

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAITRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR  
MARC DUCHEMIN

ÉTUDE DE L'ÉROSION LE LONG  
DU RUISSEAU DE L'ARBRE-À-LA-CROIX  
CHAMPLAIN, QUÉBEC

JUIN 1988

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## RÉSUMÉ

### Étude de l'érosion le long du ruisseau de l'Arbre-à-la-Croix, Champlain, Québec.

L'érosion a été étudiée de façon systématique le long du ruisseau de l'Arbre-à-la-Croix. Ce ruisseau est situé dans la municipalité de Champlain, au Québec. Les observations effectuées sur le terrain montrent que l'érosion fluviale et l'érosion éolienne sont les principales causes du départ des sédiments. Les sédiments retrouvés le long du ruisseau se composent des dépôts sur pente (d'origine nivéo-éolienne), des dépôts sur berge (résultant des crues printanières) et des sédiments de fond (couvrant le lit du ruisseau). L'analyse discriminante a permis de découvrir que le diamètre moyen ( $MZ$ ) et l'indice de triage ( $\sigma_1$ ) sont les indices granulométriques qui permettent le mieux de distinguer ces types de sédiments. Des séries de mesures portant sur la profondeur moyenne du ruisseau, sur la concentration de sédiments en suspension et sur la granulométrie des sédiments de fond ont été effectuées en conditions climatiques sans averse et après averses. Ces mesures ont été pratiquées à 4 stations localisées le long du ruisseau. Les analyses de variance révèlent que les variations climatiques (sans averse - après averses) sont plus importantes que les variations longitudinales (entre les stations). On remarque éga-

lement que les précipitations ont tendance à uniformiser les concentrations de sédiments en suspension entre l'amont et l'aval du ruisseau. De plus, il semble que certaines périodes d'activités agricoles soient reliées aux variations de la charge sédimentaire transportée par le ruisseau. Les récoltes, les travaux du sol et la présence des animaux sur les berges du cours d'eau coïncident avec des variations subites de la charge sédimentaire. On remarque que la portion du cours d'eau où ont accès les animaux, contribue pour plus de 50% de la charge totale du ruisseau. L'érosion n'est pas répartie uniformément à l'intérieur du bassin versant du ruisseau de l'Arbre-à-la-Croix. Le territoire agricole contribue grandement à l'apport sédimentaire vers le ruisseau.



## REMERCIEMENTS

Nos premiers remerciements vont à monsieur Jean-Marie Lancery pour la direction de cette étude. Nous tenons aussi à remercier monsieur P.J. Ghielen pour nous avoir permis de circuler sur les terres agricoles qui bordent le ruisseau de l'Arbre-à-la-Croix. Notre gratitude va également à monsieur Gilles Noël du bureau régional du M.A.P.A.Q. pour ses renseignements et ses commentaires.

Au personnel du Département de Géographie et du Département de Chimie-Biologie, nous exprimons notre gratitude pour l'accès aux locaux et l'utilisation du matériel de laboratoire.

Enfin nous sommes reconnaissants envers mademoiselle Christiane Duchemin pour la révision du texte et à monsieur Paul-Aimé Mirandette pour le traitement de texte par ordinateur.

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
RÉSUMÉ . . . . .	ii
REMERCIEMENTS . . . . .	iv
LISTE DES TABLEAUX . . . . .	vii
LISTE DES FIGURES . . . . .	viii
LISTE DES PHOTOGRAPHIES . . . . .	xii
LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS . . . . .	xiv
 INTRODUCTION . . . . .	 1
 CHAPITRE 1      PRÉSENTATION DU COURS D'EAU À L'ÉTUDE	
1.1    Description du territoire . . . . .	8
1.2    Observations sur le terrain . . . . .	15
 CHAPITRE 2      MÉTHODOLOGIE	
2.1    Échantillonnage du sol et des dépôts sédimen- taires . . . . .	26
2.2    Mesures des profondeurs moyennes et des sédi- ments en suspension . . . . .	30
2.3    Analyses granulométriques et statistiques .	31

## CHAPITRE 3      RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1	Étude granulométrique des matériaux récoltés le long du ruisseau . . . . .	36
3.1.1	Considérations théoriques . . . . .	36
3.1.2	Analyses granulométriques des échan- tillons . . . . .	40
3.1.3	Discrimination granulométrique . . . . .	54
3.2	Effets des précipitations sur la profondeur moyenne, la concentration de sédiments en suspension et la granulométrie des sédiments de fond du ruisseau . . . . .	58
3.2.1	Considérations théoriques . . . . .	58
3.2.2	Résultats des mesures effectuées le long du ruisseau . . . . .	62
3.2.3	Les variations climatiques et longi- tudinales . . . . .	66
3.3	Variations temporelles et spatiales de la charge en suspension . . . . .	79
3.3.1	Considérations théoriques . . . . .	79
3.3.2	Estimation de la charge transportée par le ruisseau . . . . .	81
	SYNTHÈSE ET CONCLUSION . . . . .	91
	BIBLIOGRAPHIE . . . . .	99

# LISTE DES TABLEAUX

1.	Résultats des analyses granulométriques . . . . .	41
2.	Champ de valeurs des indices granulométriques par groupe d'échantillons . . . . .	44
3.	Valeurs moyennes des indices granulométriques par groupe d'échantillons . . . . .	46
4.	Résultats de l'analyse discriminante . . . . .	55
5.	Résultats des mesures effectuées sans averse . . . . .	63
6.	Résultats des mesures effectuées après averses . . . . .	64
7.	Résultats de l'analyse de variance effectuée entre les stations . . . . .	66
8.	Résultats de l'analyse de variance effectuée entre les conditions climatiques . . . . .	70
9.	Rapport des valeurs moyennes après averses et sans averse . . . . .	70
10.	Charge cumulée à chaque station . . . . .	84

# LISTES DES FIGURES

1.	Localisation du ruisseau de l'Arbre-à-la-Croix .	4
2.	Utilisation du sol sur le territoire traversé par le ruisseau . . . . .	9
3.	Séries de sols traversés par le ruisseau . . . .	11
4.	Localisation des prises de vue le long du ruis- seau . . . . .	16
5.	État du sol au printemps . . . . .	17
6.	Localisation des échantillons de sol et des sédiments prélevés le long du ruisseau . . . . .	27
7.	Localisation des stations de mesures et d'échantillonnages . . . . .	29
8.	Courbes de Hjulström . . . . .	38
9.	Fréquence d'apparition des diamètres moyens (MZ) par groupe d'échantillons . . . . .	45

10.	Fréquence d'apparition des indices de triage ( $\sigma_I$ ) par groupes d'échantillons . . . . .	45
11.	Courbes granulométriques moyennes par groupe d'échantillons . . . . .	47
12.	Relation entre l'indice de triage ( $\sigma_I$ ) et le diamètre moyen (MZ) des sédiments de fond . . . .	49
13.	Relation entre l'indice d'acuité (KG) et le diamètre moyen (MZ) des sédiments de fond . . . .	49
14.	Relation entre le pourcentage d'argile des dépôts sur berge et leurs indices de triage ( $\sigma_I$ ). . . .	51
15.	Diagramme C-M des sédiments de fond et des dépôts sur berge . . . . .	53
16.	Relation entre le pourcentage de sédiments en suspension éolienne des dépôts sur pente et leurs diamètres moyens (MZ) . . . . .	53
17.	Relation entre les indices de triage ( $\sigma_I$ ) et les diamètres moyens (MZ) des matériaux récoltés le long du ruisseau . . . . .	57

18.	Distribution mensuelle des mesures de profondeurs moyennes et de sédiments en suspension . . . . .	65
19.	Profondeur moyenne ( $P_m$ ) en fonction des variations climatiques et longitudinales . . . . .	67
20.	Concentration de sédiments en suspension ( $S_s$ ) en fonction des variations climatiques et longitudinales . . . . .	67
21.	Diamètre moyen des sédiments de fond ( $M_Z$ ) en fonction des variations climatiques et longitudinales . . . . .	68
22.	Indice de triage des sédiments de fond ( $\sigma_x$ ) en fonction des variations climatiques et longitudinales . . . . .	68
23.	Profils en travers aux stations 3 et 6 . . . . .	72
24.	Rapport entre les concentrations de sédiments en suspension ( $S_s$ ) aux stations 3 et 6 . . . . .	74
25.	Relation entre les concentrations de sédiments en suspension ( $S_s$ ) et les précipitations ( $P_r$ ) pour les stations 3 et 6 . . . . .	74

26.	Relation entre les concentrations de sédiments en suspensions ( $S_s$ ) et les profondeurs moyennes ( $P_m$ ) pour les stations 3 et 6 . . . . .	76
27.	Relation entre les débits liquides ( $Q_l$ ) et les profondeurs moyennes ( $P_m$ ) . . . . .	82
28.	Relation entre les concentrations de sédiments en suspension ( $S_s$ ) et les débits liquides ( $Q_l$ ) pour la station 6 . . . . .	82
29.	Variations temporelles de la charge cumulée . . .	86
30.	Variations spatiales de la charge totale . . . .	88



# LISTE DES PHOTOGRAPHIES

1.	Vue aérienne du ruisseau de l'Arbre-à-la-Croix .	5
2.	Les terres agricoles présentent une topographie plane . . . . .	10
3.	Les sols laissés sans protection végétale devien- nent sensibles à l'érosion . . . . .	14
4.	Accumulation de neige sur le ruisseau . . . . .	14
5.	Sol laissé sans protection végétale au printemps.	18
6.	Les sédiments éoliens se déposent sur la neige en bordure du ruisseau . . . . .	19
7.	Lorsque la neige fond, les sédiments forment en dépôt nivo-éolien sur la pente du ruisseau . . .	19
8.	Des blocs de neige se détachent et alimentent le ruisseau en sédiments . . . . .	21
9.	Des blocs de neige basculent vers le ruisseau en arrachant une partie de la végétation des berges.	21

10.	Crue printanière à l'aval du ruisseau . . . . .	22
11.	Des sédiments se déposent lors du retrait des eaux de crue . . . . .	22
12.	L'eau s'attaque aux berges du ruisseau . . . . .	23
13.	Traces d'érosion laissées par le passage des animaux sur les versants du ruisseau . . . . .	23
14.	Érosion de berges trop abruptes . . . . .	24
15.	Décrochement de talus à l'amont du ruisseau . . .	24

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

A	superficie mouillée
Ac	sol de la série Achigan
All	alluvions non-différenciées
Ba	sol de la série Batiscan
C	centile supérieure ( $\emptyset 1$ )
Cc	charge cumulée
Ce	sol de la série Chaloupe
Cj	charge journalière
Cm	sol de la série Champlain
Cp	charge partielle
H	hauteur d'eau
KG	indice d'acuité
L	sol de la série Lanoraie
M	diamètre médian ( $\emptyset 50$ )
MZ	diamètre moyen
Pm	profondeur moyenne
Pr	précipitation
Q1	débit liquide
SK	indice d'asymétrie
Ss	concentration de sédiments en suspension
Tc	temps cumulé
Th	sol de la série St-Thomas
T.N	terre noire
$\bar{V}$	vitesse moyenne

$\sigma_z$  indice de triage

$\emptyset$  unité phi

$>$  plus grand que

$<$  plus petit que

## INTRODUCTION

Les faits d'érosion que l'on retrouve le long des cours d'eau ont su capter l'intérêt de plusieurs groupes de personnes soucieuses de la qualité de leur environnement. L'étude de l'érosion en rivière s'avère particulièrement importante car elle est étroitement liée au fléau de la dégradation des sols (DUBÉ, 1975; BOLLINNE et al., 1978; COOTE et al., 1982; A.C.F.A.S., 1983; BIRD et al., 1986; CONSEIL DES SCIENCES DU CANADA, 1986; A.C.F.A.S., 1987). Comme la plupart des matériaux arrachés par l'érosion hydrique et éolienne sont transportés et déposés à proximité des cours d'eau, ils peuvent, à court ou moyen terme, s'y retrouver et modifier les composantes biophysiques du milieu. Pensons entre autres à la présence de particules fines en suspension dans l'eau qui occasionne des conséquences sur la faune et la flore d'un cours d'eau (ROBINSON, 1971; HYNES, 1973).

Les problèmes d'érosion et de sédimentation font également partie des préoccupations des gestionnaires de l'aménagement des cours d'eau et de celles des milieux scientifique et technique (ST-YVES, 1983; MARCHE, 1986; DRAPEAU, 1987; LANCERY, 1987). Comme le souligne BOISVERT (1977), l'érosion des berges et du lit semble être le problème le plus étendu et le plus généralisé de l'hydraulique fluviale. La connais-

sance des processus d'érosion et de sédimentation s'avère donc un outil indispensable en prévision de l'aménagement des cours d'eau.

Une revue de la littérature nous renseigne sur les processus d'érosion, les sources de sédiments et les façons dont les sédiments sont transportés et déposés (TERMIER et al., 1960; GRAF, 1971; YALIN, 1972; EMBLETON et al., 1979; MORGAN, 1979; WALL et al., 1979; CALLES, 1980; HOLY, 1980; BIROT, 1981; LANCERY, 1982; SALA, 1983; PIZZUTO, 1984). Certaines études nous apprennent que les agents d'érosion (eau, vent, neige) exercent un certain triage des matériaux qu'ils transportent et que les matériaux qui composent les dépôts sédimentaires sont généralement caractérisés par des dimensions de grains et des modes de sédimentation particuliers (FOLK et al., 1957; PASSEGA 1964, 1977; FRIEDMAN, 1967; ROYSE, 1968; GREENWOOD, 1969; VISHER, 1969; MIDDLETON, 1976; WALTON et al., 1980; McCLAREN, 1981; WILLETTS et al., 1982; SLY et al., 1983; ABU EL-ELLA et al. 1985; SARRE, 1987). On s'accorde pour dire également qu'il existe des variations dans les caractéristiques hydrologiques, morphologiques et sédimentologiques entre l'amont et l'aval des cours d'eau et que ces mêmes caractéristiques varient aussi en fonction des conditions climatiques et de l'utilisation du sol (LEOPOLD et al., 1953; ANDERSON, 1954; LANGBEIN et al., 1958; GUY, 1964; CARLSTON, 1969; McGUINNESS et al.,

1971; KNIGHTON, 1975, 1980, 1982; PICKUP, 1975; RICHARDS, 1977; GOMEZ, 1983).

Il existe entre Cap-de-la-Madeleine et Champlain des petits cours d'eau qui drainent des terres agricoles avant de se jeter dans le fleuve Saint-Laurent. Plusieurs de ces cours d'eau présentent des problèmes de stabilité des berges et d'évacuation des sédiments. Ces problèmes peuvent être attribuables aux phénomènes d'érosion et de sédimentation qui prennent place le long de ces cours d'eau. Le propos de notre travail sera d'étudier les principaux phénomènes d'érosion et de sédimentation rencontrés le long du ruisseau de l'Arbre-à-la-Croix (Figure 1 et Photo 1). Ce petit ruisseau contient le plus souvent peu d'eau mais lorsqu'il a à évacuer les eaux des crues printanières ou d'orages, son niveau d'eau augmente subitement. Cette variation subite engendre des reprises d'érosion des berges et du lit du ruisseau et une sédimentation lors des crues printanières.

Pour débiter notre étude, nous présenterons les principales marques d'érosion et de sédimentation qu'il nous a été possible d'observer le long du ruisseau de l'Arbre-à-la-Croix. Par l'analyse granulométrique de sédiments récoltés à différents endroits le long du ruisseau, nous tenterons de construire un modèle qui nous permettra de distinguer ces différents types de sédiments. Ensuite, nous étudierons les

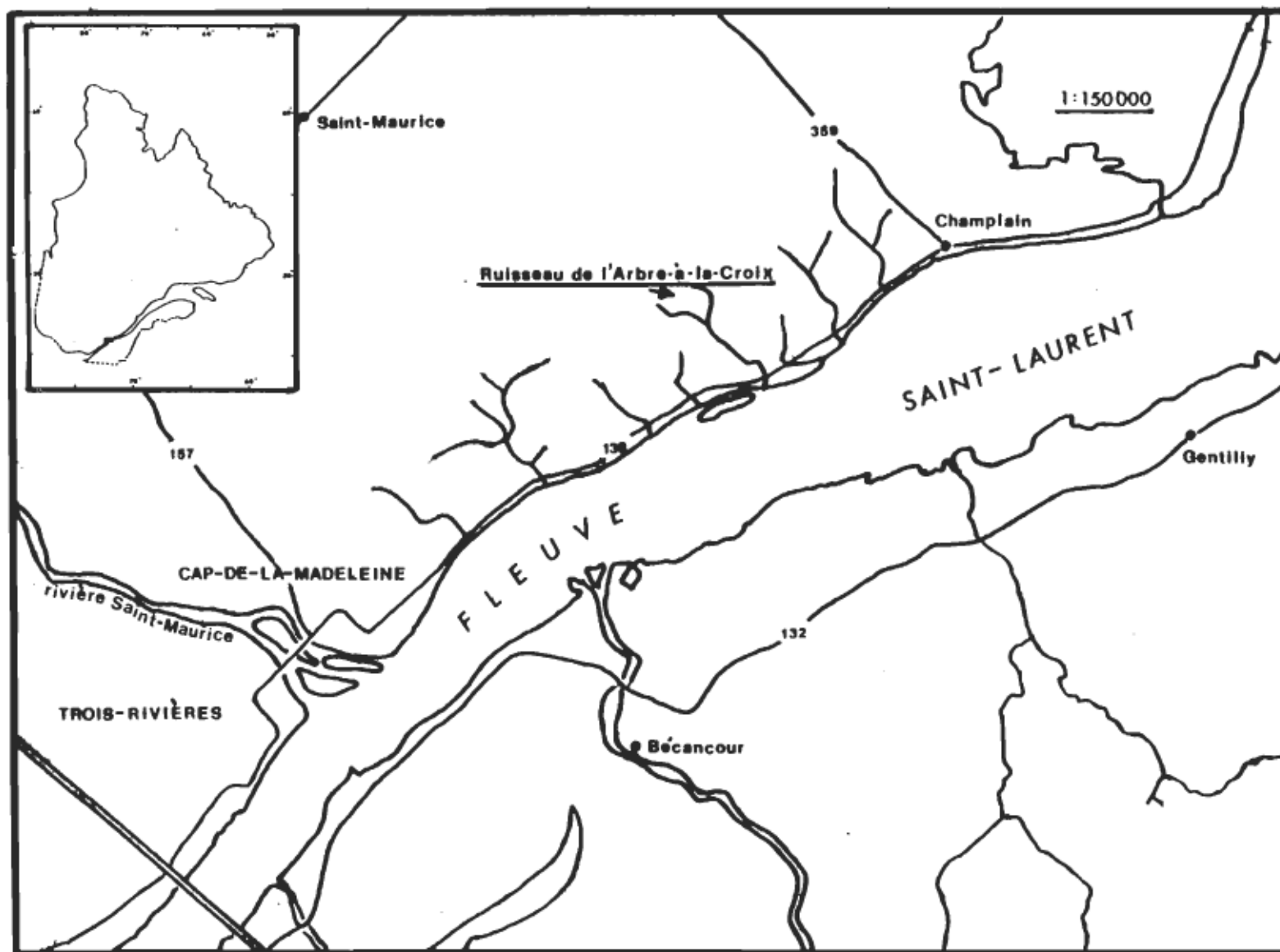


Figure 1. Localisation du ruisseau de l'Arbre-à-la-Croix





Photo 1. Vue aérienne du ruisseau de l'Arbre-à-la-Croix

effets des précipitations sur la profondeur d'eau, la concentration de sédiments en suspension et la granulométrie des sédiments de fond en comparant des mesures effectuées sans averse et à la suite d'averses. Nous examinerons également de quelle façon varient ces caractéristiques de l'amont vers l'aval du ruisseau. Finalement, nous tenterons d'estimer la charge sédimentaire transportée par le cours d'eau et de faire ressortir les secteurs où le ruisseau est le plus chargé en sédiments.

Nos objectifs seront donc :

1. de distinguer les différents types de sédiments à partir de l'analyse granulométrique
  - a) de déterminer les indices granulométriques qui permettent le mieux cette distinction;
  - b) d'établir un modèle qui permet de distinguer les types d'échantillons.
2. de mesurer l'effet des précipitations sur la profondeur moyenne, la concentration de sédiments en suspension et la granulométrie des sédiments de fond du ruisseau
  - a) de comparer les mesures effectuées après averses avec celles effectuées sans averse;
  - b) d'examiner les variations entre l'aval et l'amont du ruisseau;
  - c) de déterminer les tendances générales.

3. d'estimer la quantité de sédiments transportés par le ruisseau
  - a) d'examiner les variations spatiales et temporelles de la charge sédimentaire;
  - b) d'identifier les secteurs du cours d'eau qui accusent les plus fortes charges;
  - c) d'établir un lien avec l'activité agricole.

## CHAPITRE 1

### PRÉSENTATION DU COURS D'EAU À L'ÉTUDE

#### 1.1 Description du territoire

Le ruisseau de l'Arbre-à-la-Croix est situé dans la municipalité de Champlain (Québec), à environ 19 km au Nord-Est de Trois-Rivières (Figure 1). Ce ruisseau draine un petit bassin versant d'environ 3,5 km<sup>2</sup>. Ce cours d'eau prend sa source en région boisée pour finalement traverser une plaine agricole et se jeter dans le fleuve Saint-Laurent (Figure 2). La faible dénivellation des terres agricoles nécessite la présence d'un bon système de drainage (Photo 2).

En coulant vers le fleuve, le ruisseau de l'Arbre-à-la-Croix traverse plusieurs séries de sols issus de limon et de sable qui couvrent les dépôts marins de la mer de Champlain (Figure 3). Selon, LAVERDIÈRE et al. (1981), les sols sableux sont moins propices pour l'agriculture que les sols argileux à cause de leur faible teneur en matière organique et en éléments nutritifs et de leur faible pouvoir de rétention d'eau. En amont, sur une terrasse sableuse constituée d'alluvions deltaïques déposées par les eaux de la rivière St-Maurice lors du retrait de la mer de Champlain (GODBOUT,

