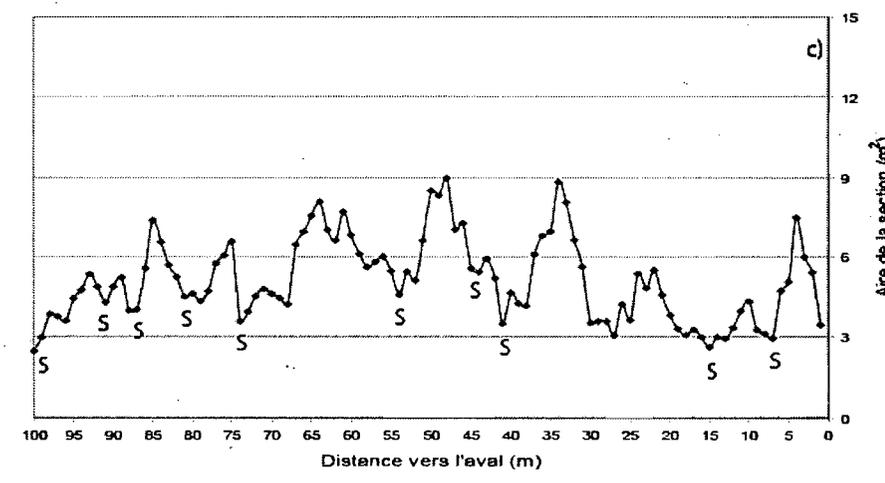
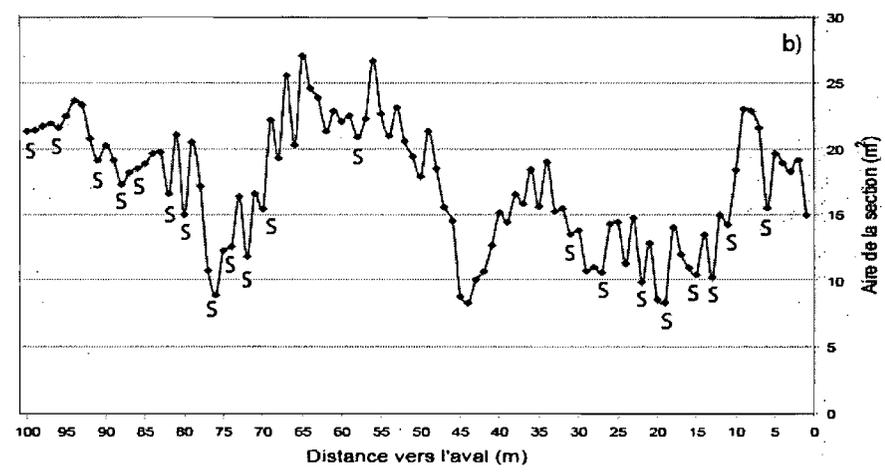
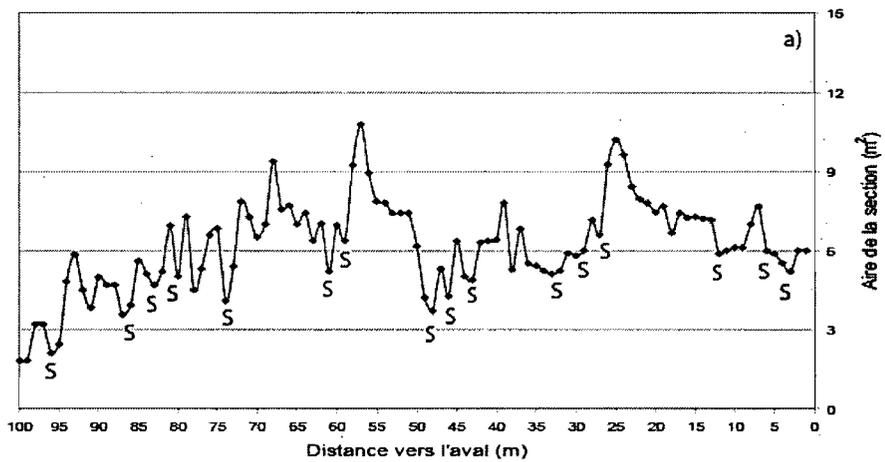
	Torrent des Tours	Torrent Armancette	Ruisseau Spruce	Ruissau Portes de l'Enfer	Ruisseau de Deloges
<b>a</b>	1,62	1,19	1,80	1,26	1,61
<b>Wp/Wc</b>	1,25	1,07	1,45	1,04	1,25

Tableau 3.7 Ratios moyens de la vitesse et de la largeur selon deux emplacements sur les formes soit la crête du *step* et le point le plus profond de la mouille. a correspond à  $w_i d_i / w_j d_j$ , Wp à la largeur au niveau de la mouille et Wc la largeur au niveau de la crête du *step*.

Ainsi, on peut croire qu'il existe un lien entre l'hydraulique, la stabilité du chenal et la pente tel que le ratio de la vitesse augmente lorsque la stabilité combinée avec la pente sont élevées. Néanmoins, le torrent Armancette n'a pas un ratio aussi élevé malgré sa forte pente. Ceci pourrait s'expliquer par l'effet de la plus grande largeur du chenal qui dissipe davantage ou minimise les variations hydrauliques le long des formes. Ainsi, le torrent Armancette qui est le plus large des cinq tronçons obtient le ratio de la vitesse le plus bas avec 1,19. Le ruisseau Portes de l'Enfer obtient le deuxième plus bas ratio de vitesse avec 1,26. Le ratio peut s'expliquer par la faible organisation des formes du cours d'eau. Le ratio de la largeur est lui aussi lié à la stabilité des formes du lit et, il varie en concordance avec le ratio de la vitesse. Plus la décélération de l'écoulement est marquée, plus l'expansion du chenal vers l'aval est importante. L'expansion du chenal correspond aussi aux endroits où l'on retrouve les mouilles le long des profils. Les mouilles correspondent à des zones où l'aire de la section est plus grande tandis que les *steps* correspondent à des zones où l'aire est restreinte ou plus petite et ce, pour les cinq systèmes. Sur la Figure 3.9, qui représente l'aire des coupes transversales en fonction de la distance pour les cinq cours d'eau, on remarque que l'aire varie selon qu'elle est estimée pour une mouille ou pour un *step*. Ainsi, l'aire diminue au niveau des *steps* et augmente au niveau des mouilles.