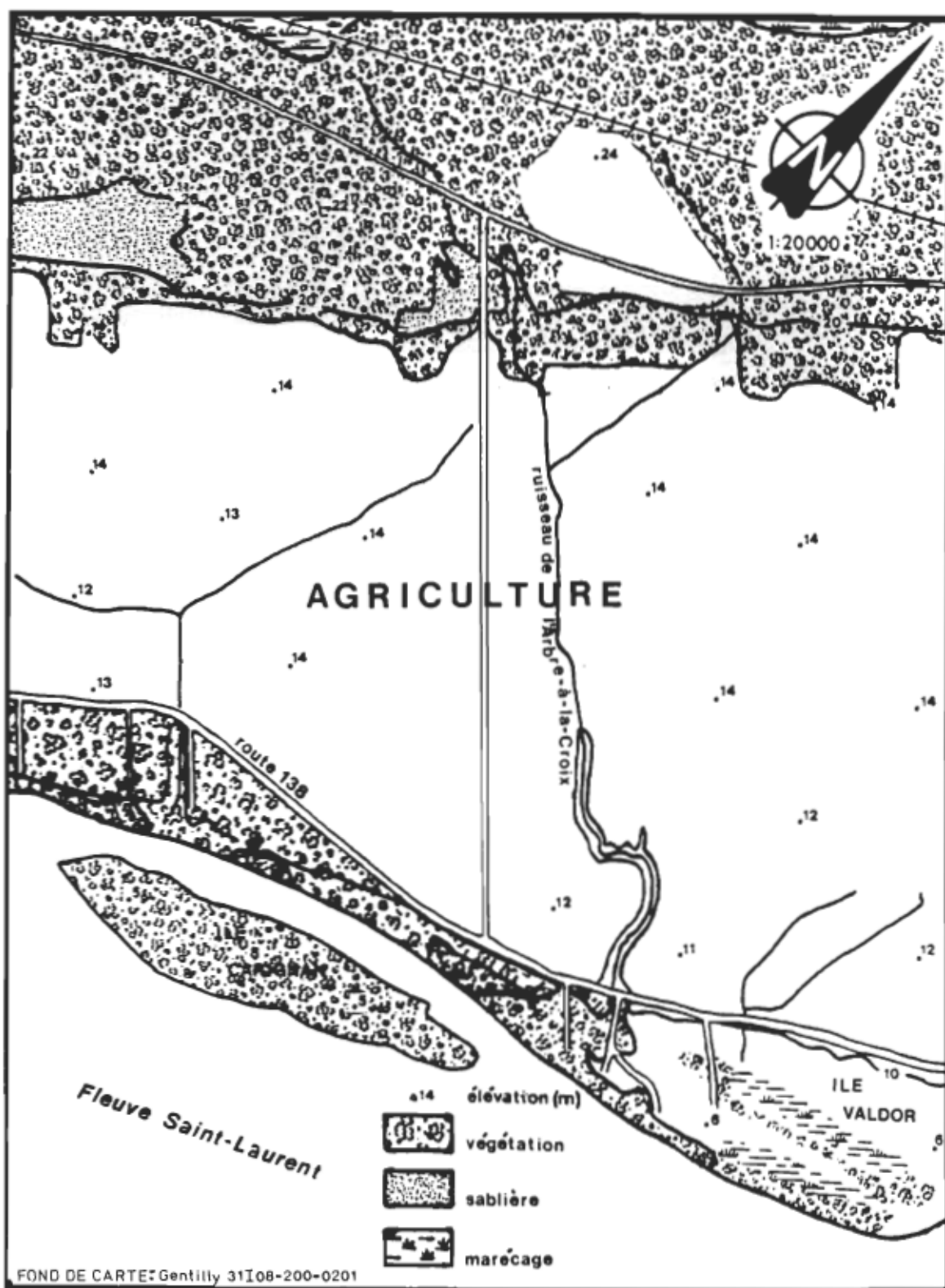
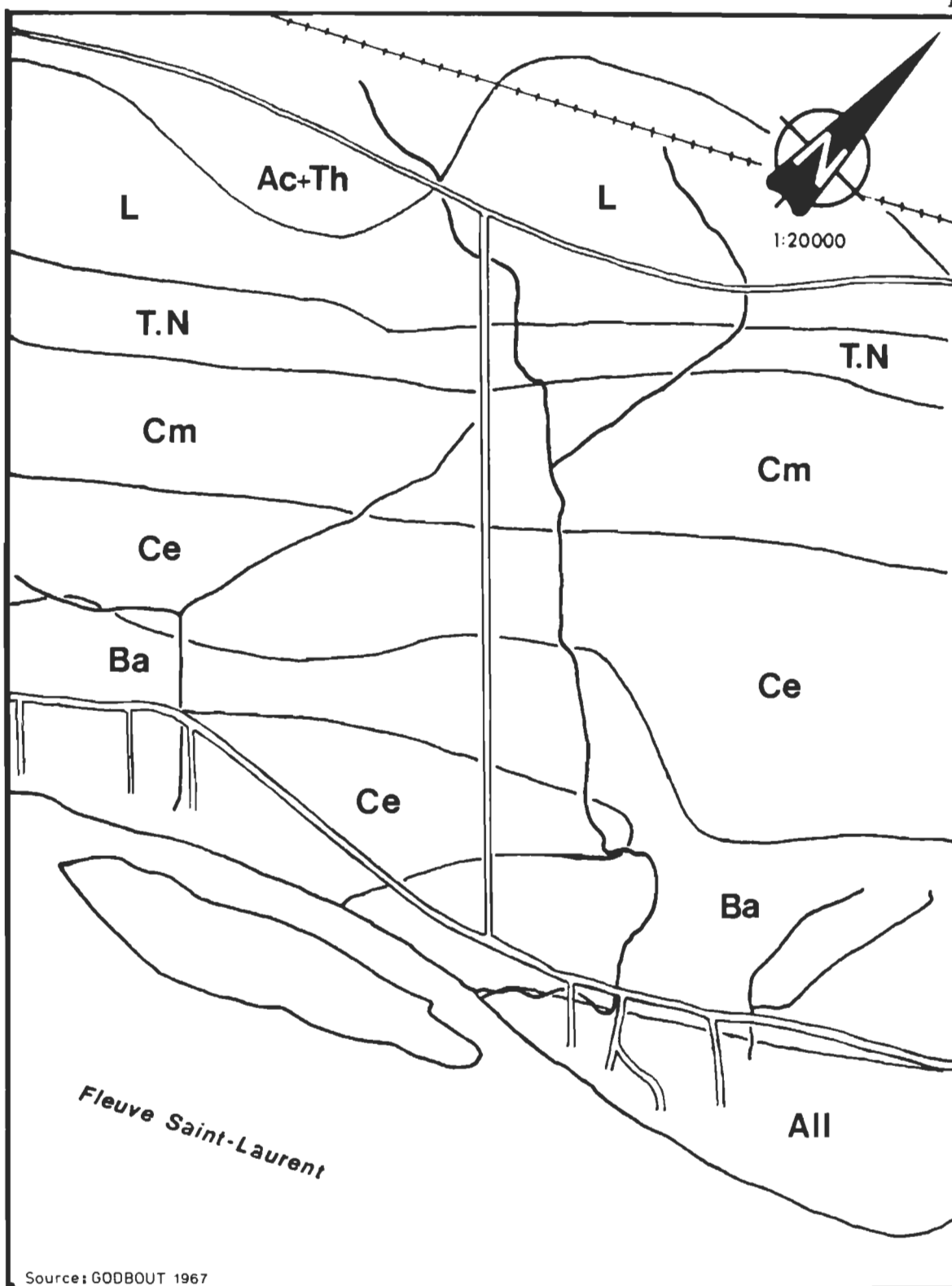


Figure 2. Utilisation du sol sur le territoire traversé par le ruisseau



Photo 2. Les terres agricoles présentent une topographie plane



Source: GODBOUT 1967

Figure 3. Séries de sols traversées par le ruisseau (Ac: Achigan, Th: St-Thomas, L: Lanoraie, T.N: terre noire, Cm: Champlain, Ce: Chaloupe, Ba: Batiscan, All: alluvions non-différenciées)

1967), nous retrouvons les sables fins Achigan (Ac) et St-Thomas (Th) de même que les sables éoliens Lanoraie (L). Ces sols se composent à plus de 80% de sable et à moins de 5% d'argile.

Les terres de la terrasse sise à 20 m. d'altitude sont actuellement sans valeur pour l'agriculture car une fois déboisées, elles deviennent très vulnérables à l'érosion éolienne. Le paysage végétal qu'on y rencontre est représenté par des forêts de transition entretenues par des coupes sylvicoles. Les principaux peuplements se composent de peupliers faux-trembles (*Populus tremuloïdes*, (Michx.)), de bouleaux gris (*Betula populifolia*, (Marsh.)) et d'érables rouges (*Acer rubrum*, (L.)). Aux endroits plus secs, on retrouve des pins blancs (*Pinus strobus*, (L.)). Cette végétation protège le sol de l'action érosive des gouttes de pluie et réduit ainsi la quantité de sédiments transportés vers le ruisseau.

En continuant sa descente vers le fleuve, le ruisseau traverse une plaine agricole constituée d'alluvions fluviales qui forment une bande de terre parallèle au fleuve. Cette bande de terre se compose des sols des séries Champ-lain (Cm), Chaloupe (Ce) et Batiscan (Ba). La teneur en sable de ces profils augmente en profondeur; cependant la partie inférieure de la série Batiscan accuse une plus forte



proportion de sable que la série Chaloupe. Les sols Chaloupe et Batiscan seront sensibles à l'érosion superficielle s'ils sont cultivés dans le sens de la pente (LAVERDIÈRE et al., 1973). Ces sols possèdent, à environ 40 cm. sous leur surface, des couches fermes (indurées) qui limitent la croissance des racines. Cette induration serait attribuable à une période de sédimentation saccadée et à la cimentation de particules fines par les oxydes de fer (LAVERDIÈRE et al., 1973; CÔTÉ et al., 1980). De plus, lorsqu'ils sont laissés sans protection végétale, ces sols sont sensibles à l'érosion éolienne qui soutire à la terre ses particules les plus fertiles (Photo 3). La granulométrie de ces sols est caractérisée par une fraction sableuse ( $>0,25$  mm.) ne dépassant guère 50% et par une absence (ou quasi-absence) de particules  $> 2$  mm. (CÔTÉ et al., 1980).

Le ruisseau se compose de deux affluents qui se rejoignent à la confluence pour ne former qu'un seul cours d'eau principal. Le ruisseau est bien encaissé dans la plaine agricole et ses versants sont bien protégés par la végétation. Par contre, les berges sont dénudées à plusieurs endroits. En hiver, les neiges poussées par les vents s'accumulant dans le ruisseau et y demeurent prisonnières jusqu'à tard au printemps alors que les terres environnantes sont découvertes de leurs tapis de neige (Photo 4). Nous verrons comment cette accumulation de neige alimentera le ruisseau



Photo 3. Les sols laissés sans protection végétale deviennent vulnérables à l'érosion



Photo 4. Accumulation de neige sur le ruisseau

en sédiments. Le débit du ruisseau est d'environ 70 l/s à la confluence et 100 l/s près de la route à l'aval. La concentration de sédiments en suspension varie de 10 à 40 mg/l sur cette même distance. Les averses peuvent faire augmenter ces valeurs de façon significative. Soulignons finalement que le lit du ruisseau est recouvert d'une couche de sédiments sableux (sédiments de fond) qui originent des berges et de la partie amont du cours d'eau.

## 1.2 Observations sur le terrain

Notre premier travail consistait à reconnaître directement sur place les marques d'érosion et de sédimentation. Ces observations seront présentées à l'aide de photographies prises le long du ruisseau. La Figure 4 localise les prises de vue sur le terrain et la Figure 5 montre l'état du sol au printemps. Au printemps venu, une bonne partie du sol qui borde le ruisseau est laissée à nu, sans protection végétale (Photo 5). Ce sol est soumis à une érosion éolienne qui transporte les particules vers les pentes enneigées du ruisseau où elles s'y accumulent pour former une neige "sale" (Photo 6). Lorsque cette neige "sale" se met à fondre, les sédiments qui s'y sont accumulés se déposent sur les pentes du ruisseau et forment une croûte de dépôts nivo-éoliens de quelques millimètres d'épaisseur (Photo 7). On retrouve également le long du cours d'eau, des blocs de neige "sale"

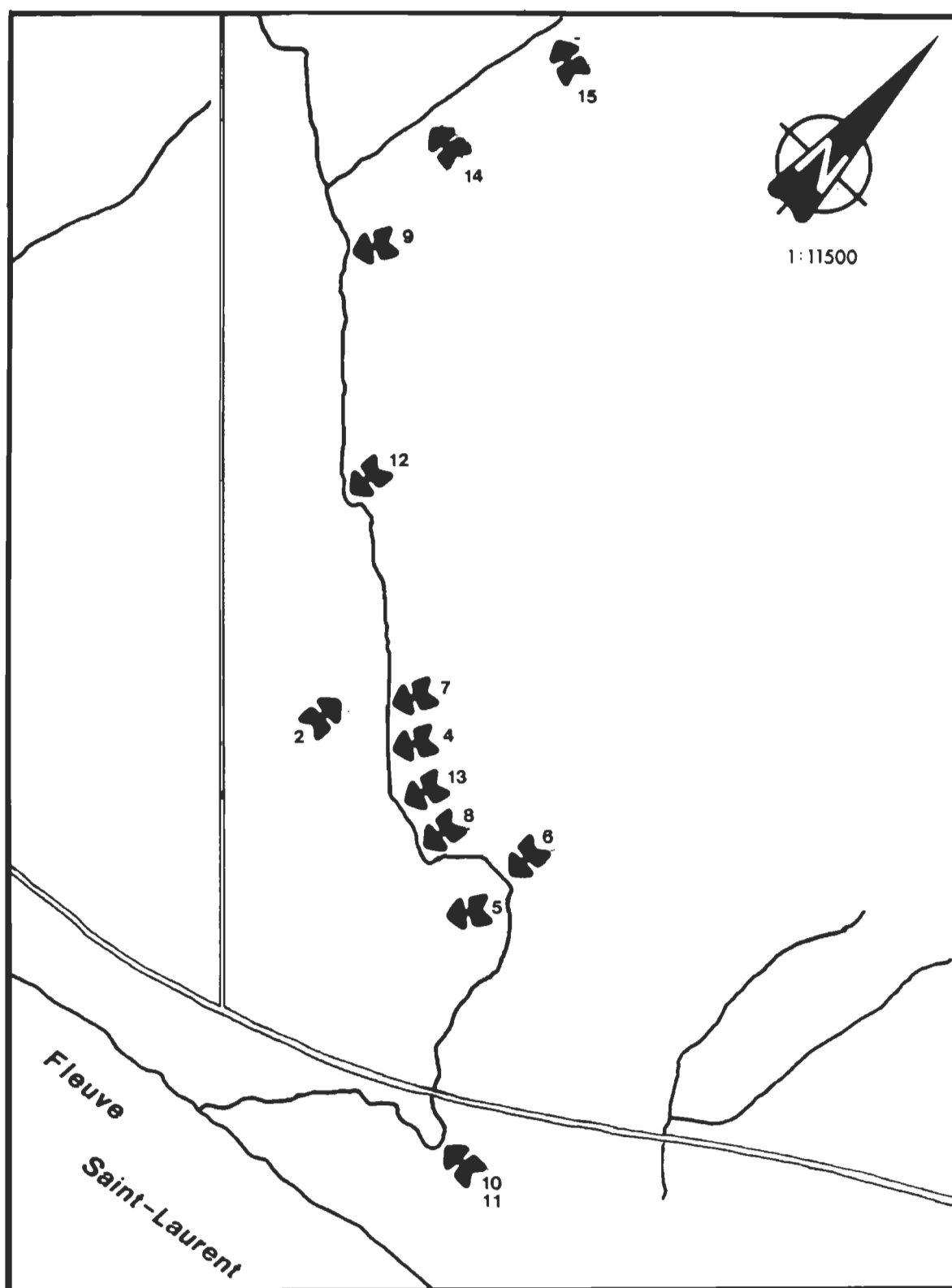


Figure 4. Localisation des prises de vue le long du ruisseau

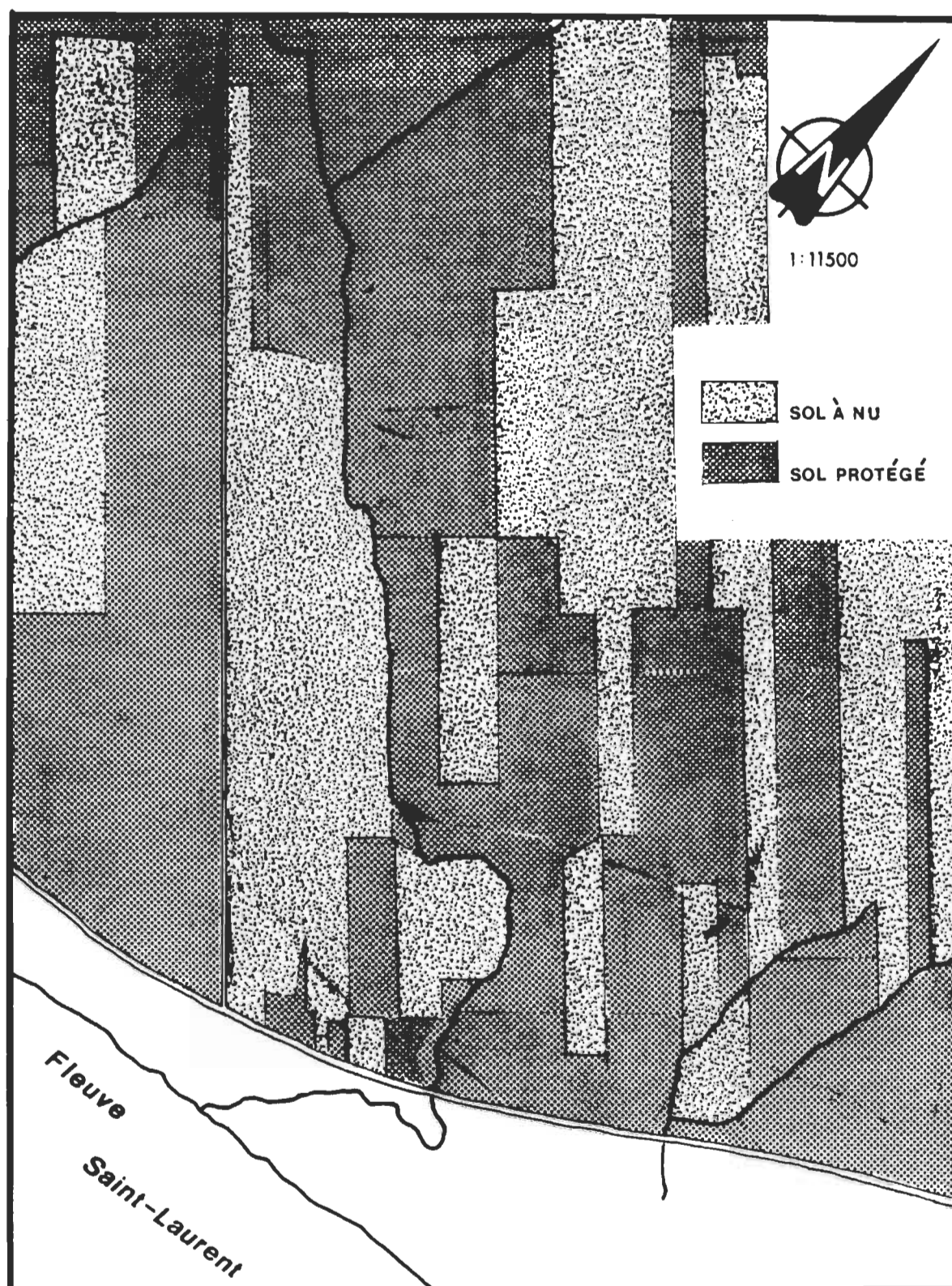


Figure 5. État du sol au printemps





Photo 5. Sol laissé sans protection végétale au printemps



Photo 6. Les sédiments éoliens se déposent sur la neige en bordure du ruisseau



Photo 7. Lorsque la neige fond, les sédiments forment un dépôt nivo-éolien sur la pente du ruisseau

qui se brisent et tombent à l'eau, emportant avec eux des matériaux qui alimenteront le ruisseau en sédiments en suspension (Photo 8) ou encore une partie de la végétation qui protège les berges du cours d'eau (Photo 9).

Lors des crues printanières, le niveau d'eau du ruisseau s'élève jusqu'à ce qu'il inonde les berges et y dépose ses sédiments. À l'aval du ruisseau, l'eau couvre une plaine d'inondation et y dépose des sédiments à un cycle annuel (Photo 10 et 11).

Les traces de l'érosion se remarquent le long du ruisseau par l'existence de berges et versants qui s'effritent et se désagrègent sous l'action de l'eau (Photo 12) ou par le passage du bétail qui piétine les versants du cours d'eau (Photo 13). C'est d'ailleurs dans ce secteur du ruisseau que l'érosion des berges est la plus accentuée car il s'agit d'un sol Batiscaan ayant très peu de cohésion. Quelques décrochements de berges et de talus existent à l'amont du ruisseau (Photo 14 et 15). Ces marques d'érosion seraient attribuables à l'action de l'eau et des glaces qui grugeraient la partie sous-jacente des berges et à la présence de couches de sol ayant des degrés d'érodabilité différents (PIZZUTO, 1984). Quoiqu'il en soit, ces manifestations de l'érosion contribuent à alimenter le ruisseau en sédiments.





Photo 8. Des blocs de neige se détachent et alimentent le ruisseau en sédiments



Photo 9. Des blocs de neige basculent vers le ruisseau en arrachant une partie de la végétation des berges



Photo 10. Crue printanière à l'aval du ruisseau



Photo 11. Des sédiments se déposent lors du retrait des  
eaux de crue





Photo 12. L'eau s'attaque aux berges du ruisseau



Photo 13. Traces d'érosion laissées par le passage des animaux sur les versants du ruisseau





Photo 14. Érosion de berges trop abruptes



Photo 15. Décrochement de talus à l'amont du ruisseau

L'érosion éolienne et l'érosion fluviale sont donc les principales causes du départ du matériel. Lors de l'érosion éolienne, le vent transporte les particules du sol vers les pentes du ruisseau. Il s'agit d'un processus nivo-éolien au cours duquel les sédiments arrachés du sol et transportés sur les pentes enneigées par l'action du vent sont par la suite déposés sur les pentes par le retrait des neiges; ces sédiments seront appelés dépôts sur pente. L'érosion fluviale agit sur le ruisseau en arrachant le matériel des berges et en déplaçant les sédiments sur son lit. Lors des hautes eaux, le ruisseau inonde les berges et y dépose des sédiments que nous nommerons dépôts sur berge. Au fond du ruisseau existe une couche de sédiments sableux qui se déplacent sous l'effet d'entraînement par l'eau; ces matériaux du lit constituent les sédiments de fond.

Nous étudierons les caractéristiques granulométriques et les modes de transport de ces différents sédiments dans le troisième chapitre de ce travail. Mais d'abord, procédons à la description des manipulations et des méthodes employées pour réaliser nos objectifs.

## CHAPITRE 2

### MÉTHODOLOGIE

#### 2.1 Échantillonnage du sol et des dépôts sédimentaires

Dans le but d'analyser la composition granulométrique des différents dépôts sédimentaires du ruisseau, un échantillonnage a été effectué pour chacun des types de dépôts rencontrés le long du ruisseau de l'Arbre-à-la-Croix. Des échantillons de sol ont également été prélevés pour fin de comparaison. WALL et al. (1979) soulignent que les secteurs agricoles situés à proximité des cours d'eau sont plus susceptibles d'alimenter le ruisseau en sédiments. La Figure 6 localise les types d'échantillons récoltés. Au total, 89 échantillons ont été prélevés. Ceux-ci se divisent en quatre groupes:

Les échantillons de sol ont été prélevés à l'aide d'une tarière dans les 15 premiers centimètres du sol. À l'amont, nous retrouvons un sous-groupe de 4 échantillons qui provient d'un sol protégé par la végétation (N<sup>os</sup> 1 à 4); un second sous-groupe composé de 10 échantillons provient d'un secteur où le sol est laissé sans protection végétale (N<sup>os</sup> 5 à 14) et un troisième sous-groupe de 4 échantillons provient de l'aval (N<sup>os</sup> 15 à 18).

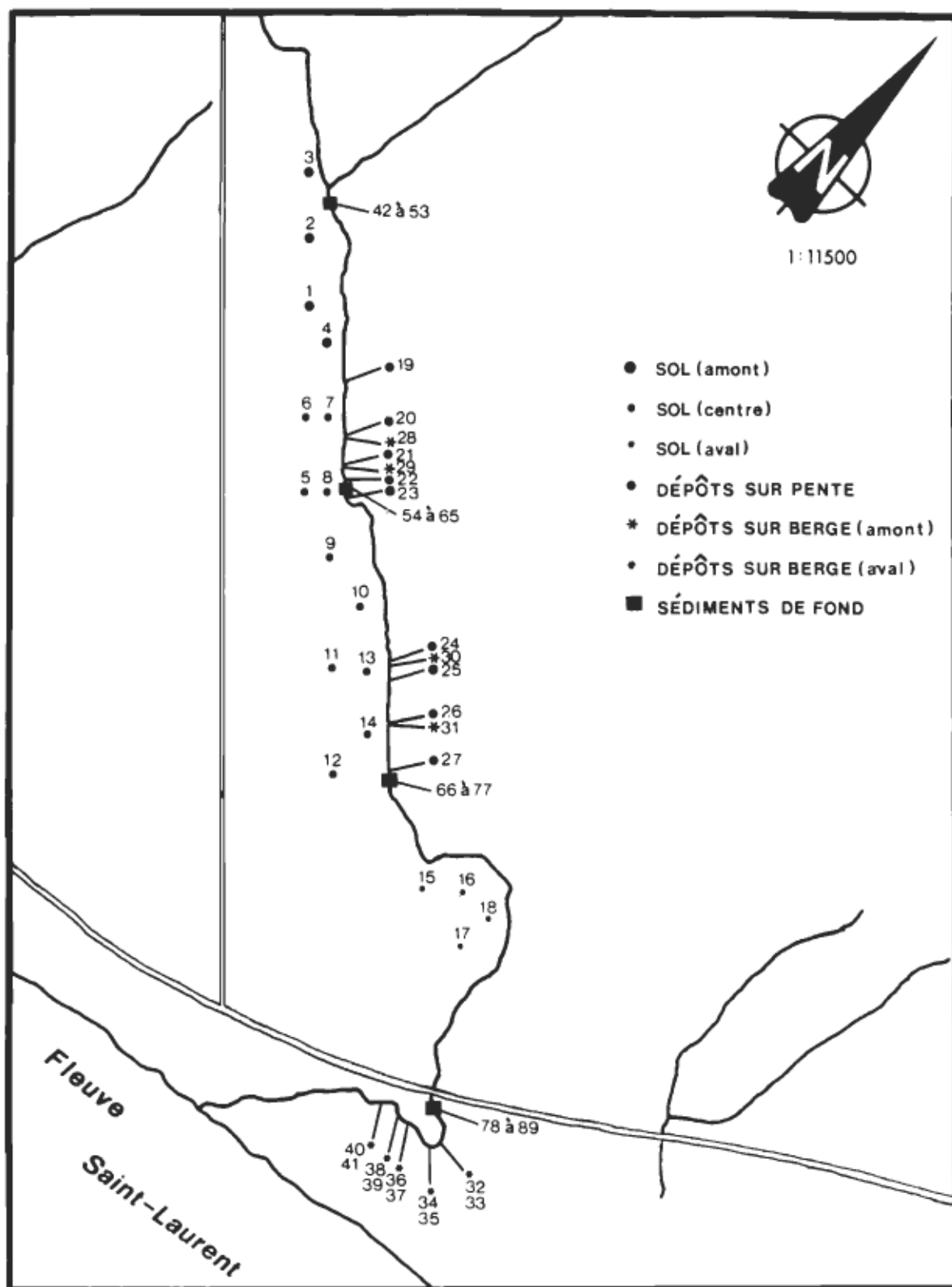


Figure 6. Localisation des échantillons de sol et des sédiments prélevés le long du ruisseau

Les dépôts sur pente sont composés de 9 échantillons recueillis sur la pente du ruisseau à l'aide d'une petite pelle (N° 19 à 27). La position de ces échantillons par rapport au sol nu suggère l'origine éolienne de ces dépôts.

Les dépôts sur berge laissés par les inondations printanières se composent de 4 échantillons provenant de l'amont du ruisseau (N° 28 à 31) et de 10 échantillons provenant de l'aval (N° 32 à 41). Ces matériaux ont été prélevés à l'aide d'une petite pelle sur la partie superficielle des dépôts.

Les sédiments de fond proviennent de quatre stations d'échantillonnage (numérotées 3,4,5 et 6) localisées de l'amont vers l'aval du ruisseau (Figure 7). Ces sédiments ont été recueillis une fois par mois, entre mai et octobre. On retrouve 12 échantillons par station; 6 échantillons récoltés sans averse et 6 autres à la suite d'averses. Les échantillons N° 42 à 53 proviennent de la station 3, ceux des N° 54 à 65 de la station 4, ceux des N° 66 à 77 de la station 5 et ceux des N° 78 à 89 de la station 6.