Si on examine les variations des aires des coupes transversales le long des segments de chacun des systèmes à l'étude (Figure 3.9) on constate plusieurs différences. Tout d'abord, le profil des aires du ruisseau Spruce est celui où la variation est la plus faible soit entre 3 et 9 m<sup>2</sup>. De plus l'aire des coupes transversales située aux *steps* ne dépasse pas un seuil de 5 m<sup>2</sup>. De ce fait, une séquence assez régulière de zones d'accélération et décélération de l'écoulement entre les *steps* et les mouilles correspondrait aux fluctuations de l'aire des coupes à la Figure 3.9 (c). Ceci est visible à la Figure 3.1 (c) où les variations de la largeur et de la profondeur sont nettes. Le torrent Armancette présente le profil où la variation est la plus grande soit entre 7 et 27 m<sup>2</sup> (Fig. 3.9 b). Cette observation est aussi visible sur la Figure 3.1 (b). De plus, à plusieurs endroits sur le profil, là où la morphologie *step-cascade* est présente, le changement entre l'aire du *step* et celle de la mouille en aval est presque nulle. Ainsi, la décélération de l'écoulement est souvent très faible au passage des deux formes. De plus, l'aire des coupes transversales se situant au niveau des bancs est supérieure au reste du profil. Ainsi, de 100 à 80 mètres et de 65 à 45 mètres, l'aire est supérieure à 16 et 20 m<sup>2</sup>, respectivement. Cette tendance à l'élargissement au niveau des bancs serait due à la faible résistance à l'écoulement qu'engendre cette forme. Le torrent des Tours quant à lui présente un profil des aires variant entre 2 et 11 m<sup>2</sup> (Fig. 3.9 a). On constate que l'aire des sections augmente vers l'aval pour les *step-cascades* ce qui implique que le premier *step* de la forme en *step-cascade* a une aire transversale plus petite que le dernier *step* de celle-ci. En examinant la Figure 3.1 (a) et la Figure 3.9 (a), on constate que les variations de l'aire des coupes transversales sont bien visibles sur le MNE. Le ruisseau Portes de l'Enfer présente un profil des aires variant entre 0,50 et 12 m<sup>2</sup> avec une forte tendance à la décroissance vers l'aval (Fig. 3.9 d). Les aires très faibles obtenues entre 100 et 92 m sont dues à la présence de deux *steps* de hauteur presque égale au niveau plein bord. À ces endroits, le postulat d'un niveau plein bord horizontal ne tient

probablement pas. La variation de l'aire d'une coupe à l'autre immédiatement en aval est souvent faible. De plus, si on met en relation la Figure 3.1 (d) avec le profil d'aire on constate que la zone au milieu du segment présente sur le MNE (longue zone d'élévation inférieure à 0 mètre) est aussi visible sur le profil d'aire. Ainsi, cette zone présente une faible variabilité de l'aire des coupes transversales due à la désorganisation du lit qui n'engendre pas d'ajustement en largeur du cours d'eau. De plus, on retrouve seulement une forme, le *step-pool*, dans cette zone qui induit un léger élargissement du cours d'eau. Finalement, le ruisseau Deloges présente un profil des aires variant entre 2 et 10 m<sup>2</sup> (Fig. 3.9 e). On constate que de 25 à 0 m, le profil est différent que de 100 à 25 m comme sur la Figure 3.1 (d) où la zone aval est beaucoup plus profonde et régulière que la zone amont. Ainsi la section aval du profil où l'on retrouve la morphologie mixte *step-cascade* n'a pas la même hydraulique que la section amont du profil où l'on retrouve la morphologie *step-pool*. Dans ce sens, les zones d'accélération et de décélération sont beaucoup plus prononcées dans les sections de morphologie *step-pool* que de morphologie mixte *step-cascade*. Ceci est perceptible dans les quatre systèmes présentant les deux morphologies.



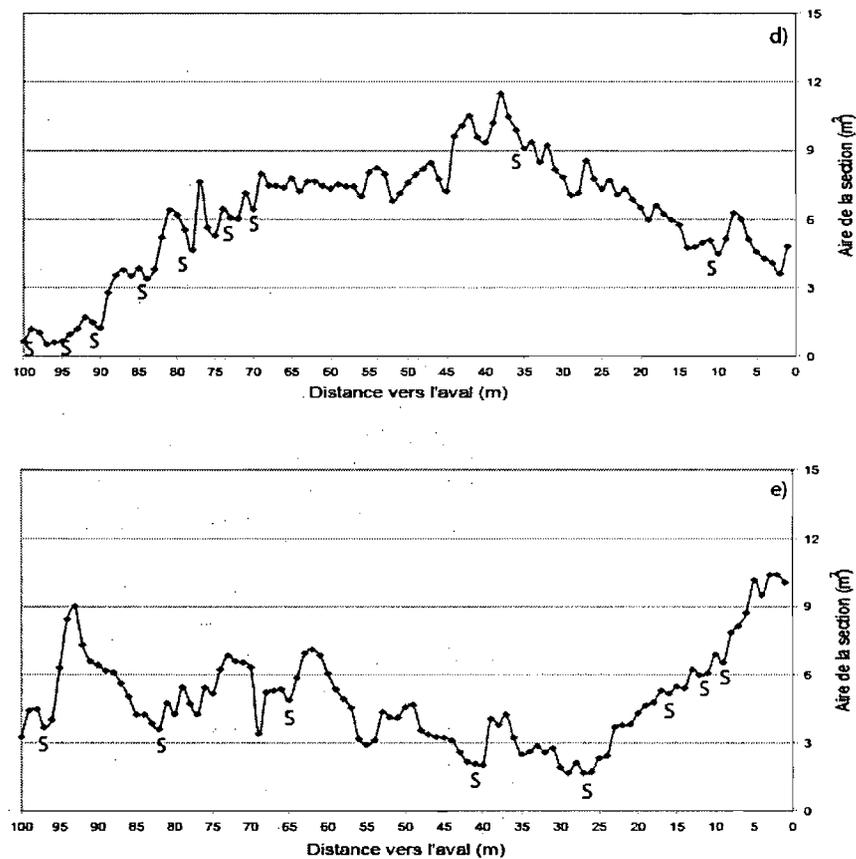


Figure 3.9 Diagramme représentant l'aire de la section en fonction de la distance vers l'aval pour le torrent des Tours (a), le torrent Armancette (b), le ruisseau Spruce (c), le ruisseau Portes de l'Enfer (d) et le ruisseau Deloges (e). L'aire de la section est calculée pour chaque coupe transversale selon  $Wd = A$ . Les *steps* identifiés par la technique de classification sont représentés par un S.

L'analyse de la symétrie des coupes transversales donne des résultats qui sont difficiles à interpréter. Le Tableau 3.8 présente les moyennes et les écarts type des ratios de la symétrie. On constate que les trois ruisseaux ont tendance à être symétriques pour les deux types de forme avec des valeurs variant entre 0,87 et 1,22 et que les deux torrents présentent une asymétrie soit vers la gauche ou vers la droite avec des valeurs variant entre 0,54 et 1,69. Si on compare ces résultats en intégrant les caractéristiques du milieu dans notre analyse on constate que les différences d'asymétrie sont liées à la pente. Ainsi, plus la pente augmente, plus le cours d'eau devient asymétrique.

	Torrent des Tours	Torrent Armancette	Ruisseau Spruce	Ruissau Portes l'Enfer	Ruisseau de Deloges
<b>Step</b>	1,69 (0,83)	0,64 (0,18)	1,22 (0,37)	1,03 (0,39)	0,97 (0,18)
<b>Mouille</b>	1,39 (0,63)	0,54 (0,14)	1,08 (0,47)	0,87 (0,26)	1,06 (0,27)

Tableau 3.8 Moyenne (écart-type) des ratios de la symétrie selon la forme soit le *step* et la mouille.

Pour résumer l'ensemble des résultats, les points suivants sont les plus importants. Tout d'abord, les techniques couramment utilisées pour détecter les formes à partir du profil longitudinal des cours d'eau donnent des résultats mitigés. La technique de la pente critique donne les meilleurs résultats mais elle ne peut distinguer les différentes morphologies présentes dans les cours d'eau. Nous avons élaboré la technique de classification pour détecter les éléments morphologiques du lit car elle permet d'identifier clairement les *steps* d'un cours d'eau et de leur attribuer une morphologie spécifique et ce, sur une variété de systèmes. À partir de la localisation des *steps* sur un tronçon, on peut déterminer la distance entre les *steps* et leur hauteur. La mise en relation de ces deux variables avec la pente du chenal, la largeur du chenal, le ratio L/W et la taille des

sédiments a permis de montrer que ce ne sont pas les mêmes variables qui gouvernent ou influencent la morphologie *step-pool* et la morphologie *step-cascade*. En effet, la morphologie *step-pool* semble s'ajuster selon la hauteur des *steps* et la largeur du cours d'eau tandis que la morphologie mixte *step-cascade* s'ajuste selon la hauteur des *steps* et la longueur d'onde des formes. Nous arrivons aux mêmes conclusions lorsque l'on analyse les variations des coupes transversales ou les MNE. Enfin, l'espacement entre les *steps* des cinq rivières n'est pas périodique mais aléatoire ce qui signifie que la formation des *steps* n'est pas bien prédite par la théorie de la formation de la résistance maximale ou la théorie de l'antidune. La présence de roches d'ancrage dans les *steps* laisse supposer qu'un mécanisme de congestion des blocs ou obstacles a favorisé l'emplacement et la formation des *steps* pour les cinq cours d'eau. Finalement, les cinq systèmes à l'étude présentent une variété d'états de stabilité qui ont un effet sur les composantes géométriques des formes et les composantes hydrauliques du cours d'eau. La désorganisation du lit atténue l'effet de l'écoulement sur le lit et sur ses variations transversales tandis qu'une organisation du lit ou des formes bien développées augmente l'impact de l'écoulement sur les variations transversales de la forme.

## 4. Discussion

Cette étude nous a fourni une information détaillée sur la morphologie en *step-pool* et en cascade de cinq cours d'eau de pente variant entre 8% et 43%. Ces informations ont été collectées à partir d'un échantillonnage systématique de la topographie du lit du cours d'eau. Les objectifs de l'étude étaient de tester différentes techniques d'identification des formes élaborées jusqu'à aujourd'hui sur une variété de systèmes, d'identifier les caractéristiques des unités *step-pools*, de décrire la géométrie des formes et les relations géométriques entre les variables. Cette étude a aussi permis d'examiner l'applicabilité des différentes théories sur la périodicité des *step-pools* et de développer des outils d'analyse intégrant l'ensemble des informations topométriques recueillies sur le terrain. À notre connaissance, il s'agit d'une des premières études qui documente de manière systématique différents cours d'eau ayant des pentes aussi fortes et des milieux aussi variés soit les Alpes françaises et le Québec. Elle se distingue aussi des précédentes recherches par l'apport d'information sur la morphologie mixte *step-cascade* notamment sur leur géométrie et sur les variables qui jouent sur leur formation. Notre recherche fournit une méthodologie pour l'élaboration d'un protocole de recherche sur des cours d'eau ayant une morphologie de *step-pool* ou de cascade. Dans cette discussion, nous aborderons les aspects reliés au protocole de recherche, à la morphologie mixte *step-cascade*, aux variables de contrôle et d'ajustement morphologique et à la stabilité des cours d'eau montagneux.

### 4.1. Protocole et identification des formes du lit

Notre étude a permis de cerner les points importants à considérer pour l'identification des formes du lit en proposant un protocole de recherche qui peut

être utilisé dans n'importe quel milieu (montagneux pour notre recherche) et sur une variété de pentes. Nous avons montré que l'uniformisation d'un protocole de recherche permet d'extraire les mêmes données tant sur un cours d'eau ayant une pente de 43% qu'un cours d'eau ayant une pente de 8%. De plus, les étapes de notre protocole de recherche sont simples et faciles à appliquer ce qui permet aux chercheurs une économie de temps dans l'élaboration des campagnes de terrain. Le protocole de cette recherche se divise en trois parties soit le choix du site, l'échantillonnage systématique et l'échantillonnage des particules du lit. Le choix du site dépend des raisons de l'étude. Dans notre cas, la pente et le milieu étaient les facteurs avec le plus de poids pour le choix des sites. Un point très important lors du choix du site est de décrire l'état de stabilité du cours d'eau soit de connaître la date et l'intensité des événements de crue sur une dizaine d'années ou au moins de connaître le moment de la dernière crue mobilisatrice de l'ensemble du lit. La période d'une dizaine d'années fait suite aux résultats de plusieurs études qui ont rapporté que le cours d'eau prend moins de dix ans pour retrouver sa stabilité initiale après une crue organisatrice (Lenzi, 2001, Madej, 1999, 2001, Wohl, 2000). La stabilité du cours d'eau permet de mieux comprendre le développement des formes et par le fait même la géométrie du lit. De plus, en précisant l'état du cours d'eau à l'étude on évite une mauvaise interprétation des relations géométriques.

Notre protocole utilise un échantillonnage systématique par coupes transversales au niveau plein bord avec une distance entre les coupes qui tient compte de la distance entre les mouilles (une à quatre fois la largeur du chenal dans un milieu de pente élevée). La longueur de la zone d'échantillonnage doit être choisie afin d'avoir un nombre d'unités *step-pool* satisfaisant (minimum de 4 unités *step-pool*) et en tenant compte de la distance moyenne entre les mouilles selon la morphologie du milieu. Ainsi, il aurait probablement été préférable d'allonger les

sections si l'étude s'était concentrée sur des analyses d'autocorrélation spatiale, afin d'avoir un nombre d'unités *step-pool* plus élevé. Un relevé de la topographie à l'aide de coupes transversales est avantageux sur plusieurs points. Tout d'abord il n'est pas dépendant du débit du cours d'eau au contraire de l'échantillonnage du profil longitudinal qui demande une certaine quantité d'eau afin de pouvoir identifier le talweg clairement. Aussi, la méthode peut être exécutée sur des pentes très élevées et des milieux désorganisés. Nous avons montré que l'échantillonnage du profil du talweg est difficile et même irréalisable sur des pentes élevées ou un cours d'eau désorganisé comme sur les deux torrents où le talweg n'a pu être identifié par l'opérateur sur le terrain. L'exécution de coupe transversale minimise l'erreur sur la mesure lors de l'identification du talweg, car elle est objective et utilise une extraction des points les moins élevés de chaque coupe. De plus, nous avons montré que le profil du talweg, obtenu à partir d'une extraction des points du talweg le long de coupes transversales donne la même précision qu'un échantillonnage du profil longitudinal par bris de pente. Étant relevées au niveau plein bord, les coupes transversales permettent aussi d'extraire de l'information sur l'hydraulique et le comportement du cours d'eau. Finalement, l'échantillonnage systématique a permis de tester les différentes techniques d'identification du lit car les trois techniques demandaient un intervalle régulier entre les points d'échantillonnage. Néanmoins, l'échantillonnage systématique par coupes transversales présente quelques désavantages. Ainsi, la position des coupes transversales ne se situe pas toujours sur les paramètres géométriques importants des formes ce qui a un impact sur l'estimation de L ou H des *steps*. Toutefois, en choisissant une distance entre les coupes transversales de 1 mètre ou de courte longueur on minimise cet impact car on obtient de 1 à 3 points sur chaque forme. La méthode de l'échantillonnage systématique par coupes transversales requiert plus de temps dans l'exécution du relevé topographique et davantage de manipulations informatiques qu'un simple relevé du profil longitudinal. Finalement,

l'échantillonnage des particules du lit se fait selon la méthode de Wolman (1954), en mesurant la longueur de l'axe B (axe intermédiaire).