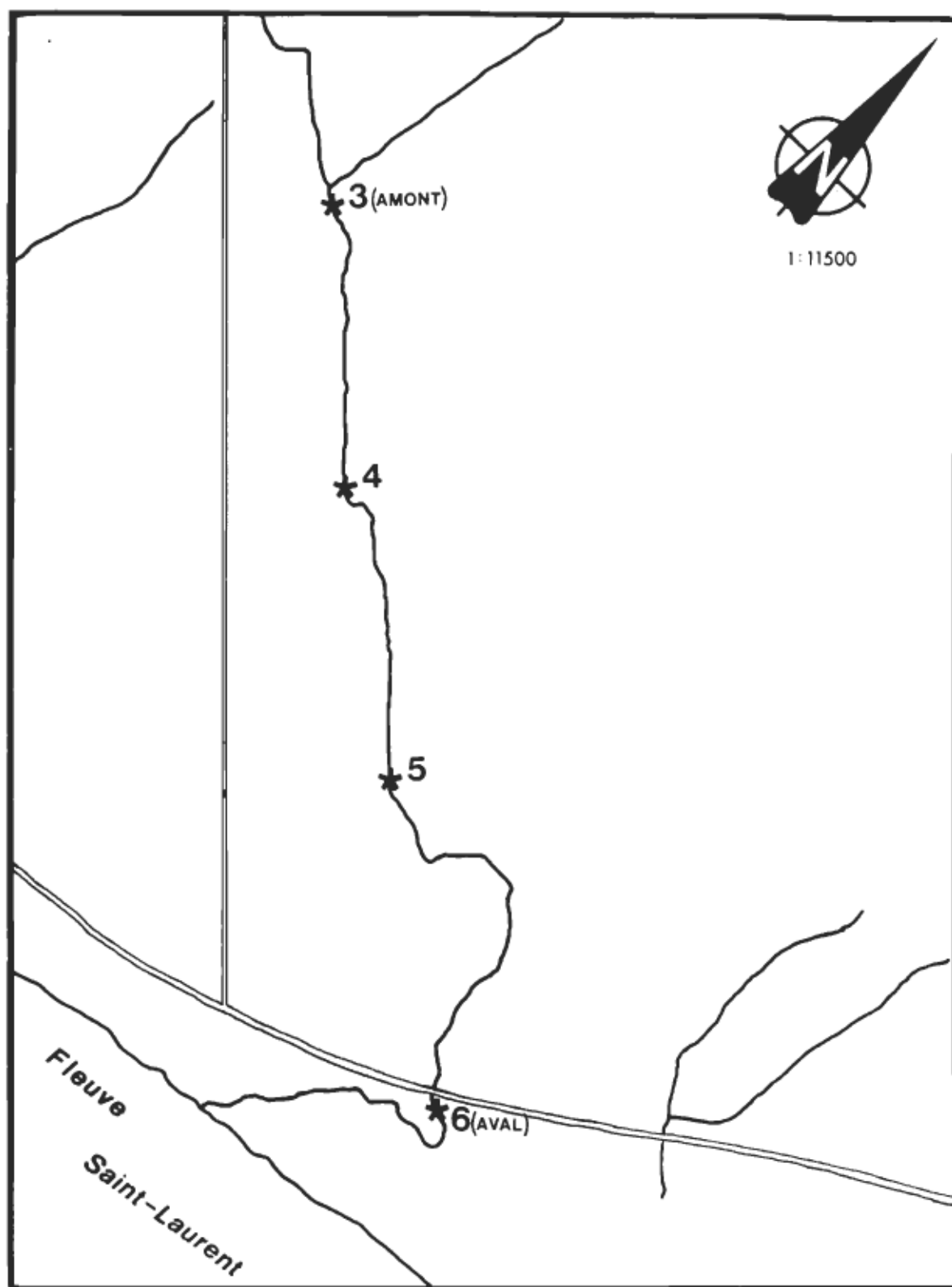


Figure 7. Localisation des stations de mesures et d'échantillonnages

## 2.2. Mesures des profondeurs d'eau et des sédiments en suspension

Des mesures se rapportant à la profondeur moyenne et à la concentration de sédiments en suspension du ruisseau ont été effectuées à chacune des quatre stations de la Figure 7. Ces paramètres sont étroitement liés aux mécanismes de transport et de sédimentation (COLBY, 1961; GRAF, 1971; YALIN, 1972; MIDDLETON, 1976; HALLERMEIER, 1981; BROWNLIE, 1983). Au total, 32 mesures de profondeur moyenne et de sédiments en suspension ont été exécutées pour chacune des stations; 18 mesures sans averse et 14 mesures à la suite d'averses. Un pluviomètre était installé près de la station 3 et la quantité de pluie était mesurée après les averses.

Les profondeurs moyennes à chaque station étaient obtenues de la façon suivante: des repères installés sur chacune des berges du ruisseau étaient reliés par un ruban à mesurer; à tous les 10 cm à partir de la berge ouest, on effectuait une mesure de la hauteur d'eau (H); la moyenne des mesures H d'un profil en travers (cross section) représentait la profondeur moyenne ( $P_m$ ).

Les sédiments en suspension étaient recueillis sous la surface de l'eau à l'aide de sacs de type "WHIRL PAK" et

leur contenu était analysé dans les 6 heures suivant leur cueillette. Le volume d'eau recueilli était d'environ 250 ml. par échantillon.

La concentration de sédiments en suspension (Ss) était obtenue par filtration (papier filtre GELMAN, type A), séchage (four ISOTEMPOVEN, FISHER) et par la suite était pesée sur une balance analytique (balance METTLER, FISHER) selon la méthode recommandée par l'A.S.T.M. (1980 a).

Des mesures de débit liquide ont également été effectuées pour chacune des stations selon la méthode suivante: à l'aide d'un moulinet (current meter) on mesurait la vitesse du courant à tous les 10 cm. d'un profil en travers, ce qui nous permettait d'obtenir la vitesse moyenne ( $\bar{V}$ ). On mesurait par la suite la superficie mouillée (A) et le débit liquide (Ql) était calculé par le produit de la vitesse moyenne et de la superficie mouillée:

$$Ql = \bar{V}A$$

### 2.3 Analyses granulométriques et statistiques

Les dépôts sédimentaires provenant des différents endroits du ruisseau (Figure 6) de même que les échantillons de sol ont été soumis à l'analyse granulométrique. Les échantillons de sol, les dépôts sur pente et les dépôts sur

berge ont été analysés par densimétrie (Méthode Bouyoucos, densimètre 151H) selon les spécifications de l'A.S.T.M. (1980 b). Une fois la dispersion terminée, on versait le contenu du cylindre à sédimentation sur un tamis de 0,045 mm qu'on lavait par la suite à l'eau courante de façon à ne conserver que les particules supérieures à 0,045 mm. Cette fraction de l'échantillon était ensuite séchée, puis tamisée à l'aide des tamis de 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,10 mm et 0,045 mm. Les tamis étaient posés sur un vibreur mécanique (ANALYSETTE de FRITSCH, 110 volts) pendant 10 minutes. Les échantillons de sédiments de fond ont subi le même traitement que la fraction ci-dessus (tamisage) vu que leur contenu en particules plus fines que 0,045 mm était très minime (<5%). Lors des analyses, on a constaté une quasi-absence de particules supérieures à 2 mm, seulement quelques grains ont été trouvés dans les sédiments de fond et les échantillons de sol.

Les classes texturales utilisées seront celles reconnues par le Système canadien de classification des sols (CANADA, 1978) et qui se veulent comme suit:

<u>Classes</u>	<u>Diamètre (mm )</u>	<u>Unité phi (Ø)</u>
Gravier	> 2,0 mm	< - 1Ø
Sable très grossier (STG)	2,0 à 1,0 mm	- 1Ø à 0Ø
Sable grossier (SG)	1,0 à 0,5 mm	0Ø à 1Ø
Sable moyen (SM)	0,5 à 0,25 mm	1Ø à 2Ø
Sable fin (SF)	0,25 à 0,10 mm	2Ø à 3,3Ø
Sable très fin (STF)	0,10 à 0,05 mm	3,3Ø à 4,3Ø
Limon	0,05 à 0,002 mm	4,3Ø à 8,97Ø
Argile	< 0,002 mm	> 8,97Ø

On a tracé pour chacun des 89 échantillons analysés une courbe de distribution granulométrique en positionnant le diamètre des grains sur un axe horizontal et la fréquence d'apparition de ce diamètre sur un axe vertical. L'axe horizontal est exprimé en unité phi (Ø) et l'axe vertical en pourcentage cumulatif à échelle de probabilité (FRIEDMAN et al., 1978). Cette représentation permet de comparer nos résultats avec plusieurs autres études granulométriques. La conversion de l'unité millimétrique (mm) en unité phi (Ø) est la suivante:

$$\varnothing = - \left[ \frac{\text{Log } d(\text{mm})}{\text{Log } 2} \right] \text{ et } d(\text{mm}) = 2^{-\varnothing}$$

où Ø = diamètre en unité phi

d(mm) = diamètre en millimètre

Log = logarithme à base 10

Des mesures statistiques seront utilisées pour exprimer les propriétés granulométriques des sédiments. Ces mesures statistiques seront déterminées graphiquement à partir des courbes de distribution tracées pour chaque échantillon. Pour chaque courbe tracée, on obtiendra le diamètre des particules ( $\phi$ ) aux pourcentages cumulatifs suivants: 5% ( $\phi_5$ ), 16% ( $\phi_{16}$ ), 25% ( $\phi_{25}$ ), 50% ( $\phi_{50}$ ), 75% ( $\phi_{75}$ ), 84% ( $\phi_{84}$ ) et 95% ( $\phi_{95}$ ). Ces mesures serviront à calculer les indices granulométriques proposés par FOLK et WARD (1957), soit:

$$\text{le diamètre moyen (MZ)} = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$$

$$\text{la déviation standard } (\sigma_1) = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6,6}$$

$$\text{l'asymétrie (skewness) (SK)} = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$$

$$\text{l'acuité (kurtosis) (KG)} = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2,44(\phi_{75} - \phi_{25})}$$

Ces indices granulométriques seront utilisés dans l'analyse statistique qui servira à distinguer les dépôts sédimentaires et leur mécanisme de transport. Nous utiliserons également à cette fin le diamètre médian ( $M = \phi_{50}$ ) et le centile supérieur ( $C = \phi_{95}$ ) tels que suggérés par PASSEGA (1964).

L'analyse bivariée et l'analyse discriminante serviront d'outils d'analyse statistique. Des analyses de variances compléteront les analyses statistiques utilisées dans ce travail. Celles-ci seront exécutées sur programme SPSS-X (1986) par l'ordinateur CYBER 830-D de l'U.Q.T.R.. La plupart des graphiques et des courbes seront effectués à l'aide de l'imprimante locale en mode interactif.

## CHAPITRE 3

### RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1 Études granulométrique des matériaux récoltés le long du ruisseau

##### 3.1.1 Considération théoriques

L'analyse granulométrique présente souvent une distribution de particules qui est caractéristique d'un milieu de sédimentation ou d'un mécanisme de transport particulier. La granulométrie des sédiments est de plus reliée à la disponibilité du matériel original, aux processus d'érosion, de transport et de sédimentation et à l'énergie de l'agent de dépôt (GREENWOOD, 1969; McLAREN, 1981; SLY et al., 1983). En plus de leur signification statistique, les indices granulométriques révèlent le comportement énergétique de l'agent de dépôt (GREENWOOD, 1969). Le diamètre moyen (MZ) se veut un indicateur de l'énergie moyenne (vitesse) de l'agent de dépôt. Si  $MZ(\emptyset)$  est petit, c'est que l'agent de dépôt possède une énergie moyenne relativement forte.

Les mouvements de l'air et de l'eau exercent une action sélective sur les particules en les séparant selon leur grosseur. Ce processus de sélection de grains s'appelle le



trriage (sorting). La déviation standard ( $\sigma_x$ ) est une mesure du triage des particules et représente les fluctuations de l'énergie de l'agent de dépôt. Si  $\sigma_x(0)$  est petit, c'est que l'agent opère avec une énergie relativement constante et le matériel déposé est bien trié. FOLK et WARD (1957) suggèrent l'échelle de triage suivante:

- < 0,350 (très bien trié)
- 0,350 à 0,50 (bien trié)
- 0,500 à 1,00 (moyennement trié)
- 1,00 à 2,00 (mal trié)
- 2,00 à 4,00 (très mal trié)
- > 4,00 (extrêmement mal trié)

La relation entre le diamètre moyen (MZ) et le triage des particules ( $\sigma_x$ ) repose sur la disponibilité des grains et la complexité des mécanismes de sélection des particules. Les sédiments les mieux triés sont généralement ceux ayant des diamètres de l'ordre de 0,1 à 0,3 mm (1,70 à 30) car ces particules nécessitent une vitesse d'érosion moindre (SLY et al., 1983). Les courbes de Hjulström montrent que les particules les plus faciles à éroder se situent entre 0,1 et 0,5 mm (10 et 3,30) où la vitesse nécessaire à l'érosion est d'environ 20 cm/sec (Figure 8). Ces mêmes particules se déposeront lorsque les vitesses diminueront à

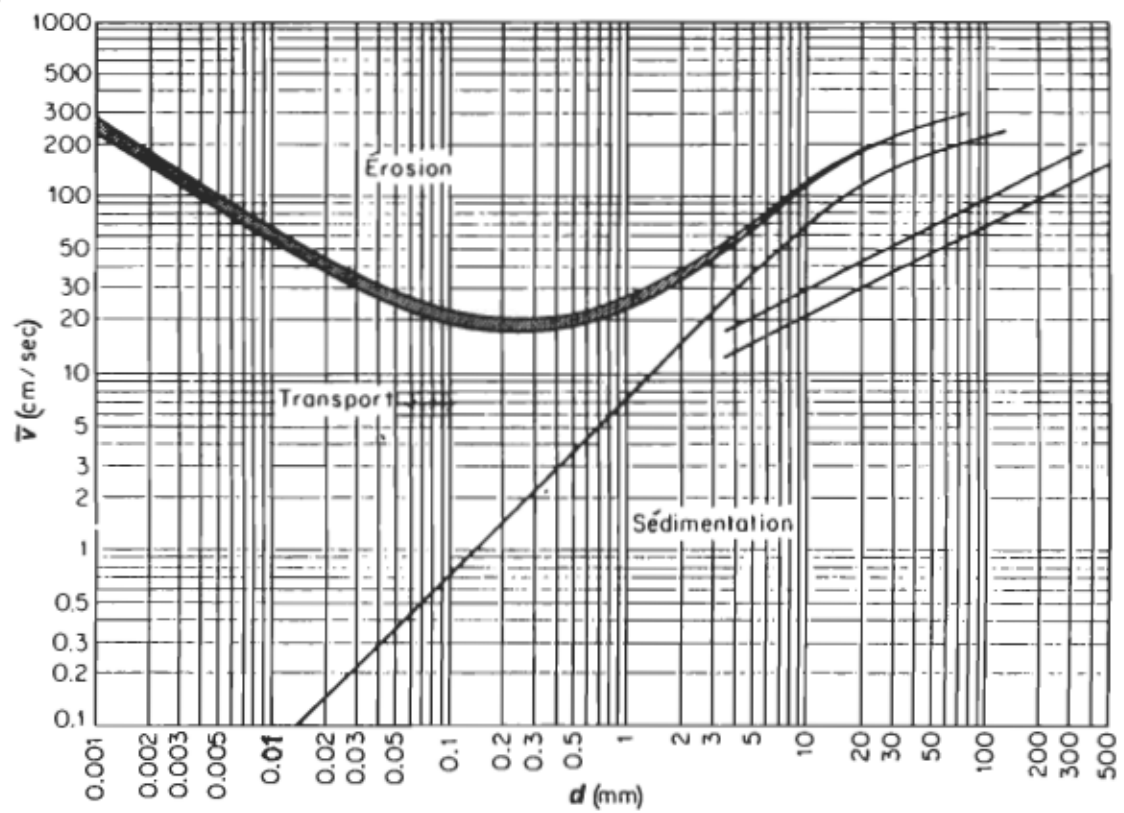


Figure 8. Courbes de Hjulström (source, GRAF, fig. 6.2, 1971)

environ 0,7 cm/sec pour les grains de 0,1 mm et 3,5 cm/sec pour ceux de 0,5 mm.

Les indices SK et KG sont reliés à la fréquence et à la durée des fluctuations d'énergie de l'agent de dépôt. Si SK est positif, le sédiment présente un excès de matériel fin et si SK est négatif, le sédiment accuse un excès de matériel grossier. Une courbe présentant une forte acuité (sédiment unimodal) aura une valeur de KG élevée alors que le sédiment bimodal ou multimodal aura une valeur de KG inférieure à 1,0. Si SK ou KG présentent des valeurs constantes, ceci implique une stabilité des conditions hydrauliques du cours d'eau (MARTINS, 1965).

Selon VISHER (1969), l'allure des courbes de distribution granulométrique révélerait les mécanismes de transport des sédiments. L'étendue de la distribution des diamètres  $\phi$  sur l'axe horizontal reflète l'efficacité du triage des particules par l'agent de dépôt. Les courbes présentant une forte pente sont le signe d'un sédiment bien trié. La plupart des courbes présentent des segments de droite plutôt qu'une seule droite uniforme. Ces segments de droite sont associés aux différents modes de transport des sédiments ainsi qu'à un mélange de matériaux provenant de sources différentes (VISHER, 1969; WALTON et al., 1980).

Les principaux modes de transport des sédiments sont la suspension, la saltation et le roulement. Ces modes de déplacement dépendent de la dimension des particules et de la vitesse de l'agent de transport. Les grains grossiers se déplacent généralement par traction alors que les grains plus fins sont transportés par suspension. Certaines particules seront entraînées par suspension intermittente selon leur mobilité potentielle. Les particules de limon et d'argile se déplacent surtout en suspension uniforme et seront transportées vers l'aval d'un cours d'eau ou emmagasinées sur la plaine inondable lors des crues printanières.

### 3.1.2 Analyses granulométriques des échantillons

Le Tableau 1 donne les résultats du calcul des indices granulométriques pour chacun des 89 échantillons analysés. Le champ de valeurs des indices granulométriques montre qu'il existe un chevauchement des valeurs associées aux indices  $KG$  et  $SK$  pour les quatre groupes d'échantillons (Tableau 2).

TABLEAU 1

## Résultats des analyses granulométriques

N°	Échantillons	MZ Ø	$\sigma_z$ Ø	SK	KG
1	Sol (amont)	4,68	1,47	0,42	1,17
2		4,93	1,71	0,38	1,29
3		5,47	1,74	0,27	1,17
4		4,85	1,67	0,25	1,22
5	Sol (centre)	4,87	1,90	0,29	1,62
6		4,48	1,68	0,31	1,88
7		4,95	2,04	0,44	1,37
8		4,98	1,89	0,51	1,73
9		4,77	1,77	0,31	1,28
10		4,92	1,90	0,20	1,18
11		5,37	2,00	0,28	1,22
12		5,15	2,05	0,35	1,28
13		5,38	2,13	0,23	1,27
14		5,47	2,09	0,24	1,24
15	Sol aval	4,48	1,81	0,38	1,24
16		5,25	2,14	0,32	1,14
17		5,13	2,06	0,34	1,20
18		4,90	1,98	0,33	1,20
19	Dépôts sur pente	5,27	1,75	0,31	1,23
20		4,83	1,98	0,30	1,02
21		5,23	1,57	0,36	1,51
22		5,15	1,99	0,48	1,73
23		5,22	2,09	0,42	1,53
24		4,93	1,57	0,43	1,58
25		5,08	1,95	0,41	1,43
26		5,25	2,13	0,27	1,21
27		5,28	2,26	0,36	1,51

TABLEAU 1 (suite)

N°	Échantillons	MZ Ø	$\sigma_x$ Ø	SK	KG
28	Dépôts	3,81	0,85	0,14	1,19
29	sur	3,62	1,20	0,15	1,43
30	berge	3,73	1,20	0,29	1,82
31	(amont)	3,37	0,88	-1,10	0,95
32		3,37	1,24	0,49	1,82
33		3,20	1,12	0,43	1,64
34		3,42	1,16	0,26	1,26
35	Dépôts	3,33	0,83	0,25	1,27
36	sur	3,18	0,98	0,22	1,16
37	berge	3,55	1,05	0,28	1,35
38	(aval)	3,37	0,96	0,32	1,34
39		3,78	1,35	0,32	1,43
40		3,08	0,86	0,27	1,17
41		3,60	1,01	0,30	1,35
42	station 3A	1,63	0,40	0,14	1,46
43	3A	1,73	0,47	0,22	1,59
44	3A	1,55	0,49	0,11	1,42
45	Sédiments 3A	1,53	0,46	0,11	1,48
46	de 3A	1,42	0,58	0,00	1,39
47	fond 3A	1,00	0,52	0,31	1,10
48	3B	1,90	0,54	0,18	1,13
49	3B	1,88	0,50	0,31	1,27
50	A = sans 3B	2,13	0,75	0,26	1,00
51	averse 3B	1,80	0,59	0,31	1,56
52	3B	1,90	0,57	0,31	1,23
53	B = après 3B	1,85	0,63	0,30	1,36
54	averses 4A	1,40	0,59	0,03	1,32
55	4A	1,68	0,64	0,07	1,51
56	4A	1,98	0,67	0,29	1,15
57	4A	1,38	0,54	-0,03	1,37
58	4A	1,28	0,64	0,09	1,18
59	4A	1,18	0,58	0,02	1,07
60	4B	1,52	0,57	0,17	1,75
61	4B	1,33	0,54	0,01	1,37
62	4B	1,73	0,70	0,26	1,84
63	4B	1,42	0,45	-0,04	1,23

TABLEAU 1 (suite)

N°	Échantillons	MZ Ø	$\sigma_x$ Ø	SK	KG
64	4B	1,78	0,65	0,25	1,79
65	4B	1,58	0,53	0,22	1,64
66	5A	1,77	0,76	0,05	1,00
67	5A	1,87	0,56	0,22	1,20
68	5A	1,85	0,70	0,00	1,05
69	5A	1,65	0,57	0,15	1,26
70	5A	1,30	0,64	0,08	1,15
71	5A	1,43	0,60	-0,01	1,05
72	5B	1,10	0,54	-0,01	1,02
73	5B	1,23	0,55	-0,02	1,04
74	5B	1,38	0,45	-0,07	1,43
75	5B	1,23	0,67	0,06	1,28
76	5B	1,52	0,52	0,08	1,49
77	5B	1,45	0,57	0,02	1,57
78	6A	1,00	0,53	0,28	1,17
79	6A	1,02	0,54	0,36	1,13
80	6A	1,43	0,49	0,13	1,20
81	6A	1,07	0,53	-0,33	1,02
82	6A	1,37	0,61	0,19	0,99
83	6A	1,02	0,53	0,36	1,10
84	6B	1,38	0,45	-0,09	1,19
85	6B	1,58	0,39	-0,03	1,37
86	6B	1,52	0,49	0,07	1,38
87	6B	1,48	0,51	-0,02	1,33
88	6B	1,58	0,36	0,17	1,14
89	6B	1,57	0,36	0,16	1,18

TABLEAU 2  
 Champ de valeurs des indices granulométriques  
 par groupe d'échantillons

Groupes	MZ ( $\emptyset$ )	$\sigma_x$ ( $\emptyset$ )	SK	KG	Nombre
Échantillons de sol	4,48	1,47	0,20	1,14	18
	à 5,47	à 2,14	à 0,51	à 1,88	
Dépôts sur pente	4,83	1,57	0,27	1,02	9
	à 5,28	à 2,26	à 0,48	à 1,73	
Dépôts sur berge	3,08	0,83	-0,10	0,95	14
	à 3,81	à 1,35	à 0,49	à 1,82	
Sédiments de fond	1,00	0,36	-0,09	0,99	48
	à 2,13	à 0,76	à 0,36	à 1,84	

Les valeurs de MZ et  $\sigma_x$  se chevauchent pour les groupes d'échantillons de sol et de dépôts sur pente alors que les dépôts sur berge et les sédiments de fond se distinguent bien à partir de ces indices (Figures 9 et 10).

À première vue, il semblerait que les indices KG et SK ne soient pas des paramètres qui permettent de bien distinguer les quatre groupes d'échantillons. Les dépôts sur berge et les sédiments de fond paraissent former des groupes distincts surtout en ce qui concerne leurs diamètres moyens (MZ).