L'applicabilité des quatre techniques d'identification des éléments morphologiques du lit dépend principalement du milieu, de la pente et de l'organisation du lit du cours d'eau. Ainsi, la technique d'identification visuelle sur le terrain est difficile à réaliser sur des cours d'eau ayant une désorganisation du lit et une morphologie mixte. La technique du zero crossing ne s'applique pas à des milieux de pente élevée ou à des milieux ayant une morphologie de *step-pool* et cascade. La performance de la technique de différence des formes du lit varie selon le milieu et la morphologie retrouvée. Ainsi, elle s'applique bien aux cours d'eau de pente modérée, n'ayant pas subi une désorganisation mais donne de piètres résultats sur des cours d'eau ayant subi une désorganisation de leur lit et où il y a présence de la morphologie mixte *step-cascade*. La technique de la pente critique donne de très bons résultats sur tout type de cours d'eau et de pente. Ainsi, nous avons aussi pu tester la technique de la pente critique sur des pentes plus élevées que celles retrouvées par Milzow (2004). L'utilisation d'une pente critique pour l'identification des *steps* bien qu'appropriée aux milieux de pentes élevées ne permet pas de savoir à quelle morphologie appartient le *step*, la technique de la pente critique ne peut être utilisée.

#### **4.2. Morphologie mixte *step-cascade***

C'est à partir de la technique de classification, élaborée dans cette recherche, que nous avons réussi à identifier la morphologie mixte *step-cascade*. Ainsi, dans des milieux de pentes élevées, on ne retrouve pas seulement la morphologie en *step-pool* mais aussi la morphologie en cascade et, étant donné que ces deux morphologies n'ont pas les mêmes caractéristiques géométriques et hydrauliques,

il devient important de pouvoir associer à quel type de morphologie appartient le *step*. De plus, cette classification du *step* permet de mieux comprendre les ondulations sur les profils des résidus des cours d'eau. Ainsi, les ondulations qui se suivent mais qui n'oscillent pas autour de zéro ne sont pas nécessairement des roches isolées mais correspondent peut-être à la morphologie mixte *step-cascade*. Nous avons établi les critères de classification selon les caractéristiques propres aux deux morphologies. Cette classification du *step* se fait comme suit : Une unité *step-pool*, sur les profils des résidus, correspond à un changement d'élévation positif d'une hauteur supérieure au  $D_{84}$  (représentant la hauteur moyenne du *step*, Ashida et al., 1984, Tatsuzawa et al., 1999), suivie d'une mouille où le changement d'élévation est négatif. Une unité mixte *step-cascade* présente un *step* d'une hauteur supérieure ou inférieure au  $D_{84}$  suivi d'une mouille de faible profondeur ou de deux points adjacents d'élévation presque similaires suivie d'une ou plusieurs autres chutes correspondant à la cascade.

La morphologie mixte *step-cascade* que l'on retrouve dans quatre des cinq tronçons de rivière de cette recherche n'a pas beaucoup été étudiée jusqu'à maintenant. Montgomery et Buffington (1997), Grant *et al.* (1990) et Church et Zimmermann (2007) ont abordé le sujet assez superficiellement en parlant d'une alternance entre la morphologie en *step-pool* bien définie et la cascade moins bien définie. De plus, dans la littérature on affirme que la cascade se trouve généralement en tête de bassin et se forme à un gradient de pente supérieur à 22% (Grant et al., 1990) ou un gradient de pente supérieur à 20% (Church et Zimmermann, 2007). Notre recherche innove sur ce sujet car elle approfondit les caractéristiques de cette catégorie morphologique qui est présente dans quatre des cinq tronçons à l'étude. Ainsi, à partir de ces résultats nous pouvons dire que la morphologie mixte *step-cascade* est associée à un cours d'eau ayant subi des transformations ou un événement de crue important et peut se former sur des

tronçons ayant des gradients de pente très variés soit entre 8% et 43% dans notre cas. Toutefois, nos résultats montrent que cette morphologie est susceptible de se développer davantage lorsque le tronçon a un gradient de pente élevée. De ce fait, nous avons identifié quatre unités de morphologie mixte *step-cascade* pour le torrent des Tours (S=43%) et cinq unités pour le torrent Armancette (S=37%) tandis que l'on a identifié seulement trois unités pour le ruisseau Portes de l'Enfer (S=9%) et une unité pour le ruisseau Deloges (S=8%). Ce dernier fait exception puisque celui-ci n'a pas subi de crue perturbatrice depuis plusieurs années. Dans ce cas, la présence de la morphologie mixte *step-cascade* pourrait s'expliquer par la présence de débris ligneux dans la partie aval de la section étudiée. Les débris ligneux influencent ou augmentent la désorganisation du lit (Montgomery *et al.* 1995) et de ce fait peuvent promouvoir la formation d'une morphologie mixte *step-cascade*. Par contre, on ne retrouve pas cette morphologie dans le ruisseau Spruce (S=15%) qui présente l'état de stabilité le plus élevé avec 10 unités *step-pool* et un rapport H/L = 1,22S.

D'après nos observations, la morphologie mixte *step-cascade* serait une forme intermédiaire qui à long terme peut se développer en une morphologie *step-pool*. Cette interprétation concorde avec les résultats de Lenzi (2001) qui a noté la création d'une morphologie mixte *step-cascade* après un évènement d'une récurrence de 30 ans. Par la suite, cette morphologie s'est redéveloppée en une morphologie *step-pool*. Ainsi, la morphologie mixte *step-cascade* pourrait être vue comme un passage vers la morphologie en *step-pool*. Le surcreusement graduel de la mouille causant un affouillement en aval du *step* peut être un facteur pouvant engendrer le passage d'une morphologie à l'autre. Dans le même ordre d'idées, on pourrait supposer que l'affouillement graduel de la mouille pourrait causer l'effondrement des particules formant un des *steps* de la cascade et ainsi permettre le passage de la morphologie mixte *step-cascade* vers la morphologie

en *step-pool*.