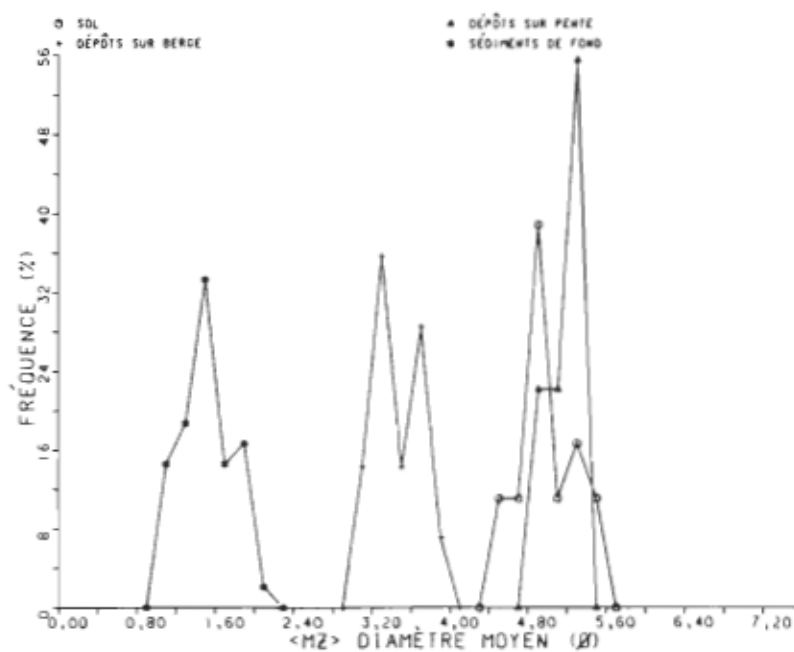


Figure 9. Fréquence d'apparition des diamètres moyens( $\overline{M_z}$ ) par groupe d'échantillons

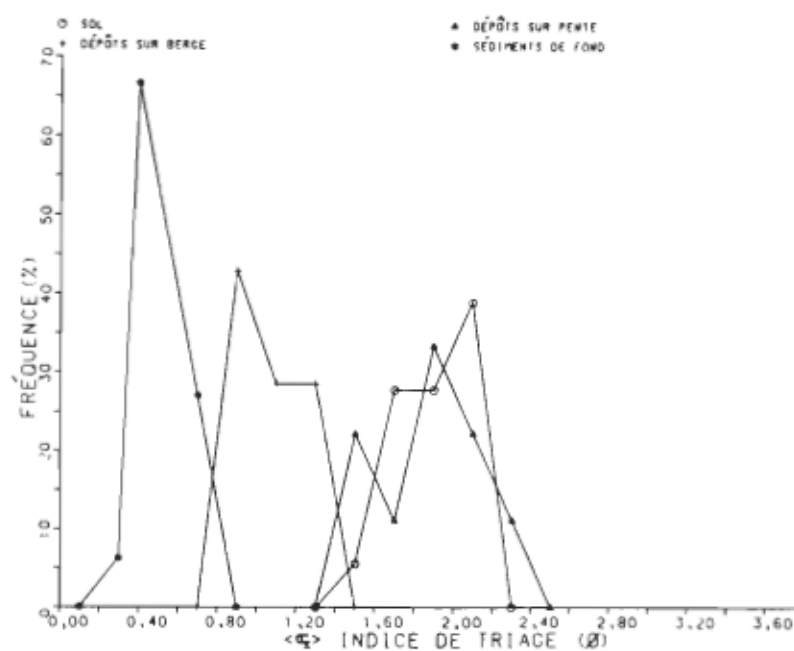


Figure 10. Fréquence d'apparition des indices de triage( $\sigma_z$ ) par groupe d'échantillons

Le Tableau 3 présente les valeurs moyennes des indices granulométriques par groupe d'échantillons et la Figure 11 illustre les courbes granulométriques moyennes pour chacun des groupes.

**TABLEAU 3**  
Valeurs moyennes des indices granulométriques  
par groupe d'échantillons

Groupes	MZ ( $\phi$ )	$\sigma_z$ ( $\phi$ )	SK	KG
Échantillons de sol	5,01	1,89	0,34	1,32
Dépôts sur pente	5,14	1,92	0,37	1,42
Dépôts sur berge	3,46	1,05	0,26	1,37
Sédiments de fond	1,51	0,55	0,13	1,29

Considérant que la pente des courbes granulométriques reflète le degré de triage des sédiments, on constate que les sédiments de fond sont mieux triés et plus grossiers que les autres groupes d'échantillons. Les courants qui ont trié les sédiments de fond possédaient une énergie (vitesse) relativement constante qui permettait la sélection de grains particuliers.

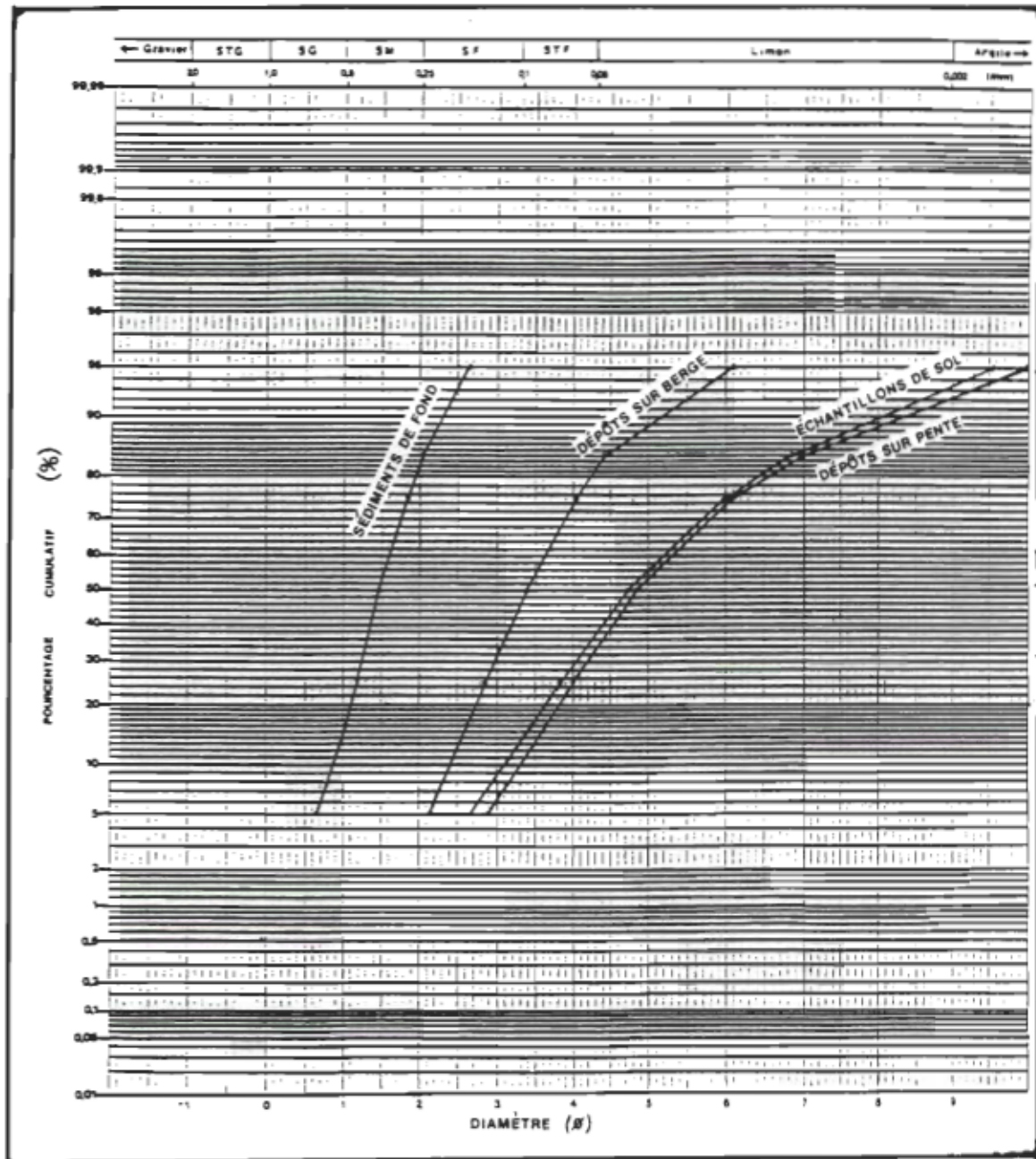


Figure 11. Courbes granulométriques moyennes par groupe d'échantillons

La Figure 12 exprime la relation entre  $MZ$  et  $\sigma_x$  pour les sédiments de fond. La forme en V de cette figure a également été observée par FOLK et WARD (1957) et par SLY et al. (1983) pour une étendue de valeurs de  $MZ$  beaucoup plus grande (-50 à 70). La relation  $MZ-\sigma_x$  montre que le triage s'améliore pour les particules dont le diamètre est d'environ 1,550 (0,34 mm) et que, de part et d'autre de cette valeur, le triage devient moins efficace. Si on en juge par la position des points sur la Figure 12, le fait que certains échantillons aient été récoltés à la suite d'averses ne semble pas affecter la relation  $MZ-\sigma_x$ .

Les particules les mieux triées se situent au centre des sables moyens (10 à 20) et lorsqu'une portion de sables fins ou de sables grossiers s'ajoute aux sables moyens, l'homogénéité du sédiment est affectée et le triage s'appauvrit.

Les particules de 1,550 nécessitent des vitesses d'érosion moindres et sont donc plus facilement érodables. À ce titre, elles constituent l'unité modale des sédiments de fond. Cette observation s'appuie également sur la relation entre  $MZ$  et  $KG$  (Figure 13). Selon SLY et al. (1983), lorsque le triage est très bon et que l'acuité est élevée, le sédiment est unimodal et relativement symétrique (i.e. sans excès de matériel fin ou grossier). Toutefois, cette situa-

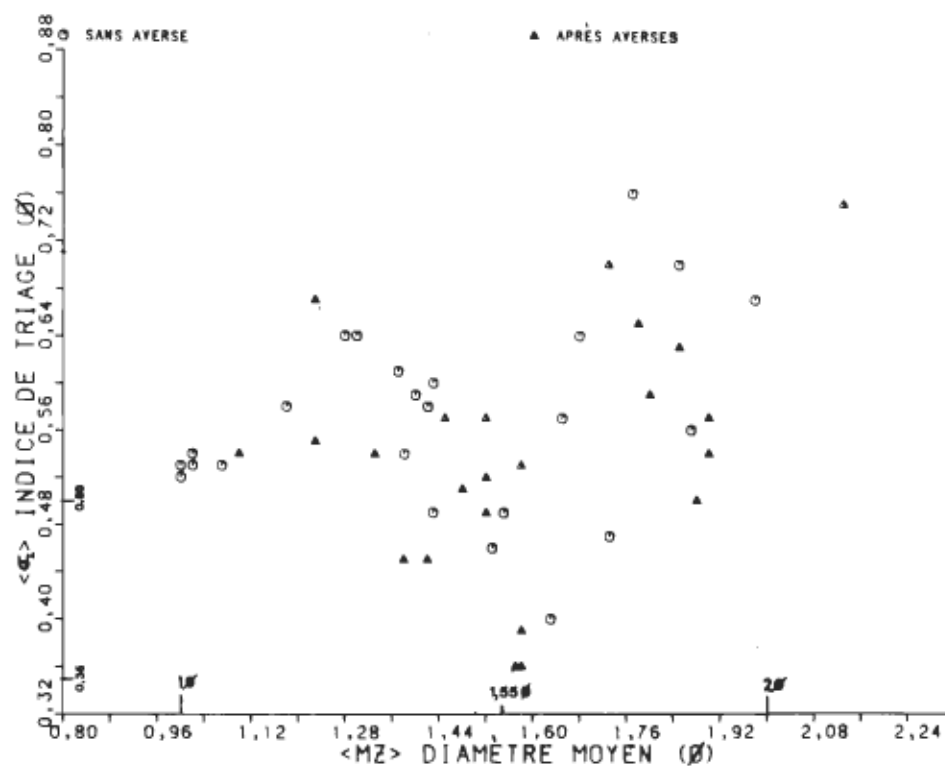


Figure 12. Relation entre l'indice de triage( $I_s$ ) et le diamètre moyen( $M_Z$ ) des sédiments de fond

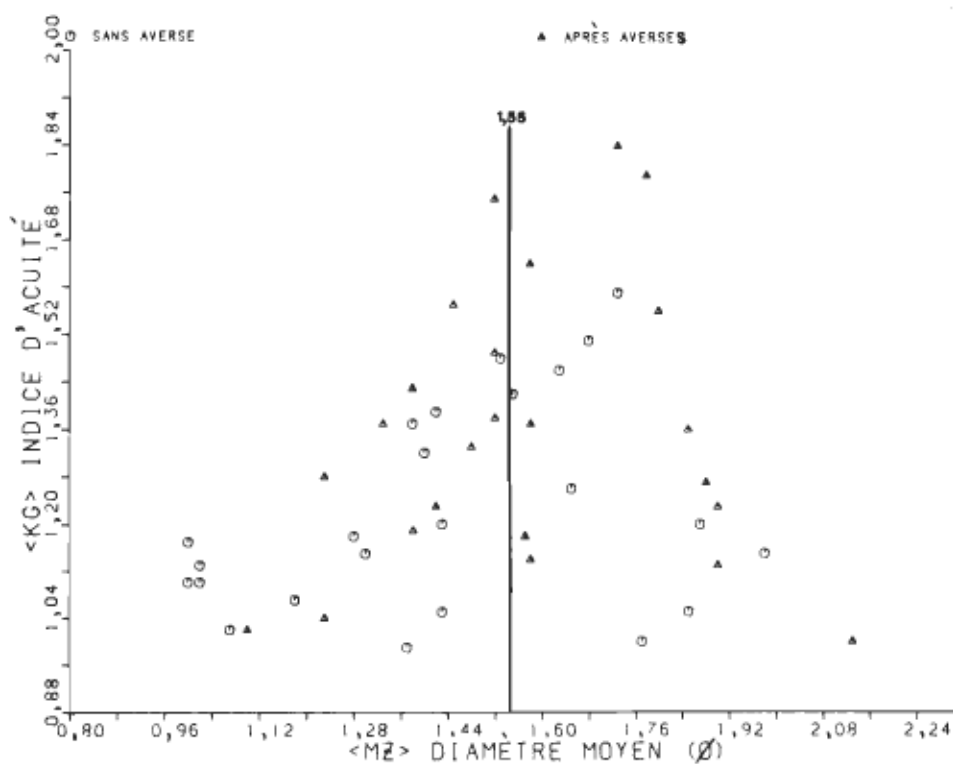


Figure 13. Relation entre l'indice d'acuité( $I_{KG}$ ) et le diamètre moyen( $M_Z$ ) des sédiments de fond

tion est très instable car une légère addition de particules fines ou grossières appauvrira l'uniformité du sédiment. Au moment où le sable de 1,55 $\phi$  se dépose, une légère fluctuation de la vitesse du courant conduira soit à la sédimentation ou à l'arrachement et au transport de la particule.

La courbe des dépôts sur berge (Figure 11) présente dans sa partie supérieure une brisure de pente qui suggère un triage moins efficace des particules fines ( $<0,05$  mm). Cette relation est mise en évidence par la Figure 14 qui montre que le contenu en argile des dépôts sur berge augmente en fonction des fluctuations d'énergie ( $\sigma_x$ ) de l'agent de transport. L'importance des fluctuations de la vitesse du courant lors des crues printanières impliquerait la prise en charge d'une plus grande quantité de particules fines, lesquelles se seraient par la suite déposées sous l'action d'un courant peu sélectif ( $\sigma_x = 1,05$ , Tableau 3).

Le mode de transport des sédiments de fond et des dépôts sur berge peut-être étudié à l'aide du diagramme C-M de PASSEGA (1957, 1964, 1977). Ce diagramme met en relation le diamètre maximum du sédiment (C), correspondant au centile supérieur (1%) des courbes granulométriques des dépôts sur berge, et le diamètre médian (M), qui représente le cinquantième centile (50%) des courbes granulométriques.

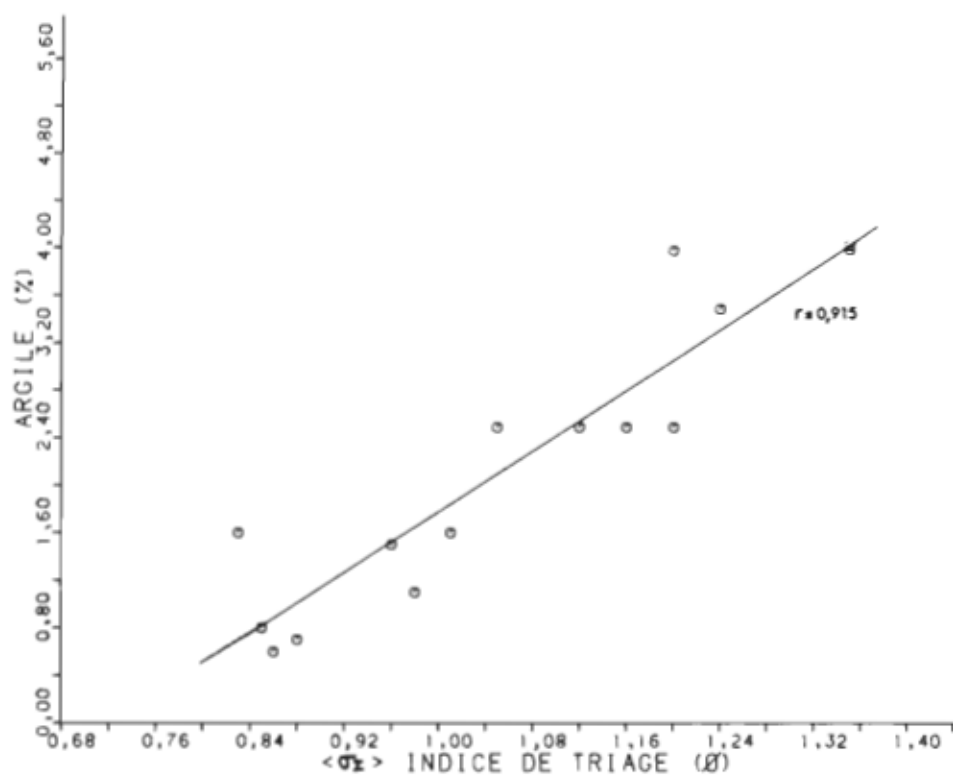


Figure 14. Relation entre le pourcentage d'argile des dépôts sur berge et leurs indices de triage( $\sigma$ )

La Figure 15 présente le diagramme C-M représentant les principaux modes de transport fluvial (PASSEGA, 1977) sur lequel nous avons positionné les valeurs C et M de nos échantillons de sédiments de fond et de dépôts sur berge. Le segment PQ du diagramme correspond aux particules transportées par roulement alors que le segment RS englobe les particules en suspension uniforme. ROYSE (1968) et RIVIÈRE (1977) soulignent que le segment RS est souvent associé aux sédiments des plaines de débordement. Le segment QR représente, quant à lui, la suspension gradée ou intermittente. À partir de ces observations, on peut supposer que les sédiments de fond sont soumis au roulement et que les dépôts sur berge proviennent de la suspension uniforme lors des crues printanières. Entre ces deux modes de transport, nous retrouvons les particules en suspension intermittente trop grosses pour être transportées en suspension uniforme et trop petites pour être roulées. Ce mode de transport est absent de notre échantillonnage et ne paraît donc pas sur le segment QR.

Si on suppose que les particules transportées en suspension par le vent ont des diamètres inférieurs à 0,5 mm (TRODEH et al., 1980), nous obtenons, à partir de la courbe granulométrique moyenne de dépôts sur pente (Figure 11), un pourcentage de 66% de particules transportées en suspension éolienne. La Figure 16 met en relation le pourcentage de



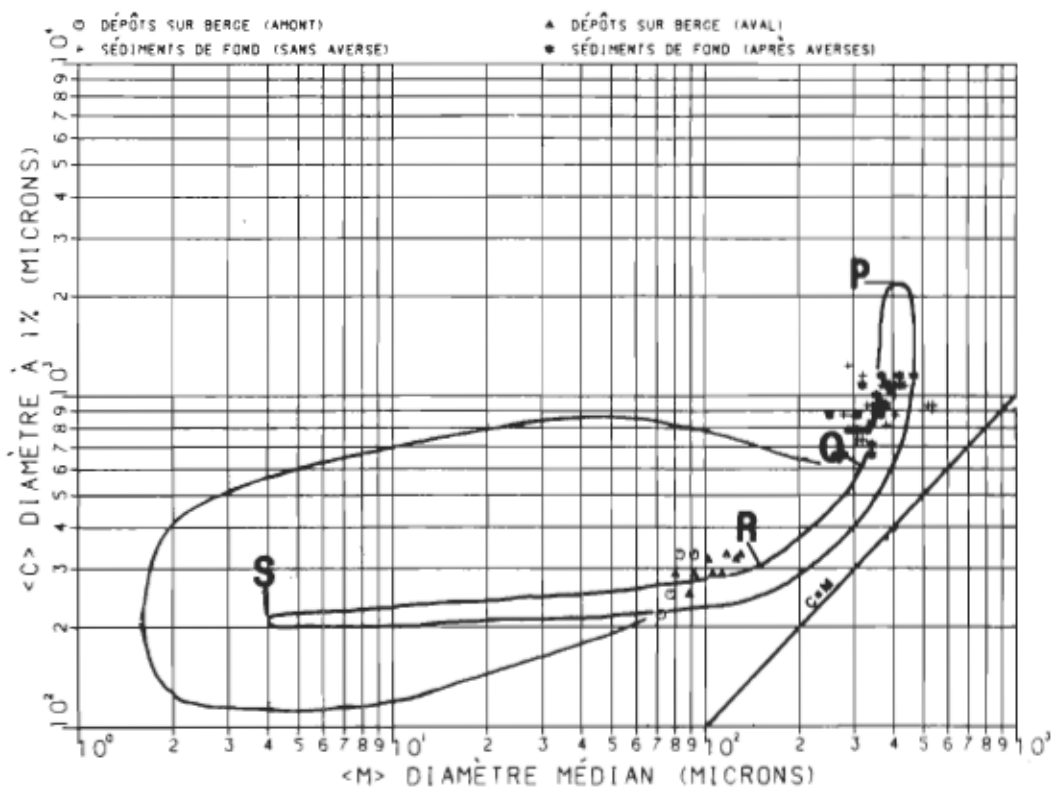


Figure 15. Diagramme C-M des sédiments de fond et des dépôts sur berge (d'après PASSEGA, 1977)

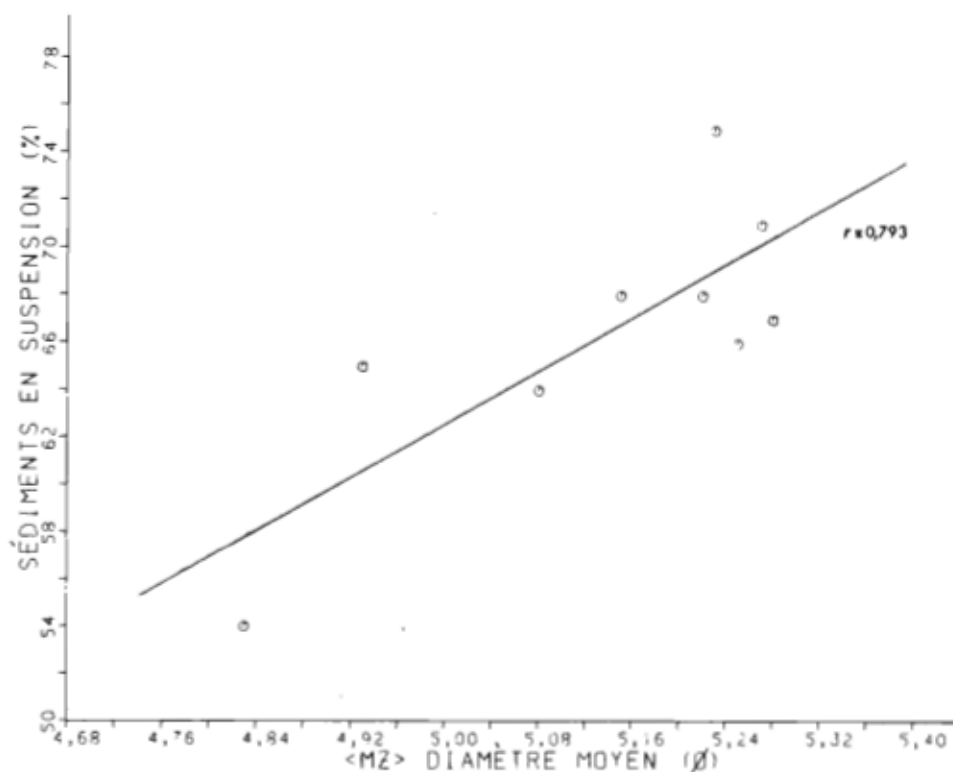


Figure 16. Relation entre le pourcentage de sédiments en suspension éolienne des dépôts sur pente et leurs diamètres moyens (MZ)

sédiments en suspension éolienne et le diamètre moyen (MZ) des dépôts sur pente. On constate que les dépôts les plus fins accusent un plus fort pourcentage de particules transportées en suspension. Lorsque la vitesse du vent est faible (faible énergie), ce dernier a tendance à transporter les particules fines au détriment des plus grosses. Les particules fines ainsi arrachées du sol par l'érosion éolienne ne peuvent assurer la fertilité des terres agricoles.

Il est intéressant de remarquer la similitude qui existe entre la granulométrie des échantillons de sol et celle des dépôts sur pente (Figure 11 et Tableau 3). L'étendue du diamètre des particules qui composent les dépôts sur pente implique que le processus d'érosion éolienne n'est pas très sélectif et/ou que le vent est assez compétent pour transporter toutes les particules du sol. Considérant que le diamètre des particules du sol ne dépasse guère 2 mm et que la vitesse du vent nécessaire à leur transport est d'environ 55 cm/sec (GARDINER et al., Fig. 9.2, 1983), il est fort probable que les vents du printemps puissent être assez puissants pour transporter les particules de 2 mm et moins.