Il est important de mieux approfondir cette morphologie et de mieux la définir parce qu'elle est une partie importante de l'organisation du chenal. La géométrie de ces unités est différente de la géométrie des *step-pools*. Tout d'abord, la hauteur des unités mixte *step-cascade* est deux fois plus petite que dans le cas de la morphologie *step-pool*. La longueur d'onde est de 3 à 5 fois plus courte ce qui confère à la morphologie mixte *step-cascade* un escarpement plus raide au niveau du *step*. Ainsi, le paramètre d'escarpement  $c$  est supérieur pour les unités *step-cascade* que pour les unités *step-pool*. Malgré sa précarité de formation la morphologie mixte *step-cascade* apparaît comme une forme stable. De plus, cette morphologie a un plus grand impact sur l'hydraulique du cours d'eau que la morphologie en *step-pool* car la résistance à l'écoulement  $\gamma$  sera plus élevée étant donné que la distance entre les formes est plus courte et régulière. Ainsi, l'énergie dissipée par la morphologie mixte *step-cascade* sera elle aussi plus élevée. La Figure 4.1 schématise ce concept qui s'explique par l'équation :

$$PE = \frac{h_s}{\text{relief}_{\text{total}}}$$

où PE correspond à la mesure du potentiel de dissipation de l'énergie et  $h_s$  le ratio du changement d'élévation cumulé de la surface de l'eau au-dessus des *steps*. Ainsi, les *steps* causent des dénivellations topographiques verticales du cours et lorsque l'écoulement circule sur et à travers les *steps* et plongent dans les mouilles, une grande partie de l'énergie est dissipée. Dans ce sens, la dénivellation est beaucoup plus accentuée pour la morphologie mixte *step-cascade* ce qui suppose que l'énergie  $\gamma$  sera davantage dissipée. Normalement, cette énergie est convertie en énergie cinétique et aide au transport des sédiments ou à l'érosion. Subséquemment, on retrouvera moins de transport de sédiments dans les unités *step-cascade* où il faudra un évènement de force supérieure ayant



de la mouille est plus large qu'au niveau du *step*. Ceci s'explique par un ajustement de la largeur dû à la décélération que subit la vitesse au passage entre le *step* et la mouille. De plus, nous obtenons une très faible relation entre la hauteur et la longueur d'onde des formes mais une forte relation positive entre la hauteur et la largeur ce qui indique que l'ajustement des formes du lit est lié à plusieurs variables et en particulier au  $D_{84}$ . Dans ce sens, il est difficile d'identifier les variables morphologiques et hydrauliques les plus importantes dans le contrôle et le développement des formes du lit. Tel que proposé par Chin (1999) et selon nos résultats, nous estimons que l'hydraulique et la taille des particules sont des contrôles directs de la forme du lit et que la hauteur et la longueur d'onde sont des variables d'ajustement. Ceci expliquerait pourquoi la longueur d'onde n'est pas corrélée à la hauteur mais plutôt à la pente et à la taille des sédiments et pourquoi les corrélations mettant en relation la pente ou la taille des sédiments avec les autres variables sont toutes élevées.

La morphologie mixte *step-cascade* ne présente pas les mêmes contrôles que la morphologie *step-pool*. C'est pourquoi la morphologie mixte *step-cascade* présente une forte relation positive entre la hauteur et la longueur d'onde contrairement à la morphologie en *step-pool* qui ne présente pas de relation. Cette forte relation laisse supposer que l'hydraulique n'a pas encore débuté son rôle de contrôle ou d'ajustement des formes du lit. De ce fait, les variations presque nulles de l'aire des coupes transversales entre les *steps* et les mouilles de la morphologie *step-cascade* supposent aussi cette observation. Ainsi, la morphologie mixte *step-cascade* est davantage contrôlée par l'emplacement des *roches d'ancrage* que par l'hydraulique.

#### 4.4. Formation et stabilité

La formation des *steps* des cinq sites à l'étude semble dépendre de la localisation des *roches d'ancrage* dans le cours d'eau. Cette observation fait suite aux résultats des analyses de la périodicité des *steps* qui montrent que la position des *steps* est aléatoire dans les cinq cours d'eau. En conséquence, la formation des *steps* des cinq cours d'eau ne se fait pas suivant la théorie de l'antidune ou de la résistance maximale qui toutes deux suggèrent un espacement régulier des éléments morphologiques du lit.

Curran et Wilcock (2005) et Curran (2007) ont proposé que la formation des *steps* est rarement le résultat de seulement un mécanisme de formation ce qui semble concorder avec nos résultats. Le développement des formes du lit des cinq cours d'eau à l'étude est dû en partie au mécanisme de surcreusement autour d'un *keystone* ainsi que du mécanisme de congestion des blocs ou obstacles. En effet, la totalité des *steps* dans notre étude sont formés d'un *keystone* entouré de particules plus petites. De plus, pour les deux torrents, certaines roches d'ancrage sont complètement dénudés ce qui laisse croire qu'un mécanisme de surcreusement ou d'exhumation a eu lieu suite à la forte crue. Les résultats du calcul de la résistance maximale montrent que cette théorie doit être appliquée sur des cours d'eau ayant atteint un état de stabilité important. Comme Lenzi (2001), nous croyons que l'évolution du facteur d'escarpement démontre que les conditions de résistance maximale sont graduellement atteintes à la fin d'un cycle d'évènement de crues ordinaires. Ainsi, trois des cinq cours d'eau étudiés sont en période d'ajustement ce qui se reflète dans le comportement des variables de longueur d'onde et de hauteur des *steps*. De plus, Church et Zimmermann (2007) ont expliqué les faibles valeurs du facteur d'escarpement par le fait que le *step* ne contrôle pas entièrement l'escarpement du cours d'eau. En effet, il existe une zone

de pente du lit positive entre la fin de la mouille et le *step* en aval qui est intégrée dans le calcul de la longueur d'onde entre deux *steps* mais qui minimise l'escarpement du cours d'eau. Nous avons aussi observé la présence de cette zone sur les cinq cours d'eau à l'étude. Toutefois, cette zone ne se voit pas dans les cascades puisque les *steps* formant cette morphologie se situent directement en aval de la fin de la mouille. Ainsi, il serait préférable d'ajouter la hauteur de cette zone au calcul de l'escarpement ou d'utiliser la longueur de la mouille au lieu de la longueur d'onde entre deux *steps*. Finalement, Chin (1998) a évalué la stabilité des *steps* en fonction de la mobilité des particules qui forment le *step*. Elle a établi une relation directe entre la taille de la plus grosse particule qui forme le *step* et la stabilité de la forme. Si on applique cette notion aux sites à l'étude, on constate que les *steps* des cascades devraient être plus instables que les *steps* des *step-pools* étant donné que ce sont de plus petites particules qui les forment. Toutefois, la taille des particules n'est pas la seule caractéristique dont il faille tenir compte si on veut quantifier l'état de stabilité. Il faut aussi considérer l'historique du cours d'eau, la disponibilité des sédiments et les formes en place. Ainsi, on pourrait proposer une progression des cinq cours d'eau à l'étude selon la stabilité des formes et de la pente:

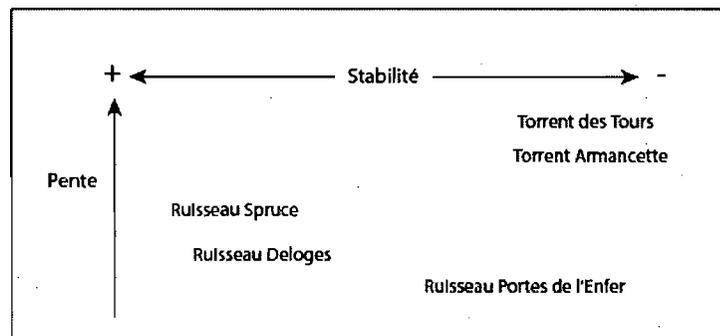


Figure 4.2 Progression des cinq cours d'eau à l'étude selon la stabilité et la pente.