### 3.1.3 Discrimination granulométrique

Pour déterminer quels sont, parmi les indices granulométriques MZ,  $\sigma_1$ , SK et KG, ceux qui permettent le mieux de

distinguer les types d'échantillons récoltés, nous aurons recours à l'analyse discriminante par étapes (SPSS-X 1986). Cette analyse fera ressortir dans l'ordre de leur importance, les indices qui discriminent le mieux les groupes étudiés. Le maximum de séparation entre les groupes d'échantillons sera obtenu par la méthode de distance de Mahalanobis (MATHER, 1976; DILLON et al., 1984). Le test de F confirmera l'acceptation de l'indice comme variable discriminante. Le niveau de tolérance minimum de F sera de 1,00. Le Tableau 4 révèle que seuls les indices MZ et  $\sigma_x$  ont été jugés discriminants par notre analyse ( $F > 1$ ). On remarque également que MZ est très discriminant à l'égard des groupes d'échantillons. C'est donc dire que l'énergie moyenne (MZ) de l'agent de dépôt et sa fluctuation ( $\sigma_x$ ) sont des facteurs déterminants dans la granulométrie des sédiments.

TABLEAU 4

Résultats de l'analyse discriminante

Indices	F
MZ	60,88
$\sigma_x$	15,54
SK	0,44
KG	0,69

La figure 17 résume la relation qui existe entre l'indice de triage ( $\sigma_1$ ) et le diamètre moyen (MZ) des échantillons récoltés le long du ruisseau. Cette figure présente trois regroupements: un premier composé des sédiments de fond, un second composé des dépôts sur berge et un troisième composé des échantillons de sol et des dépôts sur pente. La position des dépôts sur pente et des échantillons de sol confirme le lien d'origine granulométrique entre ces échantillons. On peut associer également la position des groupes d'échantillons et l'endroit de leur récolte sur le terrain. Au niveau du sol, nous retrouvons des échantillons fins et très mal triés (échantillons de sol et dépôts sur pente) alors que les sédiments récoltés au fond du ruisseau se composent de sables moyens bien triés. Entre ces deux milieux, nous retrouvons les sables fins, mal triés, déposés sur les berges du ruisseau par les crues printanières. On pense que la gravité peut avoir joué un rôle dans cette sélection de particules. La figure 17 peut servir de modèle pour distinguer les groupes d'échantillons à partir de leurs diamètres moyens (MZ) et de leurs indices de triage ( $\sigma_1$ ) mais ce modèle ne permet pas toutefois de différencier les échantillons de sol et les dépôts sur pente.

Notre première hypothèse est donc vérifiée, à savoir l'existence d'indices granulométriques qui permettent de distinguer les types d'échantillons récoltés, en l'occur-

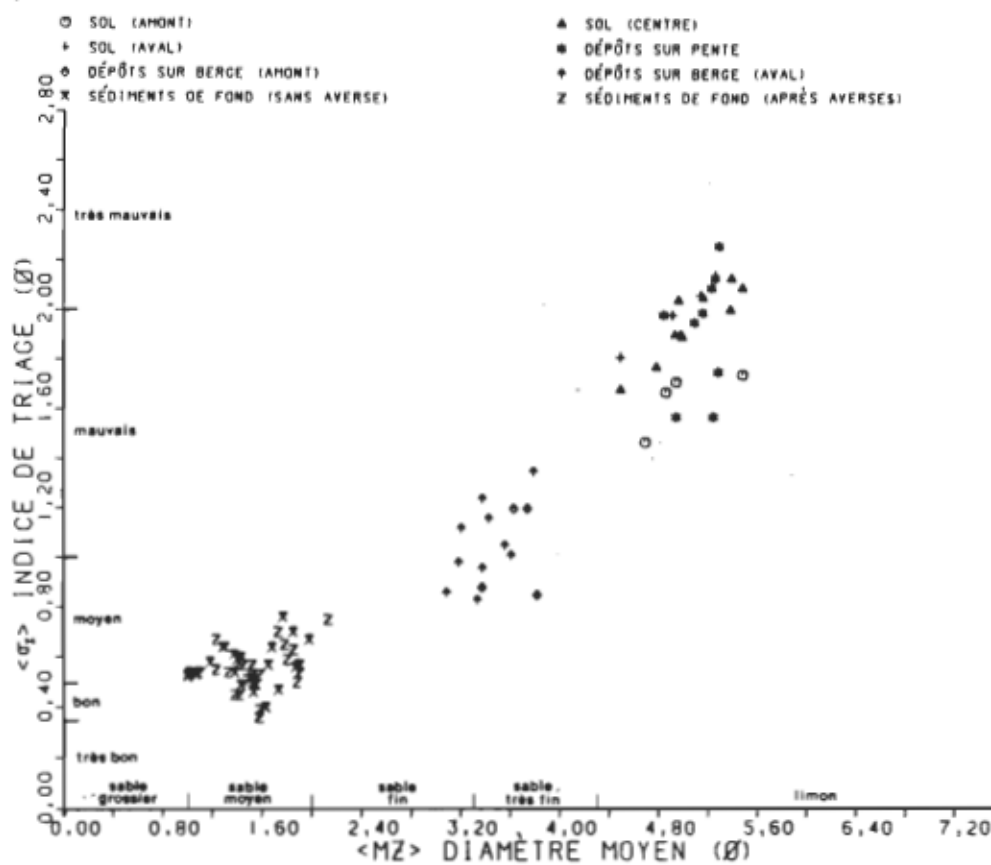


Figure 17. Relation entre les indices de triage( $\sigma_I$ ) et les diamètres moyens(MZ) des matériaux récoltés le long du ruisseau

rence le diamètre moyen (MZ) et l'indice de triage ( $\sigma_1$ ). Ces indices ont également été mis en évidence par FRIEDMAN, (1967), ROY et al., (1975) et ABU EL-ELLA et al., (1985) pour des milieux différents des nôtres. Soulignons finalement la part importante de la discrimination par MZ qui pourrait être liée à l'étendue des valeurs du diamètre moyen des particules disponibles le long du ruisseau de l'Arbre-à-la-Croix, à l'énergie des agents de déposition (eau, vent, neige) ou à la position relative des échantillons sur le territoire étudié.

### 3.2 Effets des précipitations sur la profondeur moyenne, les sédiments en suspension et la granulométrie des sédiments de fond du ruisseau

#### 3.2.1 Considérations théoriques

Parmi les facteurs responsables de l'arrachement et du transport des particules du sol, les précipitations sont reconnues comme des plus importants (FOURNIER, 1949; LANGBEIN et al., 1958; WISCHMEIER et al., 1958; GUY, 1964; FEDOROFF, 1965; McGUINNESS et al., 1971; DUBÉ, 1975). En frappant la surface du sol, les gouttes de pluie possèdent assez d'énergie pour détacher les particules et les éjecter à courte distance. Les particules les plus fines sont les plus susceptibles d'être transportées par le ruissellement vers

le cours d'eau. La présence d'un couvert végétal limite toutefois l'action érosive des gouttes de pluie et diminue le transport des sédiments par ruissellement. L'exposition du sol par l'activité agricole accroît sa vulnérabilité à l'érosion (érodabilité). Celle-ci dépend de la texture du sol et de son utilisation. L'érodabilité du sol sera accrue lors de la fonte des neiges.

L'agressivité des précipitations (érosivité) sera d'autant plus dommageable pour le sol que les précipitations seront intenses, particulièrement durant la période estivale. Les précipitations des mois de mai à octobre contribuent pour près de 90% de l'érosivité annuelle de nos régions (WALL et al., 1983). Par ailleurs, KIRBY et al. (1987) soulignent que les pertes de sol s'avèrent plus élevées en été qu'en hiver dans le sud du Québec.

L'érosion fluviale sera également influencée par les précipitations. Les particules fines transportées par ruissellement alimenteront le cours d'eau en sédiments en suspension alors que les particules plus grossières se retrouveront au fond du cours d'eau. Une petite quantité de particules fines sera cependant emprisonnée entre des grains plus grossiers. Les sédiments fins ainsi piégés auront moins tendance à être emportés par le courant (RIVIÈRE, 1977) ce

qui expliquerait leur présence, en faible quantité, dans les sédiments de fond du ruisseau.

Lorsque le niveau d'eau du ruisseau s'élève à la suite d'une averse, le volume et la vitesse de l'eau qui s'écoule augmentent et accroissent alors la puissance du ruisseau (DERRUAU, 1974). Cette augmentation d'énergie du ruisseau permet de combattre les forces qui retiennent les particules au fond et, éventuellement, de les transporter vers l'aval si la vitesse du courant le permet.

L'érosion des berges et du lit du ruisseau sera aussi influencée par l'augmentation de la profondeur d'eau résultant des précipitations. L'effet de la profondeur sur le transport des sédiments varie selon la dimension des sédiments de fond (COLBY, 1961). La présence de discontinuités dans le transport des sédiments le long des cours d'eau est reliée aux variations longitudinales de la géométrie hydraulique des cours d'eau (LEOPOLD et al., 1964; CARLSTON, 1969; PICKUP, 1975; RICHARDS, 1977; KLEIN, 1982). Selon SENGUPTA (1979) et GHOSH et al. (1981), la granulométrie des sédiments de fond exerce un certain contrôle sur les particules susceptibles à la suspension. La proportion de sédiments de fond qui entre en suspension augmente lorsque leur diamètre diminue. L'interaction entre le matériel du lit et l'apport



de sédiments modifie donc la granulométrie de la couche de sédiments de fond.

À mesure qu'un courant perd graduellement de sa vitesse, les particules en suspension se déposent dans l'ordre décroissant de leur vitesse de chute (settling velocity). Les plus grosses particules se déposent les premières, suivies des plus petites (HALLERMEIER, 1981). Ce triage hydraulique entraîne donc une réduction du diamètre moyen des sédiments de fond vers l'aval du cours d'eau. Cette diminution s'accompagne généralement d'une amélioration du triage des particules (KNIGHTON, 1980; McLAREN et al., 1985). L'érosion des berges et la présence de sources tributaires peuvent cependant engendrer des irrégularités dans la variation longitudinale des caractéristiques granulométriques des sédiments de fond.

Finalement, soulignons que les variations granulométriques des sédiments reflètent l'effet des processus et des événements qui sont apparus au cours d'une période de temps indéfinie et que ces changements apparaissent de façon systématique selon l'importance des conditions hydrauliques et du climat (KNIGHTON, 1980; GOMEZ, 1983).

### 3.2.2 Résultats des mesures effectuées le long du ruisseau

Pour mesurer l'impact des précipitations sur la profondeur moyenne du ruisseau ( $P_m$ ), la concentration de sédiments en suspension ( $S_s$ ) et la granulométrie des sédiments de fond ( $MZ$  et  $\sigma_1$ ), nous aurons recours à la comparaison de deux séries de mesures effectuées lors de conditions climatiques différentes. Une série de mesures a été effectuée sans averse et une autre après averse (environ une heure après la fin de l'averse). La Figure 7 (cf. page 29) localise les stations de mesures le long du ruisseau et les Tableaux 5 et 6 présentent les résultats de ces mesures pour chacune des stations.

La Figure 18 donne la distribution mensuelle des mesures concernant la profondeur moyenne et les sédiments en suspension pour chacune des conditions climatiques étudiées. Au total, 32 mesures de  $P_m$  et  $S_s$  ont été effectuées pour chaque station, soit 18 mesures sans averse et 14 mesures à la suite d'averses. Les précipitations ( $Pr$ ) variaient de 9,2 mm à 78 mm de pluie. Les mesures effectuées à la suite d'averses se répartissent équitablement au cours de la période d'étude alors que les mesures effectuées sans averse se concentrent principalement entre les mois de juin et septembre. Les données relatives aux diamètres moyens ( $MZ$ )

**TABLEAU 5**  
**Résultats des mesures effectuées**  
**sans averse**

	STATION 3				STATION 4				STATION 5				STATION 6			
Pr (mm)	Pm (m)	Ss (mg/l)	MZ (mm)	$\epsilon_1$ ( $\phi$ )	Pm (m)	Ss (mg/l)	MZ (mm)	$\epsilon_1$ ( $\phi$ )	Pm (m)	Ss (mg/l)	MZ (mm)	$\epsilon_1$ ( $\phi$ )	Pm (m)	Ss (mg/l)	MZ (mm)	$\epsilon_1$ ( $\phi$ )
0	0,10	15,44	0,32	0,40	0,11	16,53	0,38	0,59	0,10	15,03	0,29	0,76	0,09	21,82	0,50	0,53
0	0,06	20,00			0,10	20,91			0,11	18,82			0,09	22,31		
0	0,11	19,05			0,12	11,06			0,11	18,44			0,11	18,85		
0	0,10	16,53			0,11	20,69			0,11	16,07			0,10	26,85		
0	0,09	19,19	0,30	0,47	0,10	22,84	0,31	0,64	0,10	16,08	0,27	0,56	0,09	21,12	0,49	0,54
0	0,07	18,52			0,07	25,85			0,07	10,75			0,09	37,50		
0	0,06	16,18			0,08	17,27			0,08	12,61			0,11	32,47		
0	0,04	12,11			0,06	13,21			0,06	5,01			0,08	15,19		
0	0,04	4,70	0,34	0,49	0,04	3,57	0,25	0,67	0,09	18,86	0,28	0,70	0,06	19,41	0,37	0,49
0	0,05	7,02			0,09	10,36			0,09	20,06			0,07	15,38		
0	0,09	15,38			0,14	22,18			0,13	20,80			0,07	25,00		
0	0,05	2,46			0,06	5,83			0,06	4,02			0,07	18,02		
0	0,06	5,09			0,05	11,43			0,05	7,30			0,06	10,87		
0	0,08	4,42	0,35	0,46	0,07	7,14	0,38	0,54	0,07	7,66	0,32	0,57	0,07	15,18	0,48	0,53
0	0,12	8,26			0,12	11,05			0,12	18,81			0,12	26,19		
0	0,08	2,73			0,07	7,21			0,07	9,87			0,03	12,74		
0	0,06	5,88	0,37	0,58	0,07	12,07	0,41	0,64	0,07	11,24	0,41	0,64	0,07	31,12	0,39	0,61
0	0,13	15,01	0,50	0,52	0,14	15,32	0,44	0,58	0,13	14,84	0,37	0,60	0,10	20,11	0,49	0,53
$\bar{X}$	0,08	11,55	0,36	0,49	0,09	14,14	0,36	0,61	0,09	13,68	0,32	0,64	0,08	21,67	0,45	0,54
S	0,03	6,35	0,07	0,06	0,03	6,45	0,07	0,05	0,03	5,34	0,06	0,08	0,02	7,13	0,06	0,04

Pr : précipitations en millimètres (mm)

Pm : profondeur moyenne en mètre (m)

Ss : concentration de sédiments en suspension en milligrammes par litre (mg/l)

MZ : diamètre moyen des sédiments de fond en millimètre (mm)

$\epsilon_1$  : indice de triage des sédiments de fond en unité phi ( $\phi$ )

$\bar{X}$  : valeurs moyennes

S : écart-type des valeurs moyennes

TABLEAU 6

Résultats des mesures effectuées

après averse

	STATION 3				STATION 4				STATION 5				STATION 6			
Pr (mm)	Pm (m)	Ss (mg/l)	MZ (mm)	$\sigma_1$ ( $\phi$ )	Pm (m)	Ss (mg/l)	MZ (mm)	$\sigma_1$ ( $\phi$ )	Pm (m)	Ss (mg/l)	MZ (mm)	$\sigma_1$ ( $\phi$ )	Pm (m)	Ss (mg/l)	MZ (mm)	$\sigma_1$ ( $\phi$ )
10,0	0,16	13,53	0,27	0,54	0,17	14,44	0,35	0,57	0,19	20,99	0,47	0,54	0,13	28,26	0,38	0,45
31,2	0,26	41,22			0,24	38,41			0,25	36,67			0,18	43,58		
19,4	0,23	40,74			0,19	41,76			0,21	42,94			0,15	42,06		
19,2	0,12	16,84			0,12	15,71			0,13	16,50			0,08	23,08		
40,4	0,27	36,55	0,27	0,50	0,26	44,04	0,40	0,54	0,24	38,53	0,43	0,55	0,20	54,08	0,33	0,39
12,2	0,19	24,34			0,17	22,31			0,17	23,81			0,13	25,00		
26,4	0,14	34,02	0,23	0,75	0,13	36,49	0,30	0,70	0,13	33,33	0,38	0,45	0,09	28,05	0,35	0,49
9,2	0,14	13,54			0,14	14,56			0,15	14,89			0,10	16,48		
35,4	0,26	36,87	0,29	0,59	0,25	47,53	0,37	0,45	0,27	45,16	0,43	0,67	0,20	56,11	0,36	0,51
78,2	0,41	47,22			0,43	52,48			0,36	42,26			0,41	76,76		
50,2	0,33	41,51	0,27	0,57	0,32	39,36	0,29	0,65	0,23	40,82	0,35	0,52	0,30	54,00	0,33	0,36
18,6	0,24	22,69	0,28	0,63	0,26	28,18	0,33	0,53	0,23	26,34	0,37	0,57	0,19	37,38	0,37	0,36
15,0	0,26	35,24			0,29	50,00			0,26	41,98			0,24	54,88		
20,4	0,25	33,25			0,28	40,06			0,25	38,88			0,21	46,97		
$\bar{X}$	0,23	31,25	0,27	0,60	0,23	34,67	0,34	0,57	0,22	33,08	0,41	0,55	0,19	41,91	0,35	0,43
S	0,08	11,07	0,02	0,09	0,09	13,28	0,04	0,09	0,06	10,47	0,05	0,07	0,09	16,23	0,02	0,07

Pr : précipitations en millimètres (mm)

Pm : profondeur moyenne en mètre (m)

Ss : concentration de sédiments en suspension en milligrammes par litre (mg/l)

MZ : diamètre moyen des sédiments de fond en millimètre (mm)

 $\sigma_1$  : indice de triage des sédiments de fond en unité phi ( $\phi$ ) $\bar{X}$  : valeurs moyennes

S : écart-type des valeurs moyennes

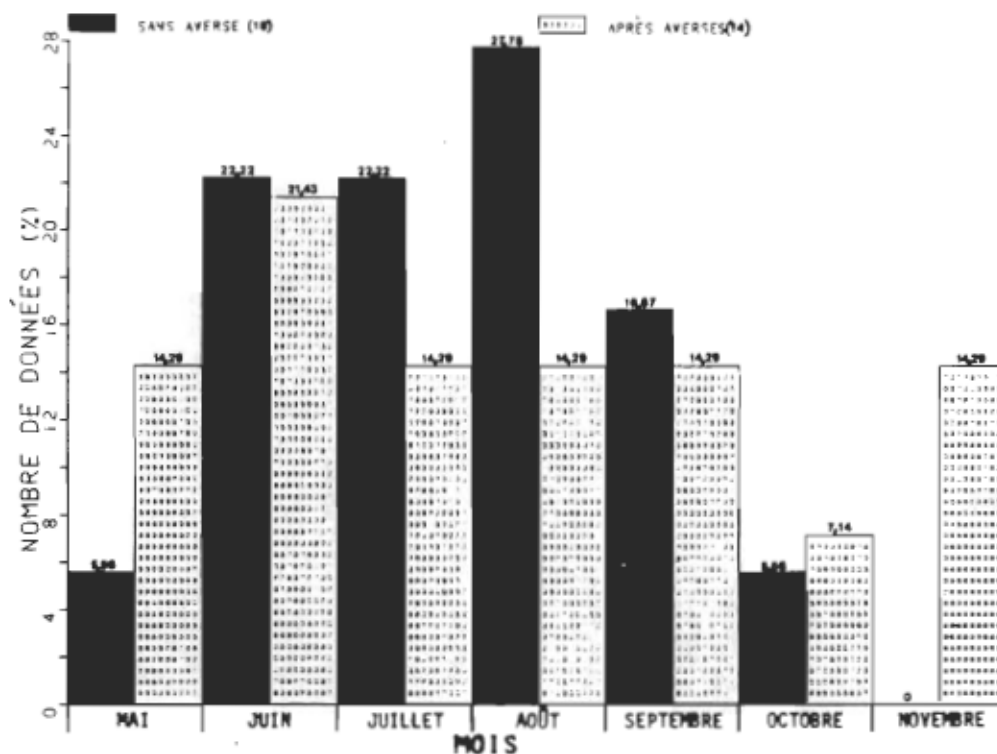


Figure 18. Distribution mensuelle des mesures de profondeurs moyennes et de sédiments en suspension

et aux indices de triage ( $\sigma_1$ ) proviennent du Tableau 1. Les diamètres moyens (MZ) sont exprimés en millimètres.

### 3.2.3 Les variations climatiques et longitudinales

Les Figures 19 à 22 illustrent les variations climatiques et longitudinales des valeurs moyennes de Pm, Ss, MZ et  $\sigma_1$ . L'analyse de variance nous permettra de déterminer s'il existe des différences significatives (seuil de 95%) entre les conditions climatiques d'une part, et entre les stations de mesures d'autre part. Le Tableau 7 présente les résultats de l'analyse de variance effectuée entre les stations pour chacune des conditions climatiques étudiées.

TABLEAU 7  
Résultats de l'analyse de variance  
effectuée entre les stations

STATIONS	SANS AVERSE				APRÈS AVERSES			
	Pm	Ss	MZ	$\sigma_1$	Pm	Ss	MZ	$\sigma_1$
3 et 4	-	-	-	*	-	-	*	-
3 et 5	-	-	-	*	-	-	*	-
3 et 6	-	*	-	-	-	-	*	*
4 et 5	-	-	-	-	-	-	*	-
4 et 6	-	*	-	-	-	-	-	*
5 et 6	-	*	*	-	-	-	-	-

\* : différence significative à 95%

- : différence non-significative à 95%

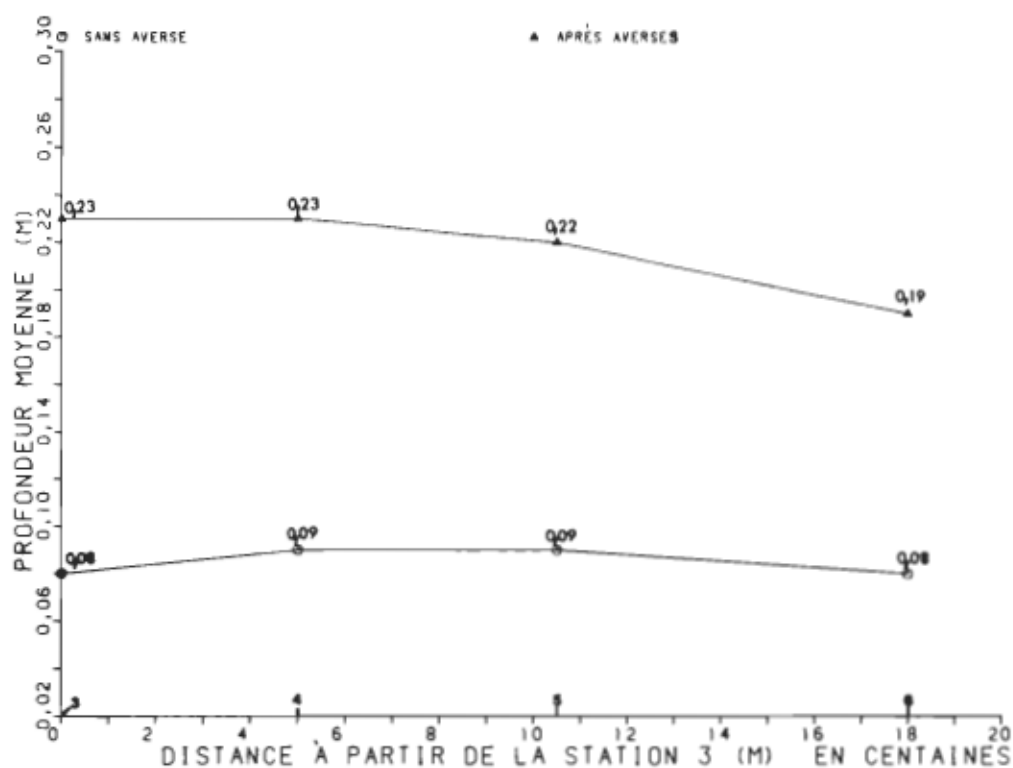


Figure 19. Profondeur moyenne(Pm) en fonction des variations climatiques et longitudinales

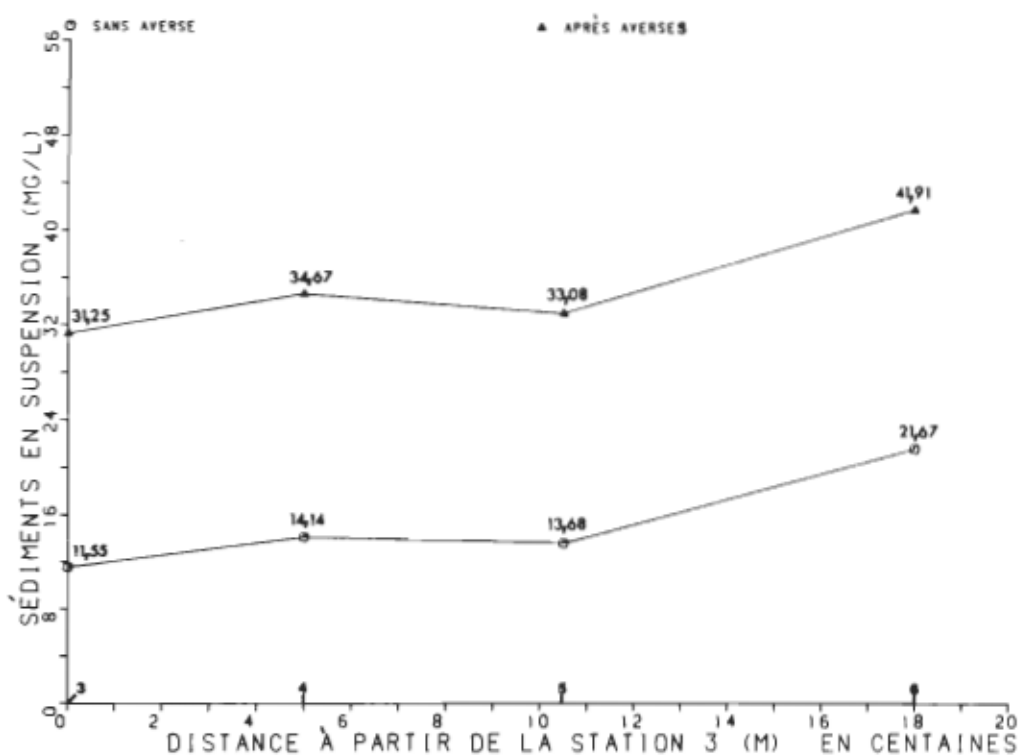


Figure 20. Concentration de sédiments en suspension(Ss) en fonction des variations climatiques et longitudinales