Le ruisseau Spruce est le plus stable des systèmes avec une morphologie *step-pool* bien développée. Le ruisseau Deloges suit en deuxième. Il est un peu moins

stable que le premier à cause de la présence de débris ligneux qui cause la formation de la morphologie mixte *step-cascade*. Le ruisseau Portes de l'Enfer est le troisième dans la progression. Le passage d'une crue à l'été 2005 a causé une désorganisation du lit et une instabilité des formes. Les deux torrents sont les systèmes les plus instables en raison du passage de la crue de 2005 ainsi que de la forte présence de la morphologie mixte *step-cascade* dans les formes du lit. Ainsi, les ruisseaux Spruce et Deloges sont les systèmes qui résisteront le mieux aux changements hydrauliques et sédimentaires en raison de la stabilité des formes du lit tandis que les formes du lit des deux torrents seront plus facilement remaniés.

## Conclusion

Cette étude répond à plusieurs questions concernant les cours d'eau de montagne et fournit une gamme d'informations sur la morphologie mixte *step-cascade*. Principalement, ce mémoire procure une méthodologie fondée sur l'uniformisation d'un protocole de recherche utilisant un échantillonnage systématique par coupes transversales. Cette méthodologie a été testée sur cinq systèmes ayant des pentes variant entre 8% et 43% et des états de stabilité différents. Ces différents systèmes ont permis de distinguer les variations hydrauliques et géométriques au sein des deux morphologies soit le *step-pool* et le *step-cascade*. Les contributions de ce mémoire sont les suivantes :

- 1) L'échantillonnage systématique par coupes transversales est indépendant du débit du cours d'eau, peut être exécuté sur des pentes très élevées et des milieux désorganisés, minimise l'erreur sur la mesure lors de l'identification du talweg et est objectif.
- 2) La présence de différentes morphologies et états de stabilité dans les cours d'eau de montagne introduit une complexité dans le lit qui n'est pas identifiable selon les techniques élaborées jusqu'à maintenant. La technique de classification, contourne ce problème en identifiant tous les *steps* et en associant à quelle morphologie ils appartiennent.
- 3) La morphologie mixte *step-cascade* est associée à un cours d'eau ayant subi des transformations ou un événement de crue important. Elle se développe sur une variété de pentes (8% et plus) mais davantage sur des pentes fortes. La morphologie mixte *step-cascade* serait une forme

intermédiaire qui à long terme, peut se développer en une morphologie *step-pool*.

- 4) La morphologie mixte *step-cascade* offre une plus grande résistance à l'écoulement que la morphologie en *step-pool* car elle présente une dénivellation verticale du lit plus élevée. Subséquemment, on retrouvera moins de transport de sédiments au niveau de la morphologie mixte *step-cascade* où il faudra un événement de force supérieure ayant une quantité d'énergie assez grande pour engendrer le transport.
- 5) La morphologie mixte *step-cascade* est contrôlée majoritairement par les particules formant les *steps* tandis que la morphologie *step-pool* est contrôlée par l'hydraulique, la taille des particules et l'emplacement des *roches d'ancrage*. La hauteur et la longueur d'onde sont des variables d'ajustement pour les deux morphologies.
- 6) La formation des *steps* des cinq sites à l'étude est aléatoire et dépend de la localisation des *roches d'ancrage*. La formation des formes du lit sur les cinq cours d'eau à l'étude est due en partie au mécanisme de surcreusement autour d'un *keystone* ainsi que du mécanisme de congestion des blocs ou obstacles.

Les contributions de ce mémoire montrent qu'il est important d'uniformiser les protocoles de recherche concernant l'étude des cours d'eau de montagne car il reste beaucoup d'informations à comprendre de ces systèmes. La morphologie mixte *step-cascade* devrait être étudiée plus en profondeur afin de bien cerner les différences et similitudes avec la morphologie *step-pool*. Néanmoins, cette recherche donne plusieurs informations afin d'orienter les recherches futures.

Ainsi, l'étude des processus de formation, d'ajustement et de contrôle devrait être une orientation future.

Les connaissances acquises dans ce mémoire peuvent aussi être des outils très utiles dans les domaines de l'aménagement, la géomorphologie fluviale et l'écologie. Dans ce sens, l'aménagement des cours d'eau de montagne par l'utilisation de *step-pools* pourrait être plus efficace si on dispose des relations géométriques entre les principales variables et si on connaît les interactions entre les processus à partir de recherche sur des cours d'eau naturel tel que celle-ci.

## Bibliographie

Abrahams, A.D., Li, G. et Atkinson, J. 1995. *Step-pool* streams: Adjustment to maximum flow resistance. *Water Resources Research* **31** (10): 2593-2602

Ashida, K., Takahashi, T. et Sawada, T. 1976. Sediment yield and transport in a mountainous small watershed. *Disaster Prevention Research Institute Bulletin*, **26**: 119-144.

Ashida, K., Egashira, S. et Ando, N. 1984. Generation and geometric features of step-pool bed forms. *Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Annals* **27**: 341-353.

Billi, P., Hey, R.D. et Thorne, C.R. (eds). 1992. Dynamics of gravel-bed rivers, John Wiley and Sons, Chichester.

Billi, P., D'Agostino, D.V., Lenzi, M.A. et Marchi, L. 1995. Bed and suspended load measurements, slope and channel processes in a high altitude alpine torrent. Papier présenté au *3th International Workshop on Gravel-bed rivers*, Washington, 21-26 Août.

Bravard, J.-P. et Petit, F. 1997. Les cours d'eau : dynamique du système fluvial. Armand Colin/Masson, Paris, 222p.

Brummer, C.J. et Montgomery D.R. 2003. Downstream coarsening in headwater channels. *Water Resources Research* **39**(10): 1294.

Buffington, J.M., Lisle, T.E., Woodsmith, R.D. et Hilton S. 2002. Controls on the size and occurrence of pools in coarse-grained forest rivers. *River Research and Applications* **18**: 507-531.

Chartrand, S.M. et Whiting P.J. 2000. Alluvial architecture in headwater streams with special emphasis on step-pool topography. *Earth Surface Processes and Landforms* **25**: 583-600.

Chin, A. 1989. Step-pool in stream channels. *Progress in Physical Geography*, **13**: 391-407.

- Chin, A. 1994. Toward a theory for step-pools in mountain streams. *Thèse de doctorat, Arizona State University, Arizona.*
- Chin, A. 1998. On the Stability of Step-Pool Mountain Streams. *The Journal of Geology*, **106**: 59-69.
- Chin, A. 1999. The morphologic structure of step-pools in mountain streams. *Geomorphology*, **27**: 191-204
- Chin, A. 2002. The periodic nature of step-pool mountains streams. *American Journal of Science*, **302**: 144-167.
- Chin, A. et Wohl, E.E. 2005. Toward a theory for step-pools in stream channels. *Progress in Physical Geography*. **29**(3): 275-296.
- Chin, A. et Phillips, J.D. 2007. The self-organization of step-pools in mountain streams. *Geomorphology*, **83**: 346-358.
- Church, M. et Jones D. 1982. Channel bars in gravel bed rivers. In R.D. Hey, J.C. Bathurst et C.R. Thorne (eds). *Gravel-bed rivers, fluvial process, engineering and management*. Wiley, Chichester, pp. 291-339.
- Church, M. et A. Zimmermann. 2007. Form and stability of step-pool channels: Research progress, *Water Resources Research*, **43**, W03415, doi:10.1029/2006WR005037.
- Comiti, F. 2003. Local scouring in natural and artificial step-pool systems. *Thèse de doctorat, Università degli studi di padova, Padova.*
- Comiti, F. Andreoli, M.A. et Lenzi, M.L. 2005. Spatial density and characteristics of woody debris in five mountain rivers of the Dolomites (Italian Alps). *Geomorphology*, **78**: 44-63.
- Curran, J. 2007. Step-pool formation models and associated step spacing. *Earth Surface Processes and Landforms*, **32**: 1611-1627.
- Curran, J. et Wohl, E.E. 2003. Large woody debris and flow resistance in step-pool channels, Cascade Range, Washington. *Geomorphology*, **51** (1-2): 141-157.

Curran, J. et P.Wilcock, 2005. Characteristic dimensions of the step-pool configuration: An experimental study. *Water resources research*, **41**(2): W0201-0215.

De Jong, C. et Ergenzinger, P. 1992. Unsteady flow, bedload transport and bed roughness responses in steep mountain torrents. *Proceeding of the 5th International Symposium on River Sedimentation, Karlsruhe*, **1**: 185-193.

Duckson, W. Jr. et Duckson L.J. 1995. Morphology of bedrock step-pool systems. *Water Resources Bulletin*, **31**: 43-51.

Duckson, W. D. Jr et Duckson L.J. 2001. Channel bed steps and pool shapes along Soda Creek, Three Sisters Wilderness, Oregon. *Geomorphology*, **38**: 267-279.

Egashira, S. et Ashida, K. 1991. Flow resistance and sediment transportation in streams with step-pool morphology. In A. Armanini et G. Di Silvio (eds.), *Fluvial hydraulics of mountain regions. Lecture Notes in Earth Sciences*, Springer-Verlag, New York, pp. 45-58.

Ergenzinger, P. 1992. Riverbed adjustments in a step-pool systems: Lainbach, upper Bavaria. In P. Billi, R.D. Hey, C.R. Thorne et P. Tacconi (eds.), *Dynamics of gravel-bed rivers*. John Wiley and Sons, Chichester, pp.416-427.

Faustini, J.M. et Jones, J.A. 2003. Influence of large woody debris on channel morphology and dynamics in steep, boulder-rich mountain streams, western Cascades, Oregon. *Geomorphology*, **51**: 187-205.

Giménez-Curto, L.A. et Corniero, M.A. 2006. Comment on 'Characteristic dimensions of the step-pool bed configuration : An experimental study' by Joanna C. Curran and Peter R. Wilcock. *Water Resources Research*, **42**, W03601,doi :10.1029/2005WR004296.

Golden et Springer (2006). Channel geometry, median grain size, and stream power in small mountain streams. *Geomorphology*, **78**: 64-76.

Gomi, T., Sidle, R.C., Woodsmith, R.D. et Bryant, M.D. 2003. Characteristics of channel steps and reach morphology in headwater streams, southeast Alaska. *Geomorphology*, **51**: 225-242.

Grant, G.E. 1994. Hydraulics and sediment transport dynamics controlling step-pool formation in high gradient streams: A flume experiment. In P. Ergenzinger et K.-H. Schmidt (eds), *Dynamics and geomorphology of mountain rivers*. Springer, New York, pp. 241-250.

Grant, G.E. 1997. Critical flow constrains flow hydraulics in mobile-bed streams: a new hypothesis. *Water Resources Research*, **33** (2): 349-358.

Grant, G.E., Swanson, F.J. et Wolman M.G. 1990. Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, Western Cascades, Oregon. *Geological Society of America Bulletin*, **102**: 340-352.

Grant, G.E. et Mizuyama, T. 1991. Origin of step-pool sequences in high gradient streams: A flume experiment. In *Proceedings of the Japan-U.S. workshop on Snow Avalanche, Landslide, and Debris flow prediction and control*. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Tsubuka, pp. 523-532.

Halwas, K.L. et Church M. 2002. Channel units in small, high gradient streams on Vancouver Island, British Columbia. *Geomorphology*, **43**: 243-256

Hayward, J.A. 1980. Hydrology and stream sediment from Torlesse Stream catchment. In: Special Publication 17, *Tussock Grasslands and Mountain lands Institute*, Lincoln College, Canterbury, New Zealand.

Heede, B.H. 1981. Dynamics of selected mountain streams in the western United States of America. *Zeitschrift für Geomorphologie*, **25**: 17-32.

Hey, R.D., Thorne, C.R. et Bathurst, J.C. (eds). 1982. *Gravel-bed rivers*, John Wiley and Sons, Chichester, 1982.

Judd, H.E. 1964. A study of bed characteristics in relation to flow in rough, high-gradient natural channels: *Ph.D thesis, Logan, Utah*, 182 p.

Keller, E.A. et Melhorn, W.N. 1978. Rhythmic spacing and origin of pools and riffles. *Geological Society of America Bulletin*, **89**: 723-730.

Keller, E.A. et Swanson, F.J. 1979. Effects of large organic material on channel form and fluvial processes. *Earth Surface Processes and Landforms*, **4**:361-380.

Kennedy, J.F. 1963. The mechanism of dunes and antidunes in erodible-bed channels. *Journal of Fluid Mechanics*, **16**(4): 521-544.

Lamarre, H. 2006. Le transport des sédiments, les structures sédimentaires et la stabilité dans les cours d'eau de morphologie en step-pool. *Thèse de doctorat. Université de Montréal, Montréal.*

Lamarre, H. et Roy, A.G. 2001. Organisation morphologique des blocs et des amass de galets dans les cours d'eau à lit de graviers. *Géographie Physique et Quaternaire*, **55**: 275-287.

Lamarre, H., Roy, A.G. et MacVicar, B. 2005. Using PIT tags to investigate sediment transport in gravel-bed rivers. *Journal of Sedimentary Research*, **75**(4): 736-741

Lamarre, H. et Roy, A.G. 2008. The role of morphology on the displacement of particles in a step-pool river system, *Geomorphology*, **99**(1-4): 270-279.