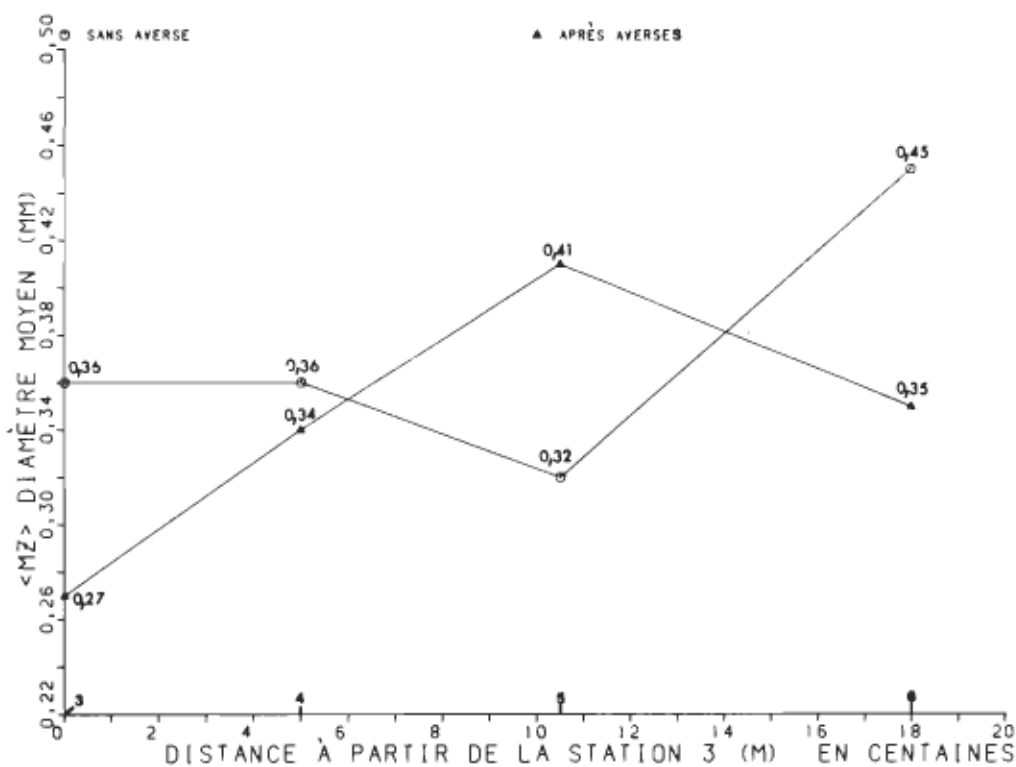


Figure 21. Diamètre moyen des sédiments de fond( $M_z$ ) en fonction des variations climatiques et longitudinales

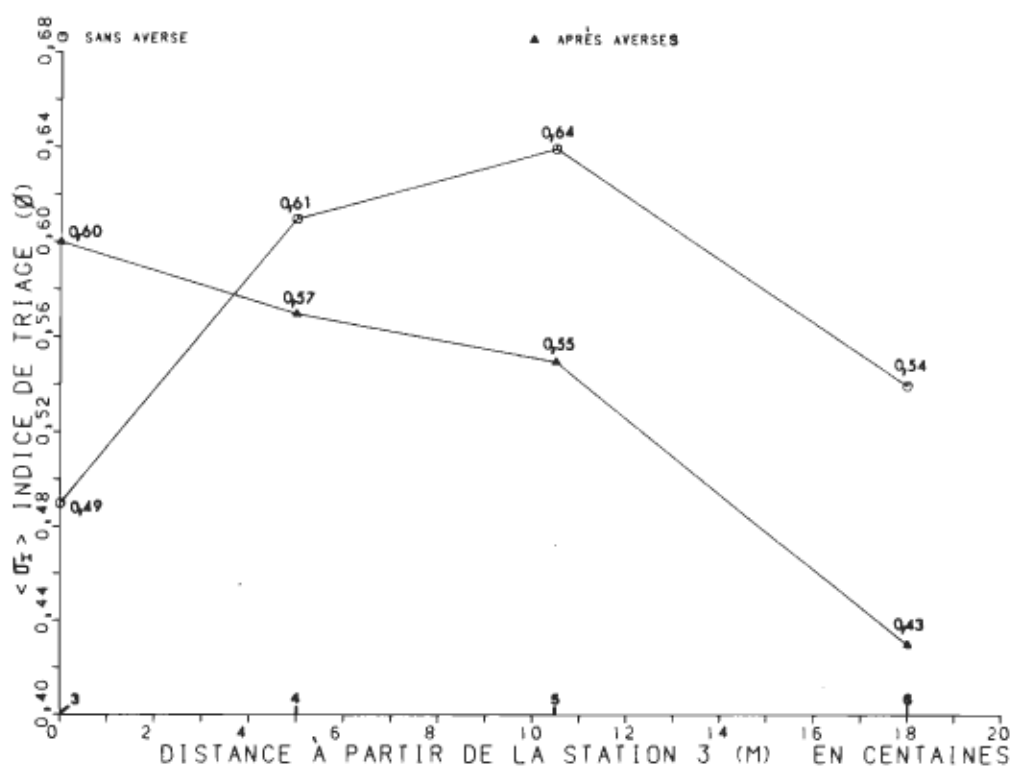


Figure 22. Indice de triage des sédiments de fond( $\sigma_I$ ) en fonction des variations climatiques et longitudinales



On constate que la variation longitudinale de la profondeur moyenne ( $P_m$ ) n'est pas significative pour chacune des conditions climatiques étudiée. Donc, que ce soit à la suite d'averses ou en l'absence d'averse, la profondeur moyenne ne présente pas de différences significatives entre les stations, de l'amont vers l'aval du ruisseau.

L'étude de la variation longitudinale de la géométrie hydraulique des cours d'eau nous apprend cependant que la profondeur moyenne augmente généralement vers l'aval (CARLSTON, 1969). L'existence d'une sédimentation importante vers l'aval du ruisseau peut cependant entraîner le rehaussement du fond du cours d'eau et ainsi diminuer la profondeur à l'aval.

L'examen de la variation climatique pour chaque station nous montre des différences significatives entre les mesures de  $P_m$  effectuées sans averse et celles effectuées après averses (Tableau 8).

L'écart entre les valeurs moyennes sans averse et après averses révèle que l'impact des précipitations sur  $P_m$  diminue de l'amont vers l'aval du ruisseau. Le Tableau 9 présente le rapport entre les valeurs moyennes après averses et sans averse pour chacune des variables et des stations.

TABLEAU 8

Résultats de l'analyse de variance  
effectuée entre les conditions climatiques

Stations	Pm	Ss	MZ	$\sigma_x$
3	*	*	*	*
4	*	*	-	-
5	*	*	*	-
6	*	*	*	*

\* : différence significative à 95%

- : différence non-significative à 95%

TABLEAU 9

Rapport des valeurs moyennes  
après averse et sans averse

Stations	Pm	Ss	MZ	$\sigma_x$
3	2,88	2,71	0,75	1,22
4	2,56	2,45	0,94	0,93
5	2,44	2,42	1,28	0,86
6	2,38	1,93	0,78	0,80

On constate effectivement que le rapport  $P_m$  (après averse) sur  $P_m$  (sans averse) diminue de la station 3 vers la station 6. L'élargissement du ruisseau vers l'aval peut-être responsable de cette diminution apparente.

La Figure 23 permet d'apprécier l'élargissement du ruisseau entre les stations 3 et 6 situées respectivement à l'amont et à l'aval. On constate également que le fond du ruisseau à la station 6 présente un profil convexe (bombé) comparativement au profil concave (creusé) de la station 3. Ces observations suggèrent la présence d'une sédimentation importante à la station 6 et une érosion des berges qui tend à élargir le ruisseau vers l'aval.

La variation longitudinale des sédiments en suspension ( $S_s$ ) présente des tendances similaires entre les conditions climatiques sans averse et après averse (Figure 20). Une différence significative est obtenue entre la station 6 et les autres stations pour les mesures effectuées sans averse alors que cette différence disparaît pour les mesures effectuées après averse (Tableau 7). Les précipitations auraient donc tendance à uniformiser la concentration de sédiments en suspension entre l'amont et l'aval.

Cette observation est mise en évidence en comparant le rapport ( $m$ ) entre les sédiments en suspension aux stations 3

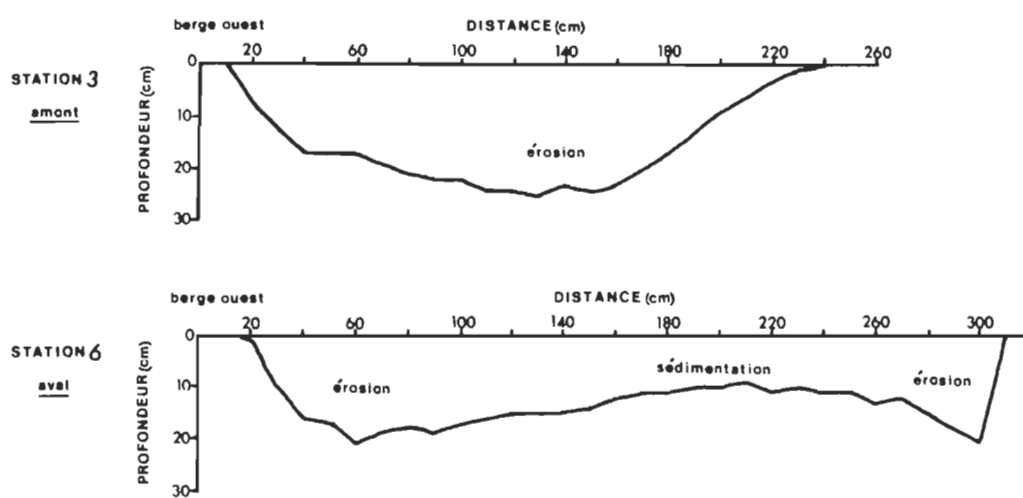


Figure 23. Profils en travers aux stations 3 et 6

et 6 (Figure 24). On remarque, en général, que les valeurs de Ss à la station 6 sont supérieures à celles de la station 3 ( $m > 1$ ). Ce rapport ( $m$ ) se maintient entre 1 et 2 après averses alors qu'il varie beaucoup plus sans averse. Cette observation se confirme pour 86% des mesures effectuées après averses comparativement à 39% pour les mesures effectuées sans averse. Les précipitations tendent donc à maintenir la concentration de sédiments en suspension à la station 6 de une à deux fois plus élevée que celle de la station 3 alors que sans averse, cette concentration peut atteindre plus de trois fois celle de la station 3.

Comme c'était le cas pour la variation de la profondeur moyenne les sédiments en suspension présentent des différences significatives entre les mesures effectuées sans averse et après averses (Tableau 8). L'impact des précipitations sur Ss diminue de l'amont vers l'aval du ruisseau. À la station 3, la concentration de sédiments en suspension (Ss) est 2,71 fois plus élevée après averses comparativement à 1,93 fois plus élevée à la station 6 (Tableau 9). La Figure 25 présente la relation entre Pr et Ss pour les stations 3 et 6. Ces relations sont significatives à 95% et les corrélations sont de 0,832 pour la station 3 et de 0,851 pour la station 6. À partir des équations de régression, on obtient pour Pr = 0 (sans averse) une Ss de 13,06 mg/l et 21,79 mg/l pour les stations 3 et 6 respectivement. Ces valeurs de Ss

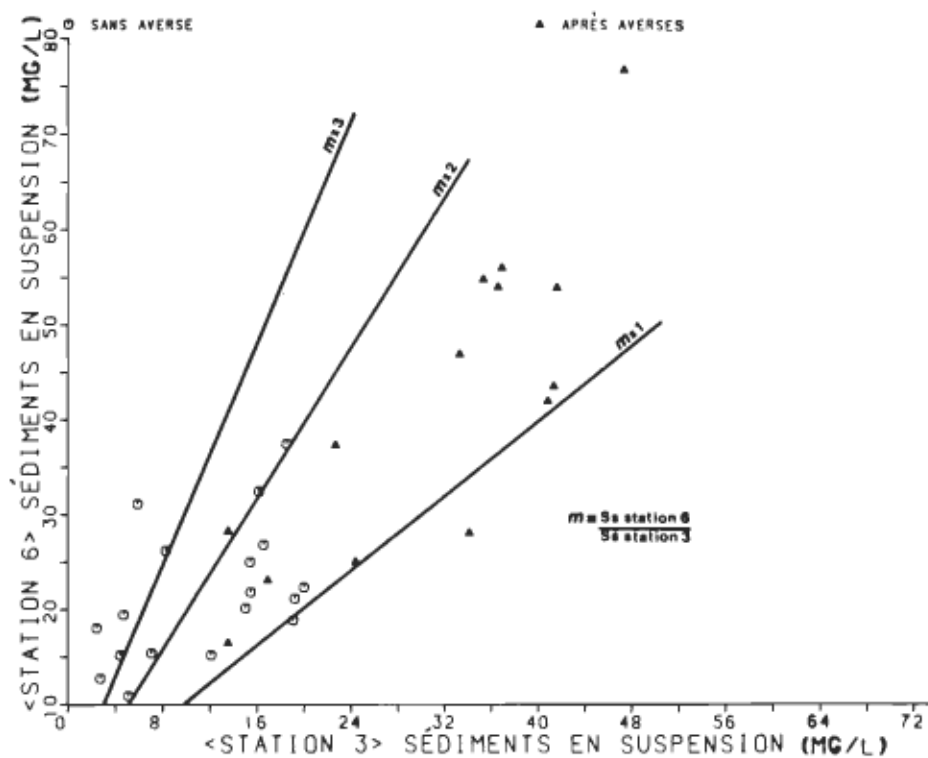


Figure 24. Rapport entre les concentrations de sédiments en suspension (Ss) aux stations 3 et 6

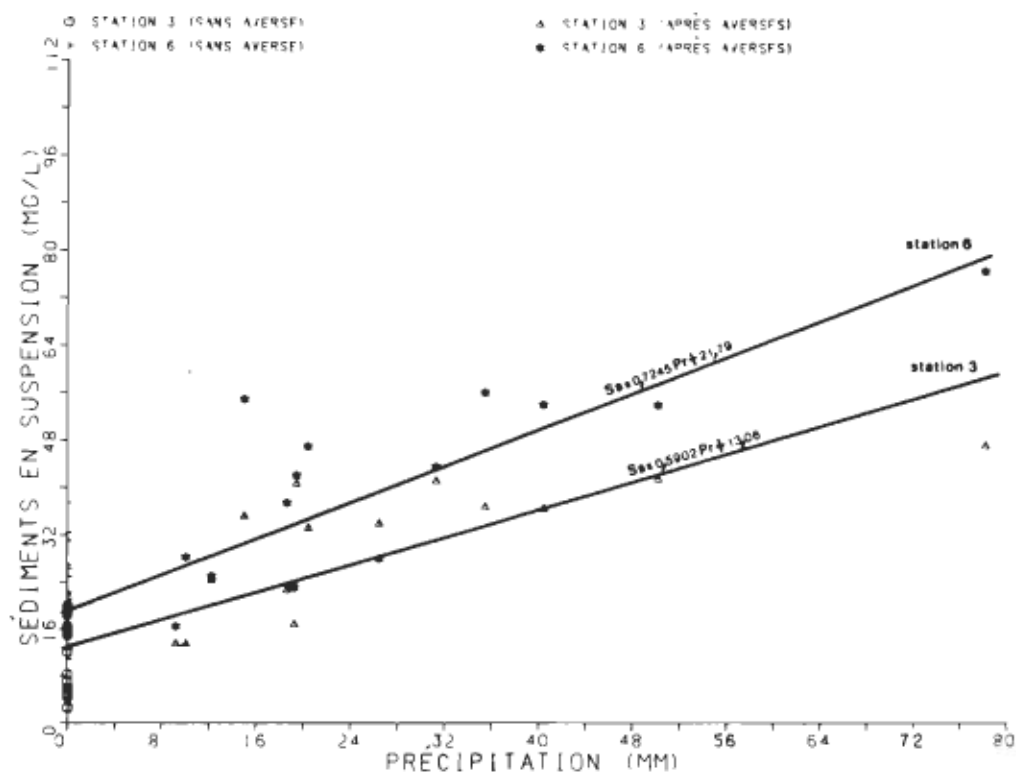


Figure 25. Relation entre les concentrations de sédiments en suspension (Ss) et les précipitations (Pr) pour les stations 3 et 6

correspondent étroitement aux valeurs moyennes de Ss obtenues sans averse (Tableau 6). Donc, en supposant une Ss moyenne initiale (sans averse) de 13,06 mg/l pour la station 3 et de 21,79 mg/l pour la station 6, on obtiendra, d'après la pente des courbes de la Figure 25, des taux de variations de 0,5902 mg/l et 0,7245 mg/l pour chaque millimètre de pluie tombée pour les stations 3 et 6 respectivement (soit environ 5,9 mg/l et 7,2 mg/l pour chaque 10 millimètres de pluie).

On observe jusqu'à présent une relation étroite entre les précipitations, les profondeurs moyennes et les sédiments en suspension. La Figure 26 présente la relation entre Ss et Pm pour les stations 3 et 6. Les régressions obtenues représentent les courbes qui s'ajustent le mieux aux nuages de points. Les relations sont significatives à 95% et les corrélations sont de 0,850 et 0,884 pour les stations 3 et 6 respectivement. D'après les résultats des analyses de variance, on peut considérer que la profondeur moyenne ne varie pas (ou très peu) entre les stations 3 et 6. Donc, pour une même profondeur moyenne, on constate que l'écart entre les valeurs de Ss aux stations 3 et 6 devient plus grand lorsque cette profondeur moyenne augmente.

Pour ce qui est de la variation de la granulométrie des sédiments de fond (Figures 21 et 22), l'analyse de variance

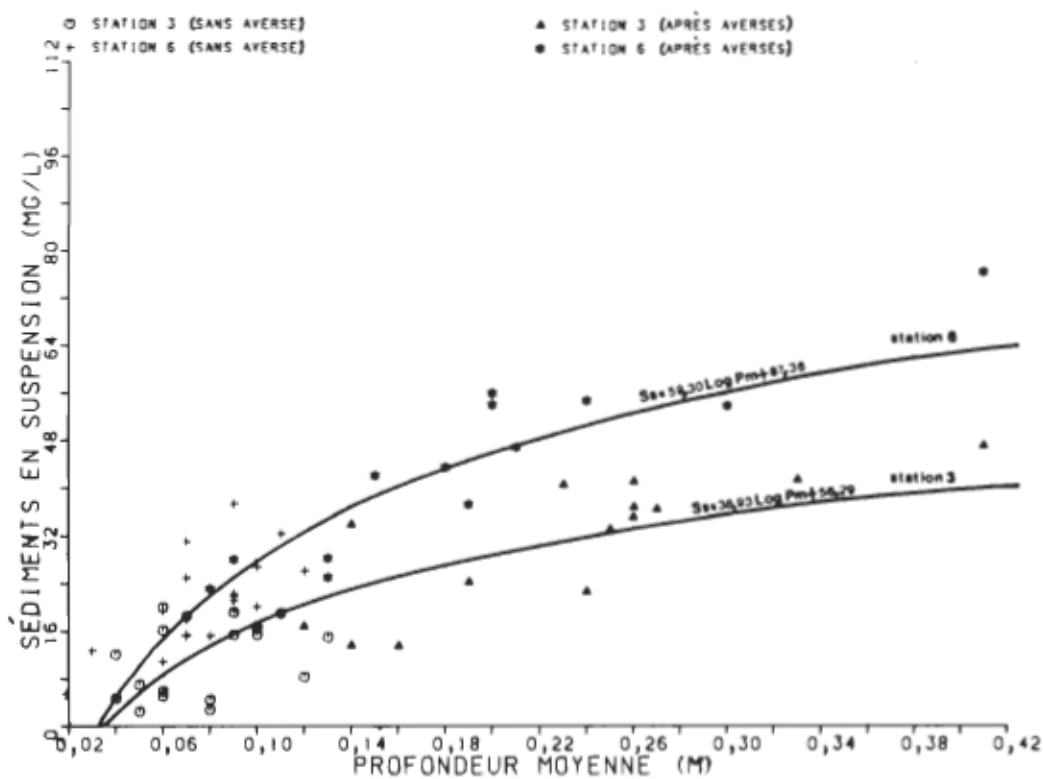


Figure 26. Relation entre les concentrations de sédiments en suspension (Ss) et les profondeurs moyennes (Pm) pour les stations 3 et 6



indique, dans l'ensemble, que le diamètre moyen (MZ) et l'indice de triage ( $\sigma_x$ ) ne présentent pas de différences significatives entre les stations en ce qui concerne les mesures effectuées sans averse (Tableau 7). Par contre, il ressort qu'à la suite d'averses, le diamètre moyen des sédiments de fond à la station 3 est différent de celui des autres stations; il est plus petit. Comme le souligne BEST, (1986) et KNIGHTON, (1980), le diamètre des sédiments de fond diminue souvent à la sortie des confluences, comme c'est le cas pour la station 3 située à proximité de la confluence des deux affluents du ruisseau.

Sans averse, MZ diminue entre les stations 3 et 5 et augmente entre les stations 5 et 6 alors qu'après averses, MZ augmente entre les stations 3 et 5 et diminue entre les stations 5 et 6. Ce comportement cahotique de MZ s'écarte de la tendance générale selon laquelle le diamètre moyen diminue vers l'aval. Mais comme le rappelle KNIGHTON, (1982), ces irrégularités peuvent être attribuables à des sources d'alimentation en sédiments situées à proximité des lieux d'échantillonnage.

Entre les stations 5 et 6, le ruisseau traverse la partie inférieure de la série du sol Batiscau dont la texture est légèrement plus grossière que celles des sols Chaloupe et Champlain. L'érosion des berges, particulièrement

importante entre les stations 5 et 6, est donc susceptible d'alimenter le ruisseau en matériaux plus grossiers.

Les variations de la granulométrie entre les mesures effectuées sans averse et après averses montrent que les précipitations affectent de façon significative le diamètre moyen (MZ) aux stations 3, 5 et 6, tandis que le triage ( $\sigma_r$ ) n'est affecté qu'aux stations 3 et 6. Pour toutes les stations, le rapport MZ (après averses) sur MZ (sans averse) révèle que les précipitations tendent à diminuer le diamètre moyen des sédiments de fond alors que le rapport  $\sigma_r$  (après averses) sur  $\sigma_r$  (sans averse) indique que le triage s'améliore suite aux averses (Tableau 9, Figures 21 et 22).

À l'examen des Tableaux 7, 8 et 9, on constate que les différences significatives se font le plus sentir pour les variations climatiques (Tableau 8) que pour les variations longitudinales (Tableau 7). C'est donc dire que les précipitations ont un impact important sur la profondeur moyenne, les sédiments en suspension et le diamètre moyen des sédiments de fond. Le peu de différences observées pour Pm, Ss, MZ et  $\sigma_r$  le long du ruisseau suggère une certaine constance des propriétés hydrologiques et sédimentologiques entre l'amont et l'aval du cours d'eau. Les mesures effectuées après les précipitations montrent de façon générale, pour l'ensemble des stations, une hausse de la profondeur moyen-

ne, une augmentation des sédiments en suspension, une diminution du diamètre moyen et une amélioration du triage des sédiments de fond.

### 3.3 Variations temporelles et spatiales de la charge en suspension.

#### 3.3.1 Considérations théoriques

L'érosion géologique est un phénomène naturel qui prend place sans l'intervention humaine. Un taux d'érosion de 1t.m/ha/an est considéré comme le taux moyen d'érosion géologique pour des sols de faible pente (TROETH et al., 1980). Lorsque l'exposition du sol est accrue par l'utilisation que l'on en fait, il s'en suit généralement une accélération de l'érosion. L'homme devient un agent responsable de l'érosion du sol; il engendre une érosion anthropique.

L'activité agricole intensive contribue à la dégradation du sol de façon générale. L'érosion des terres agricoles est une composante majeure de la dégradation de l'environnement (BIRD et al., 1986; A.C.F.A.S., 1987). L'agriculture représente une source de pollution diffuse où les matières en suspension issues du sol érodé comptent parmi les principaux polluants d'origine agricole (BERNARD, 1984, 1985; HAMLETT et al., 1984; GIANESSI et al., 1986). Les

cours d'eau deviennent les principaux lieux de transport des sédiments érodés. Les quantités de sol exportées par les eaux d'un cours d'eau permettent d'apprécier la gravité de l'érosion du bassin versant.

Les variations saisonnières de la couverture végétale et de l'érodabilité du sol affectent l'érosion et le transport des sédiments (ANDERSON, 1954; KETCHESON et al., 1973; MEYBECK, 1976; KIRBY et al., 1987). WALKER et al. (1980) nous renseignent sur les principaux facteurs qui contrôlent les pertes de sol en milieu agricole. Le taux d'érosion annuelle dépend des précipitations, du type de sol, de la topographie et de l'utilisation du sol.