Lee, A.J. et Ferguson, R.I. 2002. Velocity and flow resistance in step-pool. *Geomorphology*, **46**: 59-71.

Legendre, P. et Fortin, M.J. 1989. Spatial pattern and ecological analysis. *Vegetatio*, **80**: 107-138.

Lenzi M.A. 2001. Step-pool evolution in the Rio Cordon, Northeastern Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, **26**: 991-1008.

Lenzi, M.A. et Comiti, F. 2003. Local scouring and morphological adjustments in steep channels with check-dam sequences. *Geomorphology*. **55**(1-4): 97-109.

Lin, Z. et Ogushi, t. 2006. DEM analysis on longitudinal and transverse profiles of steep mountainous watersheds, *Geomorphology*, **78**: 77-89.

Lisle, T.E. 1986. Effects of woody debris on anadromous salmonid habitat, Price of Wales Island, southeast Alaska, N. Am. *J. Fish. Management*, **6**: 538-550.

Lisle, T.E. 1987. Channel morphology and sediment transport in steep-land streams. In *Erosion and sediment transport in pacific rim steep-lands. International Association of Hydrological Science Publications*, **132**: 1-15.

MacFarlane, W.A. et Wohl, E.E. 2003. Influence of step composition on step geometry and flow resistance in step-pool streams of the Washington Cascades. *Water Resources Research*, **39**(2), 1037, doi:10.1029/2001WR001238.

Madej, M.A. 1999. Temporal and spatial variability in thalweg profiles of a gravel-bed river. *Earth Surface Processes and Landforms*, **24**: 1153-1169.

Madej, M.A. 2001. Development of channel organization and roughness following sediment pulses in single-thread, gravel bed rivers. *Water Resources Research*, **37**: 2259-2272.

Milne, J.A. 1982. Bed material size and the riffle-pool sequence, *Sedimentology*, **29**: 267-278.

Milzow, C. 2004. The step-pool morphology of steep mountain stream. *Thèse de doctorat, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich*.

Milzow, C., Molnar, P., W. McArdell, B. et P. Burlando. 2006. Spatial organization in the step-pool structure of a steep mountain stream (Vogelbach, Switzerland), *Water Resources Research*, **42**, W04418, doi: 10.1029/2004WR003870.

Montgomery, D.R., Buffington, J.M., Smith, R.D., Schmidt, K.M. et Pess, G. 1995. Pool spacing in forest channels. *Water Resources Research*, **31**(4): 1097-1105.

Montgomery, D.R. et Buffington J.M. 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, **109**(5): 596-611.

Nickolotsky, A. et Pavlowsky, R.T. 2006. Morphology of step-pools in a wilderness headwater stream: The importance of standardizing geomorphic measurements. *Geomorphology*, **83**: 294-306.

O'Neill, M.P. et Abraham, A.D. 1984. Objective identification of pools and riffles. *Water Resources Research*, **20**(7): 921-926.

Rosgen, D.L. 1994. A classification of natural rivers, *Catena*, **22**: 169-199.

Rosport, M. 1994. Stability of torrent beds characterised by step pool texture. *Journal of Sedimentary Research*, **9**(3): 124-132.

Richards, K.S. 1976. The morphology of riffle-pool sequences. *Earth Surface Processes*, **1**:71-88.

Rickenmann, D. 1997. Sediment transport in Swiss torrents. *Earth Surfaces Processes and Landforms*, **22**: 937-951.

Rickenmann, D. 2001. Comparison of bed load transport in torrents and gravel bed streams. *Water Resources Research*, **37**: 3295-3305.

Sear, D.A. 1996. Sediment transport processes in pool-riffle sequences. *Earth surfaces Processes and Landforms*, **21**: 241-262.

Scherrer, B. 1984. Biostatistique, Gaëtan Morin éditeur, Montréal, 847 p.

Tatsuzawa, H., Hayashi, H. et Hasegawa, K. 1999. Role of heterogeneous property of bed materials in the formation of step-pool systems in mountain streams. *J. Hydrosoci. Hydraul. Eng.*, **17**: 37-45.

Thompson, D.M. 2006. Changes in pool size in response to a reduction in discharge: A flume experiment. *River Research and Applications*, **22**: 343-351.

Thompson, C.J.; Croke, J., Ogden, R. et Wallbrink, P. 2006. A morpho-statistical classification of mountain stream reach types in southeastern Australia. *Geomorphology*, **81**: 43-65.

Thompson, C., Croke, J. et Takken, I. 2007. A catchment-scale model of mountain stream channel morphologies in southeast Australis. *Geomorphology*, **95**:119-144.

Thorne, C.R., Bathurst et Hey, R.D. (eds). 1987. Sediment transport in gravel-bed rivers, John Wiley and Sons, Chichester.

Whiting, P.J. et Bradley, J.B. 1993. A process-based classification system for headwater streams. *Earth Surface Processes and Landforms*, **18**: 603-612.

Whittaker, J. G. 1987, Sediment transport in step-pool streams, in *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*, edited by C. R. Thorne, et al., John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England, pp. 545-570.

Whittaker, J.G. et Jaeggi, M.N.R. 1982. Origin of step-pool systems in mountain streams. *Journal of Hydraulic Division, American Society of Civil Engineers*, **108**(HY6) 758-773.

Wilcox, A.C. et Wohl, E.E. 2006. Flow resistance dynamics in step-pool stream channels : 1. Large woody debris and controls on total resistance, *Water Resources Research*, **42**, W05418, doi :10.1029/2005WR004277.

Wolman, M.G. 1954. A method of sampling coarse river-bed material. *Transactions, American Geophysical Union*, **35**(6): 951-956.

Wohl, E.E. 2000. Mountain Rivers, *Water Resources monograph Series*, **14**, American Geophysical Union, Washington DC, 320 p.

Wohl, E.E., Vincent, K.K. et D.J. Merritts. 1993. Pool and riffle characteristics in relation to channel gradient, *Geomorphology*, **6** (2): 99-110.

Wohl, E.E. et Grodek, T. 1994. Channel bed-steps along Nahal Yael, Negev desert, Israel. *Geomorphology*, **9**: 117-126.

Wohl, E.E., Madsen, S. et MacDonald, L. 1997. Characteristics of log and clast bed-steps in step-pool streams of northwestern Montana, USA. *Geomorphology*, **20**: 1-10.

Wohl, E.E., Kuzma, J.N. et Brown, N.E. 2004. Reach-scale channel geometry of a mountain river. *Earth Surface Processes and Landforms*, **29**: 969-981.

Wohl, E.E. et Merritt, D.M. 2005. Prediction of Mountain streams morphology. *Water Resources Research*, **41**: 1-10.

Wooldridge, C. L., et E. J. Hickin. 2002. Step-pool and cascade morphology, Mosquito Creek, British Columbia: A test of four analytical techniques, *Canadian Journal of Earth Sciences*, **39**: 493-503.

Zimmermann, A. et Church, M. 2001. Channel morphology, gradient profiles and bed stresses during flood in a step-pool channel. *Geomorphology*, **40**: 311-327.