Étant donné la faible valeur de l'indice d'érosivité moyenne annuelle des précipitations pour notre région (WALL et al., 1983), on peut s'attendre à ce que le taux d'érosion du sol soit peu important. Les pentes du territoire agricole étant très faibles (moins de 1%), la topographie joue un rôle mineur sur les pertes de sol. La texture limoneuse du sol rend toutefois particulièrement érodable la couche superficielle des terres agricoles. Les types de cultures et leurs répartitions sur le territoire agricole affectent également l'érosion et le transport des sédiments vers le cours d'eau. Ce sont souvent les mêmes parcelles qui souffrent le plus de l'érosion (BOLLINNE et al., 1978). On peut

donc s'attendre à une variation de la quantité de sédiments transportée à chaque point du cours d'eau, selon la couverture végétale à l'amont de ces lieux.

### 3.3.2 Estimation de la charge sédimentaire transportée par le ruisseau.

La Figure 27 présente la relation entre les débits liquides ( $Q_l$ ) et les profondeurs moyennes ( $P_m$ ) pour les stations 3, 4, 5 et 6. Le débit augmente de l'amont vers l'aval du ruisseau mais cette variation n'est pas significative ( $p < 0,05$ ). Soulignons que ces relations sont valables pour des profondeurs moyennes peu élevées (i.e. sans averse) pour les stations 3, 4 et 5, alors que pour la station 6, la relation englobe des profondeurs moyennes plus élevées.

L'évaluation de la quantité de sédiments transportée à l'aval du ruisseau (station 6) nous donnera une bonne idée de l'intensité de l'érosion qui existe à l'amont. Les sédiments en suspension ( $S_s$ ) sont habituellement reliés aux débits liquides ( $Q_l$ ) par la relation  $S_s = a Q_l^b$  (ABRAHAMMS et al., 1973; MEYBECK, 1976). À partir des mesures de profondeurs moyennes ( $P_m$ ) de la station 6 (Tableau 5 et 6), on obtient les débits liquides ( $Q_l$ ). La Figure 28 illustre la relation entre  $S_s$  et  $Q_l$  pour la station 6.

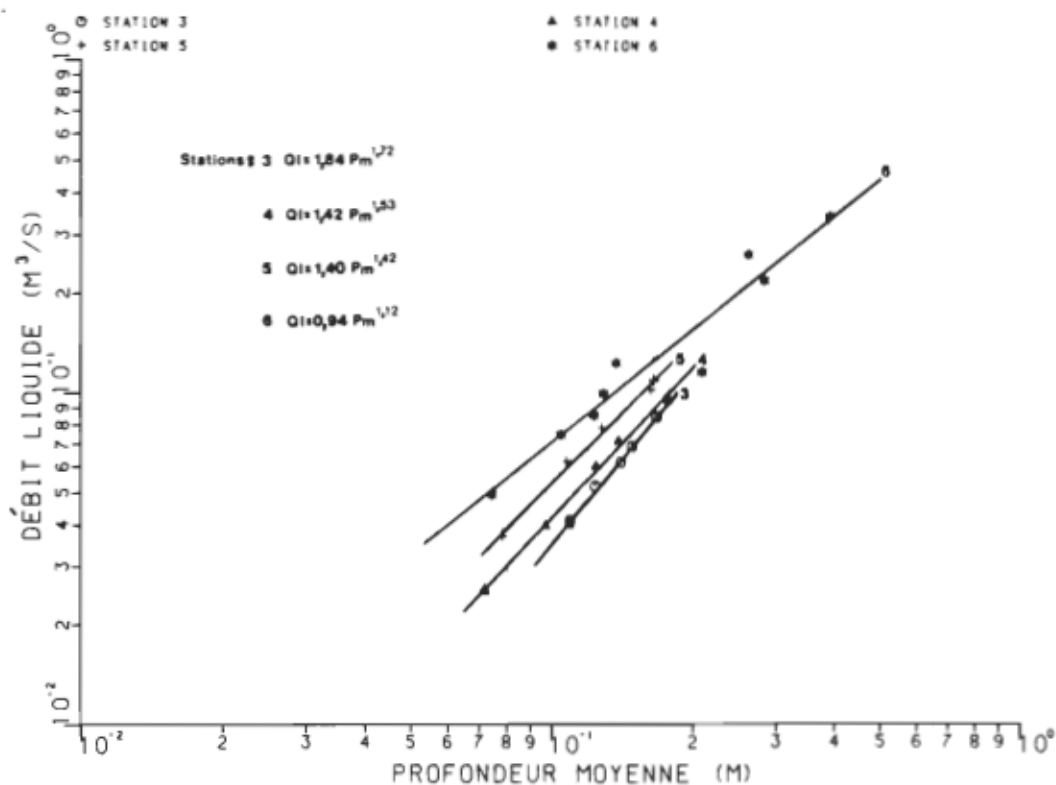


Figure 27. Relation entre les débits liquides( $Q$ ) et les profondeurs moyennes( $P_m$ )

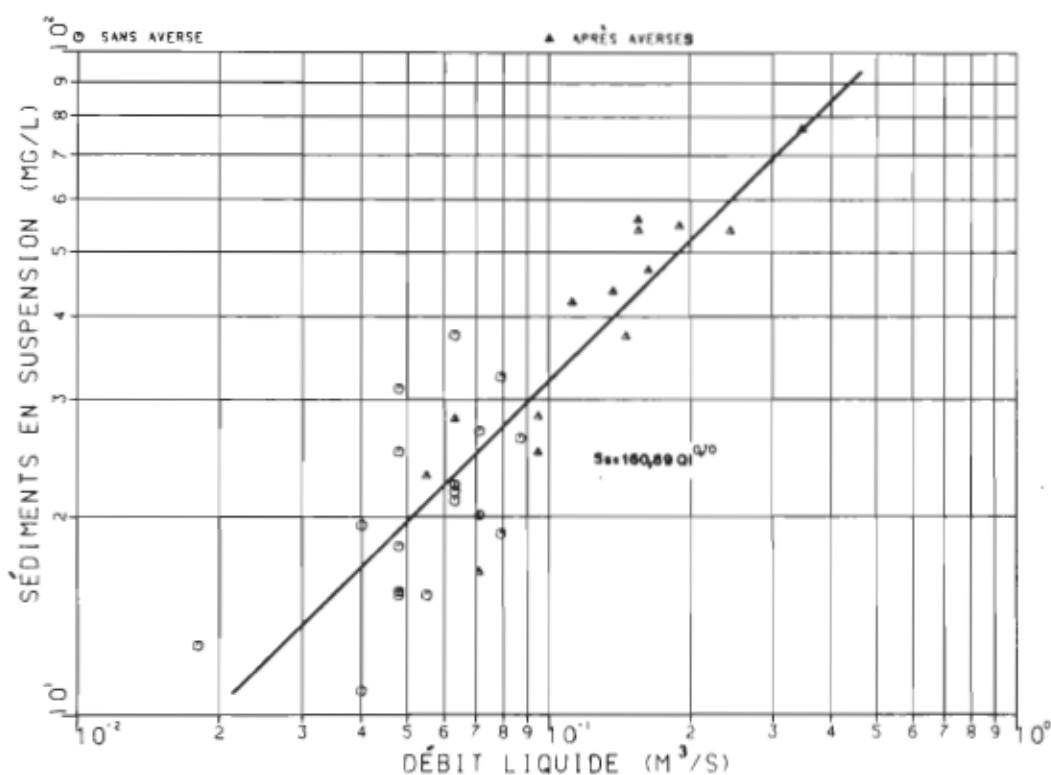


Figure 28. Relation entre les concentrations de sédiments en suspension( $S_s$ ) et les débits liquides( $Q$ ) pour la station 6

Cette relation est significative à 95% et la corrélation est de 0,873. On constate que pour un débit donné, la variation des valeurs de Ss est plus grande pour les mesures effectuées sans averse que pour les mesures effectuées après averses.

Les précipitations rendent donc plus sélectives les quantités de sédiments transportées vers l'aval du ruisseau. Près de 83% des mesures effectuées sans averse donne des valeurs de Ss comprises entre 10 et 30 mg/l alors que 50% des mesures effectuées après averses donne des valeurs de Ss comprises entre 40 et 60 mg/l.

Si on considère que la charge sédimentaire transportée à chaque point d'un cours d'eau représente un indice de l'érosion qui existe à l'amont de ce lieu, il serait intéressant d'évaluer la quantité de sédiments passée à chacune des stations au cours de la période étudiée. Comme les mesures de débits des stations 3, 4 et 5 ne sont valables que pour les mesures effectuées sans averse, on s'en tiendra aux valeurs de Pm et Ss du Tableau 5.

Le Tableau 10 donne la charge cumulée (Cc) au cours de la période juin à octobre à chacune des stations.

TABLEAU 10

Charge cumulée à chaque station

Tc (Jour)	$\Delta T$ (Jour)	STATION 3			STATION 4			STATION 5			STATION 6		
		Cj (Kg/J)	Cp (t.m)	Cc (t.m)	Cj (Kg/J)	Cp (t.m)	Cc (t.m)	Cj (Kg/J)	Cp (t.m)	Cc (t.m)	Cj (Kg/J)	Cp (t.m)	Cc (t.m)
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	13	46,77	0,61	0,61	69,25	0,90	0,90	69,12	0,90	0,90	119,33	1,55	1,55
21	8	25,16	0,20	0,81	75,71	0,61	1,51	99,09	0,79	1,69	121,82	0,97	2,52
27	6	67,99	0,41	1,22	52,93	0,32	1,83	97,09	0,58	2,27	128,74	0,77	3,29
34	7	50,07	0,35	1,57	86,67	0,61	2,44	84,61	0,49	2,86	165,02	1,16	4,45
41	7	48,50	0,34	1,91	82,70	0,58	3,02	73,95	0,52	3,38	114,91	0,80	5,25
48	7	30,38	0,21	2,12	54,23	0,38	3,40	29,80	0,21	3,59	203,90	1,43	6,68
55	7	20,36	0,14	2,26	44,45	0,31	3,71	42,24	0,30	3,89	222,05	1,55	8,23
62	7	7,59	0,05	2,31	21,89	0,15	3,86	11,15	0,08	3,97	72,58	0,51	8,74
69	7	2,94	0,02	2,33	3,18	0,02	3,88	74,68	0,52	4,49	67,39	0,47	9,21
76	7	6,46	0,05	2,38	31,92	0,22	4,10	79,43	0,56	5,05	63,94	0,45	9,66
83	7	38,87	0,27	2,65	134,38	0,94	5,04	138,84	0,97	6,02	103,68	0,72	10,38
90	7	2,26	0,02	2,67	9,66	0,07	5,11	8,95	0,06	6,08	74,30	0,52	10,90
97	7	6,40	0,04	2,71	14,33	0,10	5,21	12,55	0,09	6,17	37,15	0,26	11,16
104	7	9,12	0,06	2,77	14,98	0,10	5,31	21,23	0,15	6,32	63,07	0,45	11,61
111	7	34,24	0,24	3,01	52,89	0,37	5,68	112,05	0,78	7,10	196,99	1,37	12,98
126	15	5,63	0,08	3,09	15,13	0,23	5,91	27,35	0,41	7,51	19,87	0,30	13,28
154	28	8,04	0,23	3,32	25,32	0,71	6,62	31,16	0,87	8,38	128,74	3,61	16,89

Tc = temps cumulé en jours

 $\Delta T$  = intervalle de temps entre deux mesures consécutives en joursCj = charge journalière :  $\left[ (S_s) (Q_1) (86400) / 1000 \right]$  en kilogrammes par jour (Kg/J)Cp = charge partielle :  $\left[ (C_j) (\Delta T) / 1000 \right]$  en tonnes métriques (t.m)

Cc = charge cumulée en tonnes métriques (t.m)

 $\square$  = charge totale (t.m)



La Figure 29 présente la variation de  $C_c$  en fonction du temps écoulé ( $T_c$ ). L'écart entre la courbe de la station 3 et la courbe de la station 6 correspond à l'apport sédimentaire du territoire agricole. On constate que la quantité de sédiments passée à la station 3, et qui provenait de la région boisée, est relativement constante alors que celle passée à la station 6 montre un taux de variation plus important. Cette observation met en valeur l'importance du territoire agricole comme source d'apport sédimentaire. Le peu d'écart entre les stations 4 et 5 suggère un faible apport sédimentaire dans cette portion du ruisseau. L'écart entre les stations 5 et 6 révèle la forte contribution de cette section du ruisseau à la quantité totale de sédiments exportée du bassin.

La Figure 29 permet de mettre en relation l'activité agricole et la quantité de sédiments transportée par le ruisseau. Le maïs, l'orge et le foin sont les principaux types de cultures rencontrés à proximité du cours d'eau. On remarque que les courbes présentent des ruptures de pente qui correspondent à des variations relativement brusques de la charge sédimentaire du ruisseau. En général, les variations deviennent plus prononcées à mesure que l'on progresse vers l'intérieur du territoire agricole (de la station 3 vers la station 6). Ces variations de la charge sédimentaire sont associées à différentes activités agricoles.

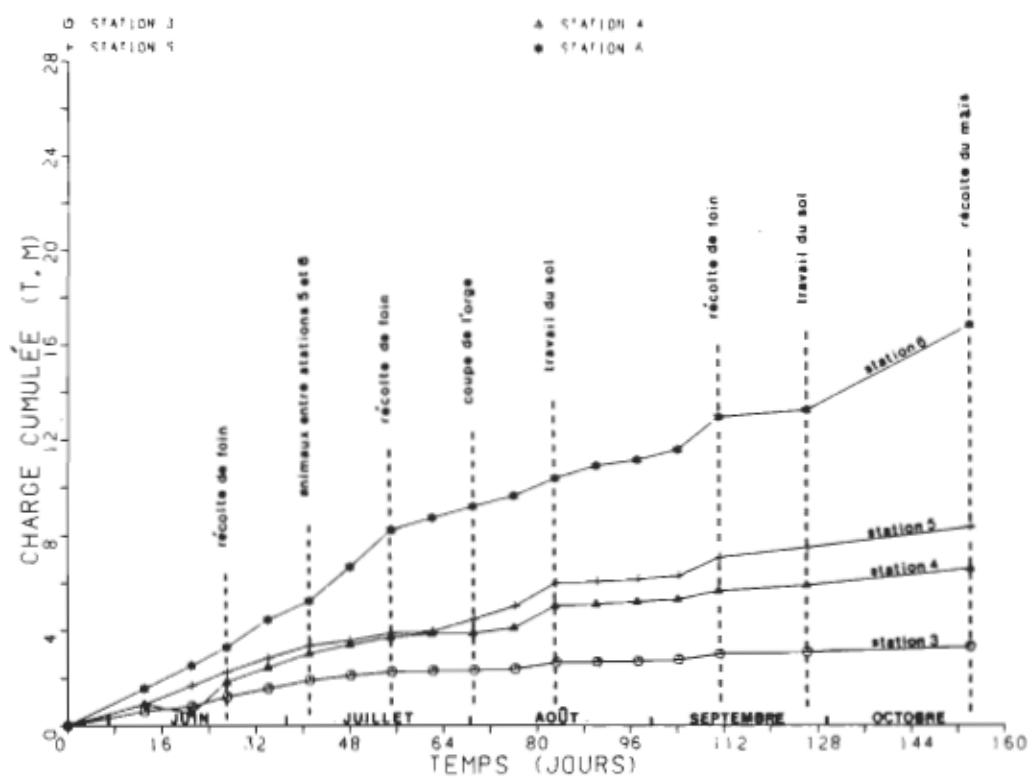


Figure 29. Variations temporelles de la charge cumulée

Les activités agricoles qui ont des répercussions sur la quantité de sédiments transportée sont: les récoltes, les travaux de sol et la présence des animaux en bordure du ruisseau. Ces activités n'ont pas toutes le même impact sur la variation de la charge sédimentaire de chacune des stations. Par exemple, la coupe de l'orge se fait plus sentir aux stations 4 et 5 alors que la présence des animaux de ferme influence la charge sédimentaire transportée entre les stations 5 et 6. La station 3, de par sa localisation à l'amont, est peu influencée par l'activité agricole.

À l'automne, au moment des récoltes, le sol est rendu vulnérable à l'érosion et la charge cumulée reprend de l'importance. Ce regain automnal peut être dû en partie au fait que les sédiments érodés au cours de l'été sont demeurés piégés temporairement dans le système de drainage et que seulement une petite quantité a atteint le ruisseau (KETCHESON et al., 1973; SINE et al., 1978). Les pluies d'automne et la hausse de la nappe phréatique à cette époque de l'année peuvent déloger les sédiments et les transporter vers le ruisseau.

La Figure 30 présente la variation de la charge totale entre la station 3 et la station 6. Le ruisseau accuse une charge totale de 3,32 t.m de sédiments à la station 3 comparativement à 16,89 t.m à la station 6, soit une variation de

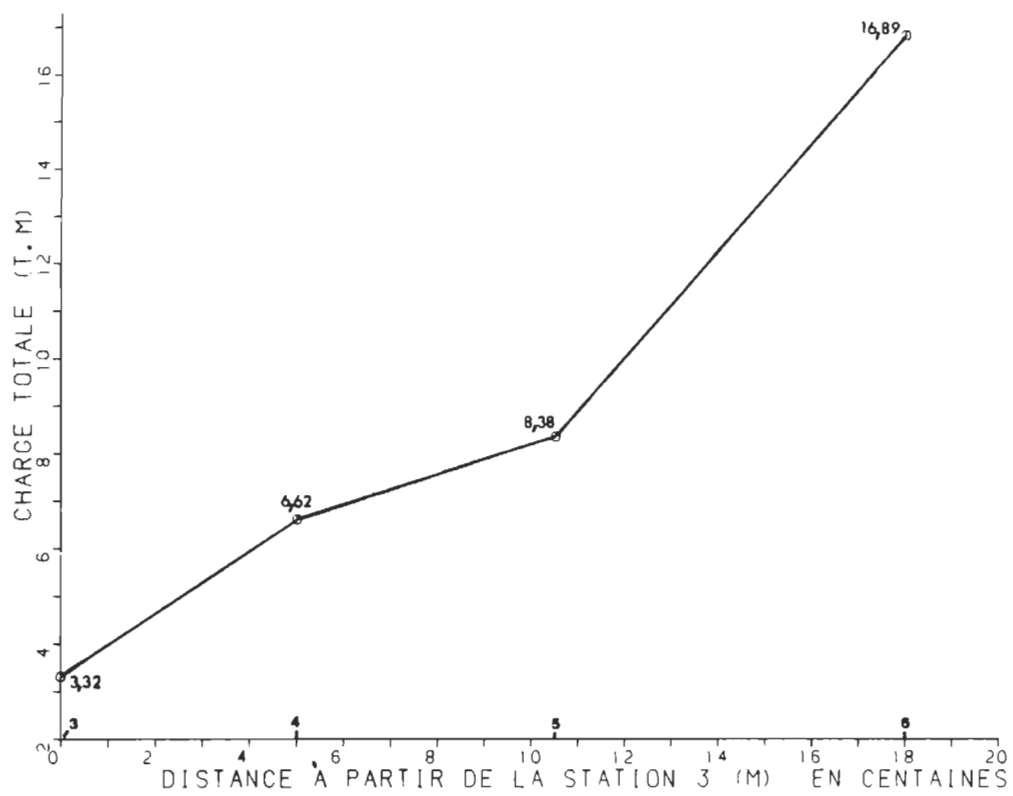


Figure 30. Variations spatiales de la charge totale

13,57 t.m correspondant à l'apport du territoire agricole. On constate toutefois que cette variation n'est pas constante le long du ruisseau. L'érosion n'est donc pas répartie uniformément à l'intérieur du bassin.

Entre les stations 3 et 4, le ruisseau augmente sa charge totale de 3,3 t.m alors qu'entre les stations 4 et 5, cette augmentation n'est que de 1,76 t.m. C'est surtout entre les stations 5 et 6 que l'augmentation de la charge totale se fait le plus sentir. Sur les 750 mètres qui séparent ces deux stations, la charge totale s'accroît de 8,51 t.m, soit près de 63% de la variation totale du ruisseau (13,57 t.m). Entre les stations 5 et 6, le ruisseau prend en charge plus de la moitié des sédiments transportés. Notons que ce segment du cours d'eau présente des berges fortement érodées susceptibles d'alimenter le ruisseau en sédiments.

Considérant que les cours d'eau transportent environ 15% de leur charge totale durant la période estivale (KETCHESON et al., 1973), on obtiendrait pour l'année une charge totale de sédiments en suspension de 112,60 t.m pour un bassin versant de 3,5 km<sup>2</sup>. Le taux d'érosion serait alors de 0,32 t.m/ha/an ce qui est en deçà du taux d'érosion géologique moyen. Toutefois, ce taux d'érosion exprime une moyenne pour l'ensemble du bassin et comme on a pu le constater, la

majorité des sédiments provient d'une portion du territoire agricole. La perte de la capacité productrice du sol est plus grave que ne l'indique le tonnage car l'érosion trie le sol et lui enlève ses particules fine les plus fertiles (TROEH et al., 1980).

## SYNTHÈSE ET CONCLUSION

D'après une étude effectuée auprès des producteurs agricoles du Québec (QUÉBEC, 1985), on apprend que ceux-ci voient dans l'érosion un danger potentiel mais ne se sentent pas menacés. En fait, 56% des producteurs interrogés pensent que les sols ne seront pas dégradés d'ici 25 ans. Le désir d'obtenir les meilleurs rendements possibles fait en sorte que les terres agricoles sont souvent mal en point. L'impact de l'activité agricole sur les sols se résume à une accélération de l'érosion. Cette dernière se manifeste de différentes façons et sous différents aspects. Il y a les pertes de sol proprement dites, mais il y a aussi l'érosion le long des cours d'eau.

Nous avons tenté de démontrer au cours de cette étude que le phénomène d'érosion est présent le long du ruisseau de l'Arbre-à-la-Croix, un petit cours d'eau qui draine des terres agricoles limoneuses. L'érosion a été étudiée sous différentes facettes. Pour débiter notre étude, nous avons relevé, sur le terrain, certaines marques distinctes laissées par l'érosion et la sédimentation. Ces manifestations ont été présentées à l'aide de photographies prises le long du ruisseau (Figure 4 et Photos 3 à 15). Il ressort de ces observations que l'érosion éolienne et l'érosion fluviale sont les principales causes du départ du matériel. Les sédi-

ments transportés par le vent et l'eau se retrouvent dans le ruisseau ou à proximité de celui-ci.

### Premier objectif

Différents types de sédiments ont été rencontrés le long du ruisseau. Des sédiments fins arrachés du sol par le vent se sont déposés sur les pentes enneigées du ruisseau au printemps. Lorsque la neige a fondu, ces sédiments ont formé une croûte de dépôts sur les pentes; ce sont les dépôts sur pente. Lors des crues printanières, le ruisseau inonde les berges et y dépose des sédiments en suspension; ce sont les dépôts sur berge. À ces types de sédiments, s'ajoutent les sédiments de fond que l'on retrouve en permanence sur le fond du ruisseau.

Ces différents types de matériaux ont été soumis à des analyses granulométriques à partir desquelles on a calculé différents indices granulométriques (FOLK et WARD, 1957). L'analyse discriminante a permis d'obtenir les indices qui différencient le mieux les groupes d'échantillons. Ces indices se sont avérés être le diamètre moyen (MZ) et l'indice de triage ( $\sigma_1$ ). Ceux-ci sont associés à l'énergie moyenne de l'agent de dépôt (MZ) et aux fluctuations de cette énergie ( $\sigma_1$ ). Les courants qui ont déposé les sédiments lors des



crues printanières présentaient des fluctuations de vitesses ( $\sigma_1$ ) plus grandes que les courants de fond, de sorte que les dépôts sur berge sont moins bien triés que les sédiments de fond (Tableau 3 et Figure 11). La forte ressemblance obtenue entre les échantillons de sol et les dépôts sur pente suggère que le vent n'agissait pas de façon très sélective sur les particules du sol et/ou que le vent était assez puissant pour transporter toutes les grosseurs de grains disponibles sur le sol.

Un modèle permet de distinguer les groupes d'échantillons (Figure 17). Les indices MZ et  $\sigma_1$  servent de variables discriminantes. Le modèle ne permet pas cependant de différencier les dépôts sur pente et les échantillons de sol car leur granulométrie est par trop similaire. La relation MZ -  $\sigma_1$  montre un certain lien entre la position des échantillons sur le terrain et leur granulométrie. L'altitude relative à laquelle on retrouve les types d'échantillons récoltés suggère que les sédiments ont subi un triage par gravité. Les sédiments les plus grossiers et les mieux triés se retrouvent les plus bas (sédiments de fond) alors que les sédiments les plus fins et les moins bien triés se retrouvent en surface.

### Deuxième objectif

Les précipitations jouent un rôle important dans l'arrachement et le transport des sédiments vers le cours d'eau. Nous avons voulu démontrer que l'effet des précipitations se faisait sentir sur la profondeur moyenne du ruisseau, la concentration de sédiments en suspension et la granulométrie des sédiments de fond; trois paramètres souvent impliqués dans la mécanique et l'hydraulique du transport des sédiments (GRAF, 1971; YALIN, 1972). Pour ce faire, nous avons comparé deux séries de mesures, l'une effectuée en condition climatique sans averse et l'autre en condition climatique après averses. Ces mesures ont été pratiquées à quatre stations localisées de l'amont vers l'aval du ruisseau (Figure 7) dans le but d'en examiner les variations longitudinales. Ces mesures s'échelonnaient de mai à octobre ce qui correspond à la période agricole étudiée. Cette période de l'année contribue pour 90% de l'érosivité annuelle de la région.

Les résultats obtenus révèlent des différences significatives (seuil de 95%) entre les mesures effectuées sans averse et celles effectuées après averses en ce qui concerne la profondeur moyenne, les sédiments en suspension et le diamètre des sédiments de fond (Tableau 8). Les variations entre les stations sont, pour la plupart des paramètres, non

significatives (Tableau 7), ce qui nous porte à croire que les conditions hydrologiques et sédimentologiques sont relativement constantes le long du segment de ruisseau étudié. Une différence significative est cependant à noter entre les sédiments en suspension à la station 6 et aux autres stations pour ce qui est des mesures effectuées sans averse. Cette différence disparaît toutefois pour les mesures de sédiments en suspension effectuées après averses. On pense que les précipitations auraient tendance à uniformiser le contenu en sédiments entre l'amont et l'aval du ruisseau.

En ce qui concerne les variations de la granulométrie des sédiments de fond, celles-ci sont peu évidentes et dépendent surtout des matériaux provenant de l'érosion des berges. Cependant, on peut constater que, suite aux averses, le diamètre moyen (MZ) diminue et que le triage ( $\sigma_1$ ) s'améliore à toutes les stations. L'impact des précipitations sur les paramètres étudiés semble s'atténuer de l'amont vers l'aval du cours d'eau (Tableau 9) si on en juge par le rapport entre les mesures effectuées après averses et sans averse. En somme, les variations climatiques (sans averse-après averses) se sont avérées plus importantes que les variations longitudinales (entre les stations).

### Troisième objectif

Les quantités de sédiments transportés vers l'aval du ruisseau sont affectées par les activités agricoles qui prennent place le long du cours d'eau pendant la période étudiée. Cette période présente des divisions importantes dans l'accumulation de la charge transportée (Figure 29). Ces divisions correspondent étroitement à certaines activités agricoles. Les récoltes, les travaux du sol et la présence d'animaux en bordure du ruisseau se sont avérés des facteurs qui pouvaient être reliés aux variations de la charge sédimentaire transportée par le cours d'eau. Toutefois, l'importance de ces variations n'est pas la même pour toutes les stations étudiées le long du ruisseau; elle dépend de leur position relative par rapport au territoire agricole.

La variation de la charge totale à différents endroits le long du cours d'eau révèle que l'érosion ne se fait pas uniformément à l'intérieur du bassin versant (Figure 30). Le territoire agricole contribue grandement à la charge totale transportée par le ruisseau qui augmente vers l'aval mais de façon non-constante. Le secteur aval du ruisseau prend en charge plus de la moitié des sédiments transportés par le cours d'eau. Ce secteur est soumis à une activité agricole

intense et est le lieu de passage des animaux. Les berges qu'on y retrouve sont très vulnérables à l'érosion.

Le taux d'érosion estimé pour l'ensemble du bassin est relativement faible (0,32 t.m/ha/an). Cependant, ce ne sont pas tous les matériaux érodés qui sont pris en charge par le ruisseau; une bonne partie se sédimente (ex: dépôts sur berge, dépôts sur pente) ou est trop grossière pour être transportée (ex: sédiments de fond). Les particules fines sont les plus susceptibles d'être prises en charge par le ruisseau. Cette perte d'éléments fins par l'érosion hydrique et éolienne contribue à la dégradation du sol.

Des mesures de mitigation peuvent réduire cette perte de particules fines. Le reboisement des berges entre les stations 5 et 6 aiderait le sol à se tenir en place. La construction d'une rampe d'accès au ruisseau pour les animaux empêcherait le piétinement abusif des berges et permettrait une meilleure croissance de la végétation riveraine. L'érosion éolienne peut être atténuée par l'emploi de rideaux d'arbres ou encore en laissant les résidus des récoltes sur le sol à l'automne.

On voit donc que l'érosion est un phénomène complexe qui implique plusieurs composantes du milieu, dont l'homme. L'étude de l'érosion ne peut conduire qu'à une meilleure

compréhension des processus qui façonnent les paysages. Cette étude implique toutefois la contribution de plus en plus importante d'organismes publiques et para-publiques dans la recherche. Comme le suggère LANCERY, (1984), le besoin se fait sentir de créer des centres régionaux d'étude sur l'érosion, de créer des documents de vulgarisation et de sensibilisation sur le phénomène de l'érosion et de continuer les études entreprises sur des bassins versants pilotes. À ceci s'ajouterait la création de groupes de travail (chercheur, animateur, vulgarisateur...) qui aurait comme mandat de surveiller et de mettre à jour l'état de l'érosion et d'établir un échange de connaissances avec les organismes concernés par le phénomène de l'érosion (ex: U.P.A., M.A.P.-A.D.,...).

# BIBLIOGRAPHIE

- ABRAHAM, A.D. et R. KELLERHALS (1973), Correlations between water discharge and concentration of suspended solids for four large prairie rivers. In Fluvial process and sedimentation, 9<sup>th</sup> Hydrology symposium, Edmonton, Alberta, 1973, pp. 96-113.
- ABU EL-ELLA, R. et J.M. COLEMAN (1985), Discrimination between depositional environments using grain-size analyses. Sedimentology, vol. 32, pp. 743-748.
- A.C.F.A.S. (1983), L'érosion accélérée et anthropique: ses conséquences sur l'environnement, Comptes rendus du congrès annuel de l'A.C.F.A.S tenu à l'U.Q.T.R. en mai 1983, 103 p.
- A.C.F.A.S. (1987), L'état de l'environnement au Québec: un bilan des milieux agricole, forestier et aquatique, Actes du colloque de l'U.Q.C.N. tenu le 13 mai 1986 à l'Université de Montréal, 212 p.
- ALLEN, J.R.L. (1965), A review of the origin and characteristics of recent alluvial sediments, Sedimentology, vol. 5, pp. 89-191.
- ANDERSON, H.W. (1954), Suspended sediment discharge as related to streamflow, topography, soil, and land use, Transactions, American Geophysical Union, vol. 35, pp. 268-281.
- A.S.T.M. (1980a), Annual book of ASTM standards, Part 31, Water, Particulate and dissolved matter, solids or residue in water, American society for testing and material, pp. 187-197.
- A.S.T.M. (1980b), Annual book of ASTM standards, Part 19, Soil and Rock; Building Stones, Particle-size analysis of soils. American society for testing and material, pp. 111-119.
- AZIZ, N.M. et S.N. PRASAD (1985), Sediment transport in shallow flows, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 111, pp. 1327-1342.
- BAGNOLD, R.A. (1968), Deposition in the process of hydraulic transport, Sedimentology, vol. 10, pp. 45-56.

- BAGNOLD, R.A. et O. BARNDORFF-NIELSEN (1980), The pattern of natural size distributions, Sedimentology, vol. 27, pp. 199-207.
- BERNARD, C. (1984), La dégradation des sols et l'environnement, Journée d'information sur la conservation des sols, Conseils des productions végétales du Québec, 18 octobre 1984, 20 p.
- BERNARD, C. (1985), Le contrôle de la pollution agricole diffuse, Assises annuelles de l'A.Q.T.E. sous le thème: L'eau, ressource économique, tenues en mars 1985 à Montréal, 29 p.
- BEST, J.L. (1986), The morphology of river channel confluences, Progress in Physical Geography, vol. 10, pp. 157-174.
- BIRD, P.M. et D.J. RAPPORT (1986), Rapport sur l'état de l'environnement au Canada, Environnement Canada, 273 p.
- BIROT, P. (1981), Les processus d'érosion à la surface des continents, Masson, 607 p.
- BLATT, H., G. MIDDLETON et R. MURRAY (1972), Origin of sedimentary rocks, Prentice-Hall, Inc., 634 p.
- BOISVERT, R. (1971), L'érosion en rivière, Ressources, vol. II, Novembre 1971, pp. 9-10.
- BOLLINNE, A., G. HANOTIAUX et A. PISSART (1978), L'érosion en milieu agricole, Pédologie, vol. XXVIII, pp. 233-243.
- BROWN, A.G. (1985), Traditional and multivariate techniques in the interpretation of floodplain sediment grain size variations, Earth surface processes and landforms, vol. 10, pp. 281-291.
- BROWNLIE, W.R. (1983), Flow depth in sand-bed channels, Journal of Hydraulic Engineering, vol 109, pp. 959-990.
- BULLER, A.T. et J. McMANUS (1972), Simple metric sedimentary statistics used to recognize different environments, Sedimentology, vol. 18, pp. 1-21.
- CALLES, B. (1980), Fluvial transportation in the river Västerdalälven, Geographiska Annaler, vol. 62A, pp. 63-74.
- CANADA (1978), Le système canadien de classification des sols, Agriculture Canada, 170 p.



- CARLSTON, C.W. (1969), Downstream variations in the hydraulic geometry of streams: special emphasis on mean velocity, American Journal of Science, vol. 267, pp. 499-509.
- CHATTERJEE, S. et B. PRICE (1977), Regression Analysis by Example, John Wiley et Sons, 228 p.
- COATES, D.R. et J.D. VITEK (1980), Thresholds in geomorphology, George Allen et Unwin, 498 p.
- COLBY, B.R. (1961), Effect of depth of flow on discharge of bed material, Geological Survey Water Supply Paper 1498D, U.S.A., 12 p.
- CONSEIL DES SCIENCES DU CANADA (1986), La dégradation du sol au Canada: un mal en progression, 24 p.
- COOKE, R.U. et J.C. DOORNKAMP (1974), Geomorphology in environmental management, Clarendon Press, 413 p.
- COOTE, D.R., J. DUMANSKY et J.F. RAMSEY (1982), Une évaluation de la dégradation des terres agricoles au Canada, Agriculture Canada, 105 p.
- CÔTÉ, D. et G. DUPUIS (1980), Effets du sous-solage et du labour profond sur les propriétés physiques du sol et le rendement de la luzerne et du maïs sur loam sableux Chaloupe, Canadian Journal of Soil Sciences, vol. 60, pp. 345-353.
- DAVIS, J.C. (1970), Information contained in sediment-size analysis, Mathematical Geology, vol. 2, pp. 105-112.
- DE LAGARDE, JEAN (1983), Initiation à l'analyse des données, Dunod, 158 p.
- DERRUAU, M. (1974), Précis de géomorphologie, Masson et Cie, 453 p.
- DILLON, W.R. et M. GOLDSTEIN (1984), Multivariate Analysis, John Wiley et Sons, 587 p.
- DRAPEAU, J.P. (1987), L'état de l'environnement agricole au Québec, Franc-Nord, vol. 4, no. 4, supplément, 8 p.
- DUBÉ, A. (1975), L'eau et l'érosion des sols, Ressources, vol. VI, pp. 8-15.
- EMBLETON, C. et J. THORNES (1979), Process in geomorphology, John Wiley et Sons, 436 p.

- ESCHNER, T.R. et J.E. KIRCHER (1984), Interpretation of grain-size distributions from measured sediment data, Platte River, Nebraska, Sedimentology, vol. 31, pp. 569-573.
- FEODOROFF, A. (1965), Mécanismes de l'érosion par la pluie, Revue de Géographie physique et de Géologie dynamique, vol. VII, pp. 149-163.
- FERGUSON, R.I. (1986), Hydraulics and hydraulic geometry, Progress in Physical Geography, vol. 10, pp. 1-31.
- FERGUSON, R.I. (1987), Accuracy and precision of methods for estimating river load, Earth surface processes and landforms, vol. 12, pp. 95-104.
- FINLAYSON, B.L. (1978), Suspended solids transport in a small experimental catchment, Z. Geomorph. N.F., vol. 22, pp. 192-210.
- FOLK, R.L. et W.C. WARD (1957), Brazos river bar: a study in the significance of grain-size parameters, Journal of Sedimentary Petrology, vol. 27, pp. 3-26.
- FOLK, R.L. (1966), A review of grain-size parameters, Sedimentology, vol. 6, pp. 73-93.
- FOURNIER, F. (1949), Les facteurs climatiques de l'érosion du sol, Association des Géographes Français, Bull., vol. 203, pp. 97-103.
- FRIEDMAN, G.M. (1961), Distinction between dune, beach, and river sands from their textural characteristics, Journal of Sedimentary Petrology, vol. 31, pp. 514-529.
- FRIEDMAN, G.M. (1967), Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and river sands, Journal of Sedimentary Petrology, vol. 37, pp. 327-354.
- FRIEDMAN, G.M. et J.E. SANDERS (1978), Principles of sedimentology, John Wiley et Sons, 792 p.
- GARDINER, V. et R. DACKOMBE (1983), Geomorphological field manuel, George Allen et Unwin, 254 p.
- GHOSH, J.K., B.S. MAZUMDER et S. SENGUPTA (1981), Methods of computation of suspended load from bed materials and flow parameters, Sedimentology, vol. 28, pp. 781-791.

- GIANESSI, L.P., H.M. PESKIN, P. CROSSON et C. PUFFER (1986), Nonpoint-source pollution: Are cropland controls the answer? Journal of soil and water conservation, vol. 41, pp. 215-218.
- GODBOUT, G. (1967), Étude pédologique des comtés de Champlain et Laviolette, Ministère de l'Agriculture et de la Colonisation du Québec, Division des sols, 72 p.
- GOMEZ, B. (1983), Temporal variations in the particle size distribution of surficial bed material: the effect of progressive bed armouring, Geographiska Annaler, vol. 65A, pp. 183-192.
- GOTTSCHALK, L.C. (1957), Problems of Predicting Sediment Yields from Watersheds, Transactions, American Geophysical Union, vol. 38, pp. 885-888.
- GRAF, W.H. (1971), The hydraulics of sediments transport, McGraw-Hill Book Company, 513 p.
- GREENWOOD, B. (1969), Sediment parameters and environment discrimination: an application of multivariate statistics, Canadian Journal of Earth Science, vol. 6, pp. 1347-1358.
- GREGORY, K.J. et D.E. WALLING (1973), Drainage basin form and process, Edward Arnold, 456 p.
- GUY, H.P. (1964), An analysis of some storm-period variables affecting stream sediment transport, U.S. Geological Survey Prof. Paper 462-E, 46 p.
- HALLERMEIER, R.J. (1981), Terminal settling velocity of commonly occurring sand grains, Sedimentology, vol. 28, pp. 859-865.
- HAMLETT, J.M., J.L. BACKER et H.P. JOHNSON (1983), Channel Morphology Changes and Sediment Yield from a Small Agricultural Watershed in Iowa, Transactions of the ASAE, vol. 26, pp. 1390-1396.
- HAMLETT, J.M., J.L. BAKER, S.C. KIMES et H.P. JOHNSON (1984), Runoff and Sediment Transport Within and from Small Agricultural Watersheds, Transactions of the ASAE, vol. 27, pp. 1355-1369.
- HOLY, M. (1980), Erosion and Environment, Environmental Sciences and Applications, vol. 9, Pergamon Press, 225 p.

- HYNES, H.B.N. (1973), The effects of sediment on the biota in running water, In Fluvial process and sedimentation, 9<sup>th</sup> Hydrology symposium, Edmonton, Alberta, 1973, pp. 653-663.
- KETCHESON, J.W., T. DICKINSON et P.S. CHISHOLM (1973), Potential contributions of sediment from agricultural land, In Fluvial process and sedimentation, 9<sup>th</sup> Hydrology symposium, Edmonton, Alberta, 1973, pp. 184-191.
- KIRBY, P.C. et G.R. MEHUYS (1987), The seasonal variation of soil erosion by water in southwestern Quebec, Canadian Journal of Soil Sciences, vol. 57, pp. 55-63.
- KLEIN, M. (1982), The relation between channel geometry and suspended sediment transport in the downstream direction, Z. Geomorph. N.F., vol. 26, pp. 491-494.
- KLOVAN, J.E. (1966), The use of factor analysis in determining depositional environments from grain-size distributions, Journal of Sedimentary Petrology, vol. 36, pp. 115-125.
- KNIGHTON, A.D. (1975), Variations in at-a-station hydraulic geometry, American Journal of Science, vol. 275, pp. 186-218.
- KNIGHTON, A.D. (1980), Longitudinal changes in size and sorting of stream-bed material in four English rivers, Geological Society of American Bulletin, vol. 91, pp. 55-62.
- KNIGHTON, A.D. (1982), Longitudinal changes in the size and shape of stream-bed material: evidence of variable transport conditions, Catena, vol. 9, pp. 25-34.
- LANCERY, J.M. (1982), L'érosion actuelle dans le bassin versant de la Gentilly, Note et document no. 4, Section Géographie, U.Q.T.R., 100 p.
- LANCERY, J.M. (1984), La dégradation des sols et l'agriculture, Journée d'information sur la conservation des sols, Conseil des productions végétales du Québec, 18 octobre 1984, 21 p.
- LANCERY, J.M. (1987), Le ruissellement concentré des eaux de surface: un cancer qui gruge lentement mais sûrement nos terres cultivables, Géos, vol. 16, no. 4, pp. 23-25.

- LANGBEIN, W.B. et S.A. SCHUMM (1958), Yield of Sediment in relation to Mean Annual Precipitation, Transactions, American Geophysical Union, vol. 39, pp. 1076-1084.
- LAVERDIÈRE, M.R. et G.Y. LAFLAMME (1973), Quelques propriétés physiques, chimiques et minéralogiques des séries de sol Chaloupe et Batiscan reliées à leur évolution pédogénétique, Naturaliste canadien, vol. 100, pp. 407-420.
- LAVERDIÈRE, M.R., C.R. DE KIMPE et A. D'AVIGNON (1981), Caractéristiques minéralogiques et chimiques de quelques sols sableux du Québec en regard de leur évolution pédologique, Canadian Journal of Soil Sciences, vol. 61, pp. 273-283.
- LEOPOLD, L.B. et T. MADDOCK (1953), The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications, U.S. Geological Survey Prof. Paper 252, 57 p.
- LEOPOLD, L.B., M.G. WOLMAN et J.P. MILLER (1964), Fluvial processes in geomorphology, W.H. Freeman et Co., 522 p.
- MARCHE, C. (1986), Hydrodynamique des berges, Séminaire sur l'Aménagement des berges présenté à l'Université de Montréal en février 1986, 8 p.
- MARTINS, L.R. (1965), Significance of skewness and kurtosis in environmental interpretation, Journal of Sedimentary Petrology, vol. 35, pp. 768-770.
- MASON, C.C. et R.L. FOLK (1958), Differentiation of beach, dune and aeolian flat environments by size analysis, Journal of Sedimentary Petrology, vol. 28, pp. 211-226.
- MATHER, P.M. (1976), Computational Methods of Multivariate Analysis in Physical Geography, John Wiley et Sons, 532 p.
- MCGUINNES, J.L., L.L. HARROLD et W.M. EDWARDS (1971), Relation of rainfall energy streamflow to sediment yield from small and large watershed, Journal of soil and water conservation, vol. 26, pp. 233-235.
- McCLAREN, P. (1981), An interpretation of trends in grain size measures, Journal of Sedimentary Petrology, vol. 51, pp. 611-624.
- McCLAREN, P. et D. BOWLES (1985), The effects of sediment transport on grain-size distributions, Journal of Sedimentary Petrology, vol. 55, pp. 457-470.

- McMANUS, D.A. (1982), Phi and sediment size analysis: discussion, Journal of Sedimentary Petrology, vol. 52, pp. 1011-1026.
- MEYBECK, M. (1976), Dissolved and suspended matter carried by rivers: composition, time and space variations, and world balance, In Interactions between sediments and fresh water, Symposium international tenu à Amsterdam en septembre 1976, pp. 25-32.
- MIDDLETON, G.V. (1976), Hydraulic interpretation of sand size distributions, Journal of Geology, vol. 84, pp. 405-426.
- MILETTE, G. (1982), Agriculture intensive et détérioration des sols, Agriculture, Décembre 1982, pp. 13-14.
- MONKE, E.J., D.W. NELSON, D.B. BEASLY et A.B. BOTTCHE (1981), Sediment and Nutrient Movement from the Black Creek Watershed, Transactions of the ASAE, vol. 24, pp. 391-395.
- MORGAN, R.C.P. (1979), Soil erosion, Topics in applied geography, Longman Group Limited, 113 p.
- NORTCLIFF, S. (1986), Soil loss estimation, Progress in Physical Geography, vol. 10, pp. 249-255.
- PASSEGA, R. (1957), Texture as characteristic of Clastic Deposition, American Association of Petroleum Geologists Bulletin, vol. 41, pp. 1952-1984.
- PASSEGA, R. (1964), Grain size representation by CM patterns as a geological tool, Journal of Sedimentary Petrology, vol. 34, pp. 830-847.
- PASSEGA, R. (1977), Significance of CM diagrams of sediments deposited by suspensions, Sedimentology, vol. 24, pp. 723-733.
- PICKUP, G. (1975), Downstream variations in morphology, flow conditions and sediment transport in an eroding channel, Z. Geomorph. N.F., vol. 19, pp. 443-459.
- PIZZUTO, J.E. (1984), Bank erodibility of shallow sandbed streams, Earth surface processes and landforms, vol. 9, pp. 113-124.
- QUÉBEC (1985), L'environnement vu par les producteurs agricoles, Ministère de l'Environnement du Québec, 42 p.

- QUÉBEC (1986), Guide d'analyse et d'aménagement de cours d'eau à des fins agricoles, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 252 p.
- RHODES, D.D. (1977), The b-f-m diagram: graphical representation and interpretation of at-a-station hydraulic geometry, American Journal of Science, vol. 277, pp. 73-96.
- RICHARDS, K.S. (1977), Channel and flow geometry: a geomorphological perspective, Progress in Physical Geography, vol. 1, pp. 65-102.
- RIVIÈRE, A. (1977), Méthodes granulométriques, Masson, 170 p.
- ROBINSON, A.R. (1971), Sediment, Journal of soil and water conservation, vol. 26, p. 61-62.
- ROY, R.N. et A.B. BISWAS (1975), Use of grain-size parameters for identification of depositional processes and environments of sediments, Indian Journal of Earth Sciences, vol. 2, pp. 154-162.
- ROYSE, C.F. (1968), Recognition of fluvial environments by particle-size characteristics, Journal of Sedimentary Petrology, vol. 38, pp. 1171-1178.
- SAHU, B.K. (1982), Multigroup discrimination of river, beach and dune sands using roundness statistics, Journal of Sedimentary Petrology, vol. 52, pp. 779-784.
- SALA, M. (1983), Fluvial and slope processes in the Fuirosos basin, Catalan Ranges, north east Iberian coast, Z. Geomorph. N.F., vol. 27, pp. 393-411.
- SARRE, R.D. (1987), Aeolian sand transport, Progress in Physical Geography, vol. 11, pp. 157-182.
- SCOTT, A. (1968), Les sols, Librairie Beauchemin Limitée, 372 p.
- SÉNAT DU CANADA (1984), Nos sols dégradés: le Canada compromet son avenir, 143 p.
- SENGUPTA, S. (1979), Grain-size distribution of suspended load in relation to bed materials and flow velocity, Sedimentology, vol. 26, pp. 63-82.

- SINE, L. et J.P. AGNEESESENS (1978), Étude des débits solides et du phénomène de migration dans une rivière drainant un bassin agricole, Pédologie, vol. XXVIII, pp. 183-191.
- SLY, P.G., R.L. THOMAS et B.R. PELLETIER (1983), Interpretation of moment measures derived from water-lain sediments, Sedimentology, vol. 30, pp. 219-233.
- SPSS-X (1986), User's guide, (2<sup>nd</sup> ed.), SPSS inc. McGraw-Hill Book Company, 988 p.
- ST-YVES, A. (1983), L'instabilité des berges des cours d'eau municipaux, In A.C.F.A.S. (1983); L'érosion accélérée et anthropique: ses conséquences sur l'environnement, pp. 42-55.
- SUMNER, G.N. (1978), Mathematics for Physical Geographers, John Wiley et Sons, 236 p.
- TAIRA, A et P.A. SCHOLLE (1979), Discrimination of depositional environments using settling tube data, Journal of Sedimentary Petrology, vol. 49, pp. 787-800.
- TERMIER, H. et G. TERMIER (1960), Érosion et sédimentation, Masson et Cie, 412 p.
- TROEH, F.R., J.A. HOBBS et R.L. DONAHUE (1980), Soil and Water Conservation, for productivity and environmental protection, Prentice Hall Inc., 718 p.
- VISHER, G.S. (1969), Grain size distributions and depositional processes, Journal of Sedimentary Petrology, vol. 39, pp. 1074-1106.
- WALKER, R.D. et R.A. POPE (1980), Estimating your soil erosion losses with the Universal Soil Loss Equation (U.S.L.E.), Cooperative Extension Service, College of Agriculture, University of Illinois at Urbana-Champaign, 17 p.
- WALL, G.J., W.T. DICKINSON et L.J.P. van VLIET (1979), Agricultural sources of fluvial suspended sediments, Progress in Water Technology, vol. 11, pp. 481-499.
- WALL, C.J., W.T. DICKINSON et J. GREUEL (1983), Rainfall erosion indices for Canada east of the Rocky Mountains, Canadian Journal of Soil Sciences, vol. 63, pp. 271-280.



- WALTON, E.K., W.E. STEPHENS et M.S. SHAWA (1980), Reading segmented grain-size curves, Geological Magazine, vol. 117, pp. 517-644.
- WILLETTS, B.B., M.A. RICE et S.E. SWAINE (1982), Shape effects in aeolian grain transport, Sedimentology, vol. 29, pp. 409-417.
- WISCHMEIER, W.H. et D.D. SMITH (1958), Rainfall energy and its relationship to soil loss, Transactions, American Geophysical Union, vol. 39, pp. 285-291.
- YALIN, M.S. (1972), Mechanics of sediment transport, Pergamon Press, 298 p.